



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Filière : énergie et environnement

Spécialité : électrotechnique

Présenté par : IkramZERKOUT

KhadijaCHABOU

Thème

**Conception d'un système de refroidissement des
panneaux photovoltaïques pour améliorer le rendement dans les
zones à haute température**

Soutenu publiquement, le 07/ 07/2019, devant le jury composé de :

Mr.Sidi Mohammed ABDI	Maitre de conférences classe B	ESSA-Tlemcen	Président
Mr. Z. SARI	Professeur	ESSA-Tlemcen	Directeur de mémoire
Mr.Chakib SELADJI	Professeur	Université de Tlemcen	Examineur 1
Mme. Imane BOUSMAHA	Maitre-assistant classe B	ESSAT-Tlemcen	Examineur 2
Mr. Mohammed SAIDI	PDG ALPV -Tlemcen		Invité 1

Remerciement

En premier lieu, je tiens à remercier Monsieur Z. SARI, notre encadreur de PFE et nous lui exprimons nos sincères reconnaissances pour nous avoir fait bénéficier de ses

Expériences et compétences scientifiques, ses conseils et sa vision qui nous a permis de réussir notre travail.

Nos vifs remerciements à Monsieur A. HEMIDET notre sponsor des panneaux photovoltaïques,

Pour son support et soutien aux jeunes étudiants

N'oublions pas de remercier M. BELJALOULI et M. NEGGAZ pour leurs temps et leurs efforts tout au long de la période de notre travail

Nous remercions sincèrement Monsieur S. ABDI, maître de conférence à l'ESSA Tlemcen

d'avoir accepté la présidence du jury.

Nous remercions aussi Monsieur C. SELADJI, Professeur Université de Tlemcen, d'avoir

accepté de faire partie du jury

Nos remerciements à Madame I. BOUSMAHA, maitre-assistant classe B ESSA Tlemcen

Nous saisissons cette occasion pour remercier tous les enseignants de ESSA Tlemcen

Nous remercions nos amis et toutes les personnes qui nous ont soutenu durant ces années de

D'études .

Enfin, un grand merci à nos familles

Merci à nos chers parents qui sans eux nous ne serions parvenu là

où nous sommes.

إِذَا كَانَ اللَّهُ مَعَكَ فَمَنْ عَلَيْكَ؟ وَإِذَا كَانَ عَلَيْكَ فَمَنْ مَعَكَ؟ وَإِذَا نَلْتَ مَحَبَةَ اللَّهِ مَاذَا فَقَدْتَ؟ لَمْ تَفْقَدْ شَيْئاً، وَإِذَا غَابَتْ عَنْكَ مَحَبَةُ اللَّهِ، مَاذَا وَجَدْتَ؟

إِذَا أَحْبَبَكَ اللَّهُ أَلْقَى مَحَبَّتَكَ فِي قُلُوبِ الْخَلْقِ وَإِذَا أَحْبَبَكَ الْخَلْقُ فَهَذَا رَأْسُ مَالٍ لَا يَقْدَرُ بِثَمَنِ. إِذَا أَحْبَبَكَ هَلَلَا مِنْكَ الْحِكْمَةُ وَمَنْ يُؤْتِ الْحِكْمَةَ فَقَدْ أُوتِيَ خَيْراً كَثِيراً

محمد راتب النابلسي

Je dédie ce travail à

Mes chers parents

Mes frères et sœurs

Khadija

Je dédie ce travail à

Mes chers parents

Mes frères et sœurs

Ikram

Résumé

Le solaire photovoltaïque est une source d'énergie qui a connu une évolution rapide ces dernières années, avec un prix concurrentiel aux énergies fossiles. L'Algérie donne un intérêt particulier à l'énergie photovoltaïque vu qu'elle dispose d'un énorme potentiel solaire mais les conditions de température ne sont pas favorables pour le bon fonctionnement des modules. La réduction de la température tout en garantissant la fiabilité du module avec le coût le moins cher possible et une faible consommation énergétique représente un défi. Beaucoup de systèmes ont été conçus et ils ont prouvé une certaine efficacité.

Dans ce travail nous allons concevoir un système de refroidissement de panneaux photovoltaïques face avant par des pulvérisateurs d'eau et un système de refroidissement face arrière par une circulation d'eau sur le back-sheet du panneau.

Dans le premier chapitre nous avons expliqué l'effet photovoltaïque et nous avons parlé des différentes technologies prometteuses, comme la technologie du silicium monocristallin et polycristallin qui dominent le marché mondial. Les autres technologies citées comme l'amorphe et le nanocristallin sont plus performantes mais leur coût reste encore très élevé.

Dans le deuxième chapitre nous avons parlé du coût du kilowattheure photovoltaïque à l'échelle mondiale et nous avons comparé sa valeur avec le coût des énergies fossiles. Aussi, nous avons présenté le potentiel solaire important de l'Algérie et de la température élevée qui représente une vraie contrainte pour cette source d'énergie. Nous avons interprété les courbes des caractéristiques des cellules photovoltaïques de types monocristallin et polycristallin pour déterminer la chute en puissance et en tension.

Nous avons consacré une bonne partie du chapitre II pour parler des travaux antérieurs. Il existe beaucoup de techniques de refroidissement, elles sont principalement divisées en deux types ; les systèmes passifs qui ne consomment pas d'énergie et les systèmes actifs qui consomment une énergie pour refroidir.

Après avoir vu tous ces travaux nous sommes passés au dernier chapitre. Il s'agit de la conception d'un système de refroidissement. Nous avons choisi le refroidissement actif par eau des deux faces (avant et arrière), l'objectif de notre travail est de trouver une solution qui permet d'augmenter le rendement du panneau dans les zones à haute température et de construire une base de données qui sera utile pour les travaux futurs.

Sommaire

Nomenclature	iv
Liste des Figures.....	v
Liste des Tableaux.....	vii
I Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque.....	1
I.1 Introduction	1
I.2 Historique	1
I.3 Le rayonnement solaire	2
I.4 L'effet photoélectrique	4
I.5 L'effet photovoltaïque	5
I.6 La cellule photovoltaïque : photopile	6
I.7 Les semi-conducteurs	9
I.8 La jonction P-N	11
I.9 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques :.....	13
I.9.1 Le silicium monocristallin :.....	15
I.9.2 Le silicium poly cristallin :.....	16
I.9.3 Le silicium morphe et nanocristallin :.....	18
I.9.4 Cellules à base de tellure de cadmium.....	19
I.9.5 Cellules à base de sélénure de cuivre indium gallium :	20
I.10 Les panneaux photovoltaïques :	21
II Chapitre II Refroidissement des panneaux photovoltaïques	23
II.1 Introduction et problématique :	23
II.1.1 Cout d'investissement et les avantages du photovoltaïque :	23
II.1.2 Le gisement solaire en Algérie :.....	25
II.1.3 Les installations PV en Algérie :.....	27
II.1.3.1 La distribution des centrales photovoltaïques en Algérie :.....	27

II.1.3.2	Les conditions climatiques en Algérie	29
II.1.4	L'impact de la température sur les panneaux PV :	31
II.1.4.1	L'impact de la température sur un panneau photovoltaïque de type monocristallin.....	32
II.1.4.2	L'impact de la température sur les panneaux photovoltaïques polycristallins	33
II.1.4.3	La problématique :	33
II.1.5	Le phénomène à l'échelle microscopique :	34
II.2	Les travaux antérieurs de refroidissement des panneaux photovoltaïques :	35
II.2.1	Les technologies de refroidissement	35
II.2.1.1	Les systèmes passifs pour le refroidissement des panneaux PV :	35
II.2.2	Les systèmes actifs pour le refroidissement des panneaux PV :	38
II.2.2.1	Le refroidissement des panneaux PV par un collecteur thermique :	38
II.2.2.2	Le refroidissement par pulvérisation d'eau de panneau :	38
II.3	Les avantages du refroidissement des panneaux PV :	41
II.3.1	Ralentissement du vieillissement des panneaux photovoltaïques :	42
II.3.2	Le nettoyage des panneaux :	44
III	Chapitre III La réalisation d'un système de refroidissement des panneaux photovoltaïques	45
III.1	Les modes de transfert de chaleurs	45
III.2	Simulations :	47
III.2.1	Les projecteurs lumineux du laboratoire	47
III.2.2	Description du mode opératoire	48
III.2.3	Résultats et interprétation :	49
III.3	Réalisation d'un prototype du système de refroidissement	51
III.3.1	La liste du matériels utilisés	51
III.3.2	Le refroidissement face avant :	59

III.3.2.1	Le principe de fonctionnement :	59
III.3.2.2	Résultats et interprétations :	61
III.3.2.3	Le bilan énergétique :	72
III.3.2.4	Le coût du prototype :	74
III.3.3	Le refroidissement face arrière :	76
III.3.3.1	Résultats et interprétations	76
III.3.3.2	Le bilan énergétique	78
III.3.3.3	Le coût du prototype du système de refroidissement face arrière :	79
III.3.4	Conclusion	79
IV	Conclusion générale	80
	Bibliographie	81

Nomenclature

PV → photovoltaïque

STC → Standards Tests Conditions

PV → photovoltaïque

V_{co} → tension de circuit ouvert

I_{cc} → courant de court-circuit

V_c → tension en charge

I_c → courant en charge

P_c → puissance crête

P_e → puissance électrique

Irrad → irradiation

Coef_{tp} → coefficient de température de puissance

NOTC → Normal Operating Thermal Conditions

MCP → matériaux à changement de phase

PV/T → photovoltaïque thermique

Liste des Figures

Figure I-1 le spectre du rayonnement solaire incident (www.lenergie-solaire.net).....	3
Figure I-2 Spectre électromagnétique (www.lenergie-solaire.net)	4
Figure I-3 Schéma explicatif de l'effet photoélectrique (energypedia.info).....	6
Figure I-4 Le bilan énergétique de la conversion Photovoltaïque	6
Figure I-5 Schéma du circuit électrique d'une cellule PV	7
Figure I-6 La caractéristiques courant-tension d'une cellule PV	8
Figure I-7 La caractéristiques puissance-tension	9
Figure I-8 Représentation des bandes de d'énergie (www.goulet.ca).....	10
Figure I-9 Distribution électronique du semi-conducteur de type N [1.7].....	11
Figure I-10 Distribution électronique du semi-conducteur de type P [1.7]	12
Figure I-11 Répartition des charges dans la jonction PN.....	13
Figure I-12 Organigramme récapitulatif les différentes technologies photovoltaïques.....	15
Figure I-13 Prépondérance des matériaux utilisés dans la production de cellules en 2014.....	15
Figure I-14 Les différentes étapes de la méthode Czochralski	16
Figure I-15 Cellule à base du silicium poly cristallin	17
Figure I-16 Principales étapes de fabrication du matériau, de la cellule et du module PV[1.4]	17
Figure I-17 Vue en coupe de l'empilement des couches du silicium amorphe [1.4].....	19
Figure I-18 Vue en coupe d'une cellule à base de CdTe.	20
Figure I-19 Vue en coupe d'une cellule à base de Cu (In,Ga)Se [1.4].	21
Figure II-1 La courbe du cout d'un kilowattheure photovoltaïque évolution dans 10 ans fait par [2.28].....	24
Figure II-2 La moyenne annuelle d'insolation calculée cas d'un ciel totalement dégagé CDER [2.22]	26
Figure II-3 La moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue par une surface horizontal- CDER [1.22].....	26
Figure II-4 Cartes de la distribution des centrales photovoltaïques les en Algérie, SONALGAZ	28
Figure II-5 La caractéristique I-V et P-V d'une cellule monocristalline [1.30].....	32
Figure II-6 Courbe qui représente la séparation du spectre solaire en partie PV et une partie thermique [1.4].....	37

Figure II-7 Système de refroidissement SUNI Brain par arrosage	39
Figure II-8 Un schéma descriptif du système conçu par CDER	40
Figure III-1 Photos du projecteur lumineux pris en laboratoire de l'école ESSA Tlemcen	48
Figure III-2 La courbe de la tension V_{co} en fonction de la température essai à vide.....	50
Figure III-3 Schéma explicatif d'un thermocouple.....	51
Figure III-4 4LM35DZ : boîtier plastique TO92 plage 0 °C à +100 °C	53
Figure III-5 Schéma électrique de LM35 [2.41]	53
Figure III-6 Tuyau en cuivre utilisé dans l'essai.....	54
Figure III-7 Pulvérisateurs d'eau utilisés pour le refroidissement	55
Figure III-8 Pompe DC lave glace qui assure la circulation d'eau	55
Figure III-9 Une carte Arduino Uno	56
Figure III-10 Le relais SRD-05 VDC-SL-C.....	56
Figure III-11 Symbole électrique du relais	57
Figure III-12 Distributeurs d'eau uniforme de la face avant.....	57
Figure III-13 le radiateur avec les distributeurs d'eau pour la face arrière.....	58
Figure III-14 Schémas explicatif du refroidissement face avant.....	60
Figure III-15 Le système de refroidissement par pulvérisation d'eau	60
Figure III-16 la boîte de commande du système de refroidissement par pulvérisation d'eau ..	61
Figure III-17 La courbe du rayonnement en fonction des heures de la journée prise le 25/04/2019 Tlemcen.....	65
Figure III-18 La courbe de la température en fonction des heures de la journée prise le 25/04/2019 Tlemcen.....	65
Figure III-19 La courbe de la tension en fonction de la température du 17/04/2019.....	66
Figure III-20 La courbe de la tension en fonction de la température du 22/04/2019.....	66
Figure III-21 La courbe de la tension en fonction de la température du 27/04/2019.....	66
Figure III-22 La courbe de la tension en fonction de la température du 25/04/2019.....	66
Figure III-23 Courbe de la tension et de la température en fonction du temps pour le refroidissement face avant.....	72
Figure III-24 Courbe de la tension et de la température en fonction du temps pour le refroidissement face arrière	76
Figure III-25 Schémas explicatif du refroidissement face arrière.....	77
Figure III-26 Le système de refroidissement face arrière réalisé.....	78

Liste des Tableaux

Tableau II-1 Le cout de production des différents types.....	24
Tableau II-2 les valeurs de l'insolation et l'énergie.....	26
Tableau II-3 Les centrales photovoltaïques les plus importantes en Algérie avec la capacité de chacune [1.29].....	27
Tableau II-4 Les valeurs de la température moyenne min et max et les heures ensoleillées sur la wilaya d'Alger[2.23].....	29
Tableau II-5 les valeurs de la température moyenne min et max sur la wilaya de Biskra [2.23].....	29
Tableau II-6 les valeurs de la température moyenne min et max et les heures.....	30
Tableau II-7 Les résultats expérimentaux des panneaux troués[1.19].....	36
Tableau III-1 La plaque signalétique du panneau.....	47
Tableau III-2 Les valeurs de température, tension V_{co} , courant I_{cc}	49
Tableau III-3 Les valeurs de température, tension V_c et le courant I_c et la puissance-essai en charge.....	50
Tableau III-4 Les caractéristiques du thermocouple choisis.....	52
Tableau III-5 Caractéristiques du module utilisé dans la réalisation.....	58
Tableau III-6 Les résultats expérimentaux pris le 15/04/2019 à Tlemcen.....	61
Tableau III-7 Les résultats expérimentaux pris le 16/04/2019 à Tlemcen.....	62
Tableau III-8 Les résultats expérimentaux pris le 17/04/2019 à Tlemcen.....	63
Tableau III-9 Les résultats expérimentaux pris le 22/04/2019 à Tlemcen.....	63
Tableau III-10 Les résultats expérimentaux pris le 27/04/2019 à Tlemcen.....	64
Tableau III-11 Les résultats expérimentaux pris le 25/04/2019 à Tlemcen.....	64
Tableau III-12 Les valeurs de la tension et du courant et puissance pour l'essai en charge....	67
Tableau III-13 Test du prototype de refroidissement du panneau le 21/05/2019.....	68
Tableau III-14 les conditions météorologiques du teste de refroidissement 11/06/2019.....	68
Tableau III-15 Test du prototype de refroidissement face avant du panneau PV le 11/06/2019.....	71
Tableau III-16 Le coût du système de refroidissement par pulvérisateur d'eau.....	74
Tableau III-17 résultats du test du système de refroidissement face avant avec distributeur d'eau le 11/06/2019.....	74
Tableau III-18 le coût du système de refroidissement face avant par distributeur d'eau.....	75

Tableau III-19 Résultats du test du système de refroidissement face arrière le 11/06/2019.....76

I Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque

I.1 Introduction

Le soleil, première source d'énergie connue par l'homme, c'est une source inépuisable d'énergie lumineuse et d'énergie thermique. Depuis la nuit des temps, le rayonnement solaire rend possible la vie sur terre. Il est l'élément essentiel de la photosynthèse, il permet à l'eau, source de la vie, de garder l'état liquide.

Durant le dernier siècle, une nouvelle méthode d'exploitation de l'énergie du soleil a été découverte : la production de l'électricité à partir des rayons solaires. En 1954 la première cellule solaire à base de silicium, telle qu'on la connaît aujourd'hui, a vu le jour. Ce travail est effectué par une équipe de chercheurs de BELL Telephone Laboratories aux Etats Unis, D.M Chapin, C.S Fuller et G.L.Pearson. Ils ont déposé leur brevet en 1957 marquant ainsi la naissance de l'électricité photovoltaïque à un rendement de 6%. [2.10]

I.2 Historique

En remontant dans le temps, en 1837 l'effet photoélectrique fut découvert par un physicien français nommé Antoine Becquerel. Il remarqua qu'un effet électrique se produit dans certains matériaux une fois exposés aux rayons solaires et il publia un mémoire de ses travaux aidé par son fils Edmond.

En 1905 Albert Einstein a publié un document convaincant sur le potentiel de l'effet photoélectrique grâce à sa théorie de la physique quantique pour lequel il a eu le prix de Nobel en 1921. [2.32]

Jusqu'à là, le rendement des cellules photovoltaïques inventées était très faible et leur coût était très élevé. Dans les années soixante, durant la guerre froide, les satellites spatiaux ont connus un développement remarquable : la course à l'espace. L'énergie solaire photovoltaïque représente le meilleur moyen d'alimenter des satellites spatiaux vu qu'ils ont besoin d'une faible source d'énergie et le soleil est considéré comme une source d'énergie constante pour les satellites en orbite. Par conséquent l'industrie spatiale a contribué au développement

des cellules photovoltaïques. Elle a dépensé des fonds énormes pour le développement des cellules photovoltaïques afin d'améliorer leurs rendements et baisser leurs prix.

Notons que la première application des cellules photovoltaïques au sol était dans les années 1970 pour alimenter des lieux reculés aux Etats Unis.

De nos jours, l'énergie solaire représente la source de l'énergie future vu la décadence remarquable des énergies fossiles ce qui causera une crise énergétique comme dans les années 1970 lorsque le prix du pétrole a explosé.

I.3 Le rayonnement solaire

L'énergie solaire reçue par la terre, sous forme de rayons solaires, représente par an près de 15 000 fois la totalité de la consommation énergétique mondiale actuelle. [2.7] En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire est soumis à des phénomènes de réflexion, réfraction, absorption et diffusion par les gaz constituant les couches atmosphériques. Environ la moitié du rayonnement solaire traverse l'atmosphère sans aucune modification : c'est le rayonnement net. Seulement la moitié de ce dernier atteint la surface de la terre. Par conséquent, l'énergie solaire disponible représente environ le quart de l'énergie totale émise.

Littéralement, le rayonnement est défini comme le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Ainsi le rayonnement solaire est le transfert de l'énergie, produite par le processus de la fusion nucléaire au niveau du soleil, par des ondes électromagnétiques de différentes longueurs. Sa décomposition en longueurs d'ondes, en forme de cloche, est appelée spectre électromagnétique. [2.17]

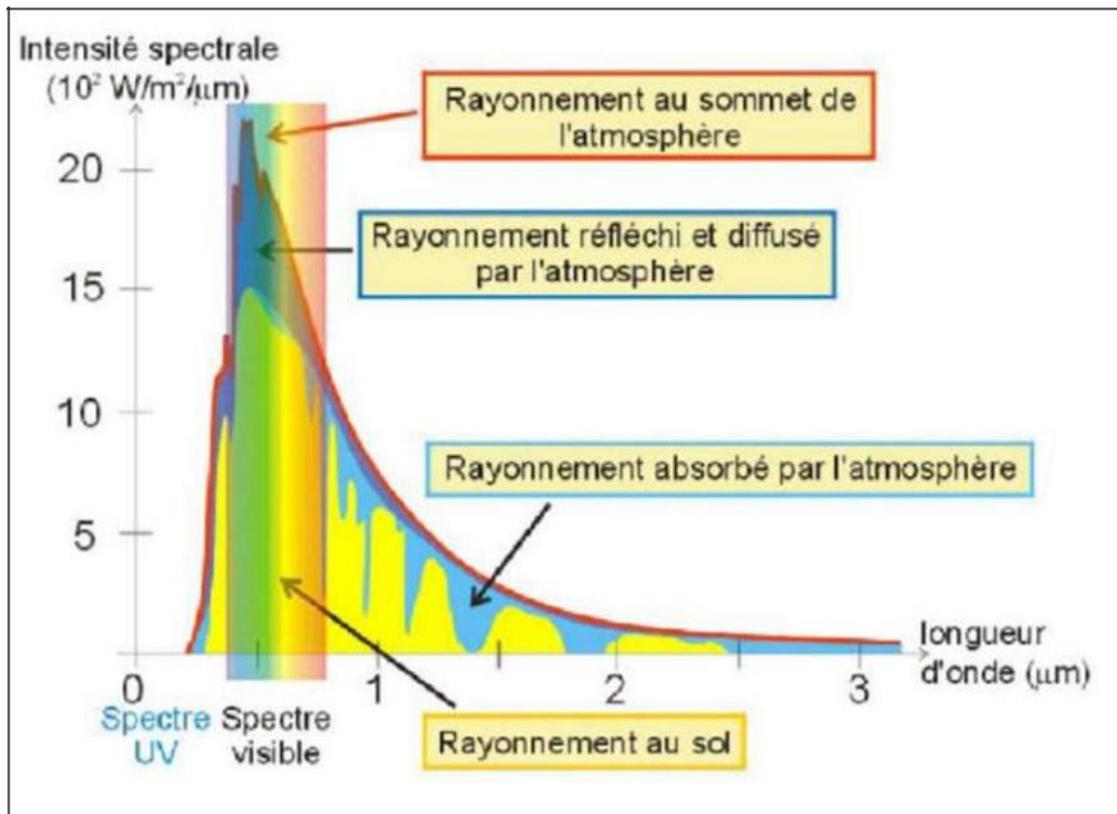


Figure I-1le spectre du rayonnement solaire incident (www.lenergie-solaire.net)

Le soleil émet un rayonnement à large spectre, qui inclut le domaine visible par l'œil humain. Sur la figure -1- :

- le spectre du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère est représenté par la courbe rouge.
- Le spectre du rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre est représenté par la surface jaune.
- La partie du rayonnement absorbée par l'atmosphère est en bleu.

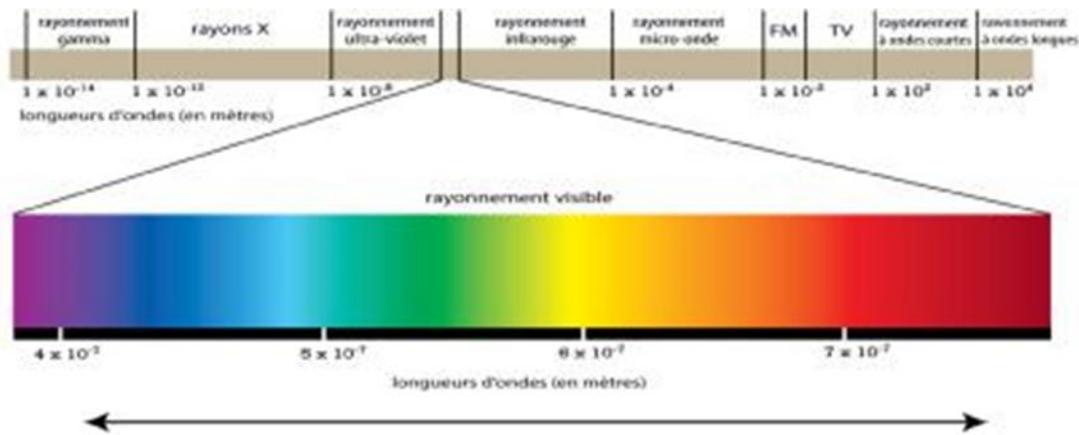


Figure I-2 Spectre électromagnétique (www.lenergie-solaire.net)

La fréquence, qui est l'inverse de la longueur d'onde, des ondes électromagnétiques est d'une importance majeure pour déterminer leur énergie, leur visibilité et leur pouvoir de pénétration.

La figure -2- montre la partie visible du spectre électromagnétique. La gamme des longueurs d'onde visibles est comprise entre 390 nm (violet) à 780 nm (rouge).

I.4 L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique désigne en premier lieu l'émission d'un électron par un matériau soumis à la lumière.

Selon Le Grand Dictionnaire Encyclopédique Larousse, l'effet photoélectrique est tout phénomène d'interaction entre le rayonnement et la matière caractérisé par l'absorption des photons et la libération consécutive d'électrons. On distinguera alors effet photochimique, effet photorésistif, photoconductivité et effet photovoltaïque lorsqu'il est mis en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque.

Le caractère essentiel du phénomène est le fait qu'au-dessous d'un certain seuil de fréquence, il n'y a aucun électron émis quelle que soit l'intensité du rayonnement incident. Cette propriété ne trouve aucune explication en physique classique où le rayonnement électromagnétique est considéré comme une onde. L'interprétation du phénomène a été donnée par Einstein en 1905. Reprenant l'hypothèse du quanta formulée quelques années auparavant par Planck pour rendre compte du rayonnement thermique du corps noir. Il l'étendit à l'interaction de la lumière avec la matière, celle-ci est non

Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque

seulement émise mais absorbé par quanta, appelé photon est procédant une énergie $E = h \nu$, h étant la constante de Plank et la fréquence. [1.13]

Un photon ne produit l'effet photoélectrique que si son énergie $h\nu$ est supérieure à l'énergie W_s nécessaire à l'extraction d'un électron de l'atome. L'électron émit possède une énergie cinétique : $E_c = h\nu - W_s$, W_s dépend de la nature de la matière.

L'effet photoélectrique est à la base de nombreux dispositifs important tels que les photopiles. Notons que l'effet photovoltaïque est un effet photoélectrique interne dans les semi-conducteurs afin de produire de l'électricité. [1.13]

I.5 L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque, phénomène physique par lequel un rayonnement lumineux incident peut provoquer, si sa longueur d'onde est suffisamment courte, l'apparition d'une différence de potentiel entre les deux cotés d'une jonction semi-conductrice. En d'autres termes, l'effet photovoltaïque est la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique. C'est le produit du choc des photons de la lumière sur un matériau semi-conducteur. [2.16] Chaque photon transmet son énergie caractéristique, déterminée par la fréquence de la lumière : sa longueur d'onde, à un électron. Une partie de cette énergie permet d'arracher l'électron de son périphérique au niveau de l'atome du matériau semi-conducteur. L'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique qui génère une excitation de l'électron de la bande de valence vers la bande de conduction. La circulation des électrons animés par l'énergie des photons et soumise à l'effet de la jonction du semi-conducteur produit un courant électrique. [2.4]

Cet effet photovoltaïque est notamment utilisé dans les panneaux solaires photovoltaïques.

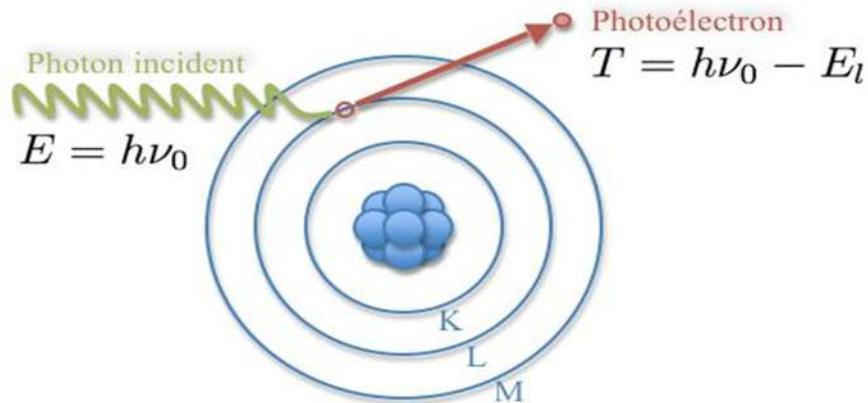


Figure I-3 Schéma explicatif de l'effet photoélectrique (energypedia.info)

I.6 La cellule photovoltaïque : photopile

Une cellule photovoltaïque est un dispositif électronique à base de matériaux semi-conducteurs utilisant l'effet photovoltaïque. Ces propriétés électriques varient en fonction de l'intensité lumineuse.

Sachant que sur le total d'énergie incidente, une très faible portion est réfléchiée par la surface du capteur et une petite portion est convertie en énergie électrique. Le reste de l'énergie, qui représente la plus grande partie, est dissipé sous forme de chaleur, par conduction. De ce fait, la température de fonctionnement du capteur devient relativement élevée ce qui affecte négativement le rendement de la cellule photovoltaïque. Et donc, la température est un paramètre très important et ne peut être négligé dans le comportement des cellules solaires.

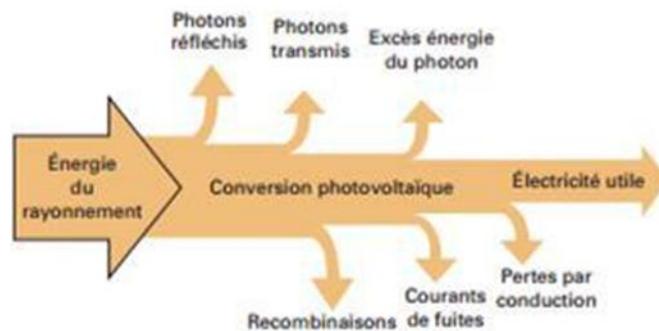


Figure I-4 Le bilan énergétique de la conversion Photovoltaïque

La conversion d'une partie de l'énergie solaire reçue sous forme de rayonnement solaire en énergie électrique est basée sur trois mécanismes suivants :

- Absorption des photons par les matériaux constituant le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique.
- Collecte des particules générées (électron) dans le dispositif.

Les photons du rayonnement incident, ayant une énergie suffisante, sont absorbés par la première couche de la cellule solaire en donnant naissance à une paire d'électron-trou. Les électrons gagnent une énergie cinétique et s'agitent d'une manière aléatoire. Les paires électron-trous finissent par se recombiner sans créer de courant électrique. D'où la nécessité de la jonction semi-conductrice N-P qui crée un champ électrique dont le rôle est de séparer les paires électron-trou et provoquer la naissance d'un courant électrique. Le champ électrique de la jonction assure l'accumulation des porteurs de charge produites par l'effet photoélectrique vers les deux électrodes : anode et cathode.

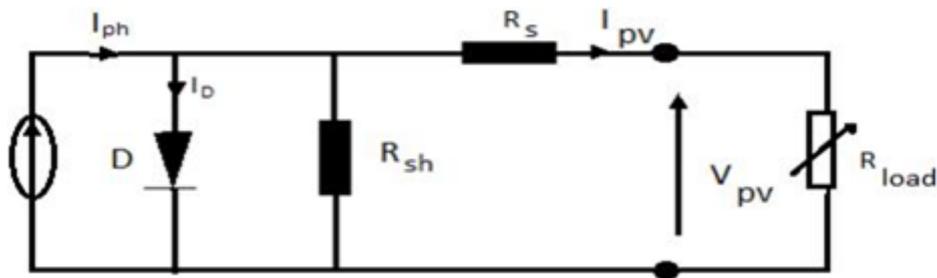


Figure I-5 Schéma du circuit électrique d'une cellule PV

Lorsque la cellule PV est non-linéaire on peut la modéliser par le schéma électrique équivalent comme le montre la figure, il correspond à un générateur de courant I_{ph} monté en parallèle avec une diode. La diode décrit les propriétés semi-conductrices de la cellule photovoltaïque (modélisation du comportement de la cellule dans l'obscurité). [1.23]

Deux résistances sont introduites dans ce schéma, elles ont une certaine influence sur la caractéristique $I = f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt (R_{sh}) est due à un courant de fuite, les courants parasites qui traversent la cellule, au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{pf} - I_{sat} \cdot \left[e^{\left(q \cdot \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{n \cdot K \cdot T_c} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{R_{sh}}$$

Où :

I_{sat} est le courant de saturation, K est la constante de Boltzmann (1,38110⁻²³ J/K),

T est la température effective des cellules en Kelvin(K)

e est la charge de l'électron (e=1,6 10⁻¹⁹ C)

n est le facteur d'idéalité de la jonction (1 < n < 3)

I_{pv} est le courant fourni par la cellule lorsqu'elle fonctionne en générateur

V_{pv} est la tension aux bornes de cette même cellule

I_{ph} est le photo-courant de la cellule dépendant de l'éclairement et de la température ou bien courant de court-circuit

R_{sh} est la résistance shunt caractérisant les courants de fuite de la jonction

R_s est la résistance série représentant les diverses résistances de contacts et de connexions. [1.23]

Une cellule photovoltaïque représentée par sa caractéristique $I_p=f(U)$ peut être schématisée par la courbe suivante.

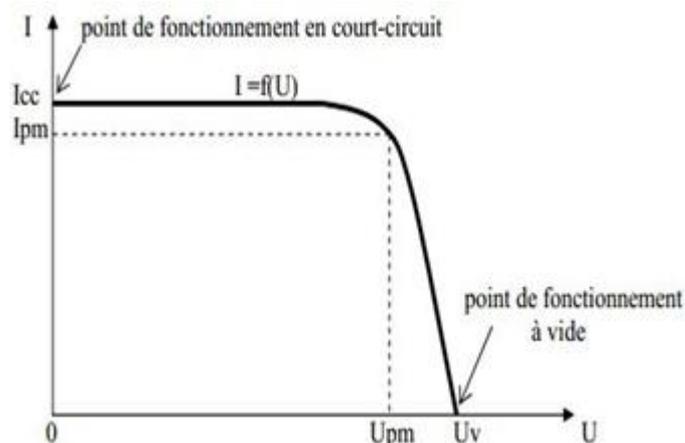


Figure I-6 La caractéristique courant-tension d'une cellule PV

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$.

Cette courbe a l'allure suivante :

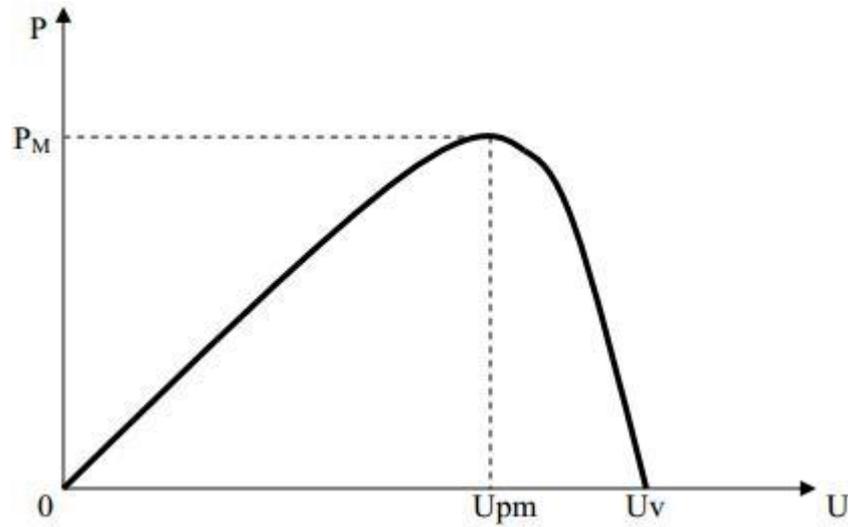


Figure I-7 La caractéristiques puissance-tension

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$. [1.23]

I.7 Les semi-conducteurs

Les cellules photovoltaïques sont à base de matériaux semi-conducteurs. Ces matériaux ont des propriétés électriques assez particulières : intermédiaire entre les isolants et les 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 est suffisamment importante. La largeur de sa bande interdite est faible. Elle varie entre 1 et 2 eV.

Pour décrire leurs comportements électriques, il faut comprendre la théorie des bandes d'énergie. En physique quantique des solides, la théorie des bandes est une modélisation des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un solide à l'intérieur de celui-ci

Les électrons sont répartis suivant des niveaux d'énergies et tout électron est décrit par un niveau d'énergie quantifié par des eV : électronvolt. Cette énergie est relative à sa position et

son éloignement du noyau. Une bande d'énergie permise représente un intervalle où l'électron peut prendre n'importe quelle valeur et elle peut contenir plusieurs électrons. Il existe plusieurs bande d'énergie permise et chaque deux bandes d'énergie permises sont séparées par une bande d'énergie interdite appelée : gap où l'électron ne peut prendre aucune valeur.

La bande d'énergie totalement remplie d'énergie la plus élevée s'appelle la Bande de Valence (EV). La bande d'énergie totalement vide ou partiellement remplie d'énergie la plus élevée s'appelle la Bande de Conduction (EC). [1.7]

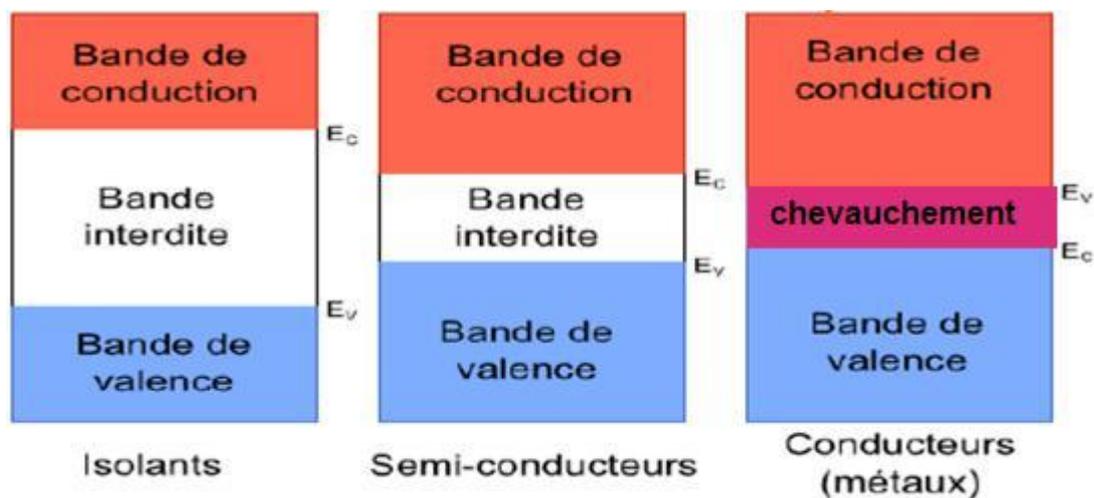


Figure I-8 Représentation des bandes de d'énergie (www.goulet.ca)

Pour un conducteur, il n'y a pas une bande interdite entre la bande de valence et la bande conductrice : il y a un chevauchement entre les deux. Les électrons peuvent facilement passer à la bande conductrice et y circuler.

Pour un isolant, la bande interdite est grande. Le passage des électrons à la couche conductrice est impossible.

Pour un semi-conducteur la bande interdite est petite. Si un des électrons de valence absorbe une énergie suffisante, d'une source externe, pour vaincre l'énergie du gap il s'arrache de la couche de valence, devient un électron libre et passe à la bande conductrice.

Cette représentation en bandes d'énergie est une représentation simplifiée et partielle de la densité d'états électroniques.

I.8 La jonction P-N

La circulation du courant, mouvement des électrons, est assurée par la jonction P-N. Pour créer une jonction P-N, il faut commencer par le dopage d'un cristal semi-conducteur intrinsèque par des atomes pentavalents et trivalents.

Le dopage d'un semi-conducteur est l'introduction volontaire des impuretés dans un semi-conducteur ultra purifié. C'est une technique qui permet d'augmenter la quantité de trous et d'électrons d'un matériau en remplaçant une très faible quantité de ses atomes par des atomes d'une autre nature. Le taux et la nature des impuretés varient d'un point à un autre. [2.35]

Le dopage par des atomes pentavalents introduit un électron en plus sur la couche de valence. Cet électron excédentaire est considéré comme un électron libre. Notons que les atomes du semi-conducteur dopé restent électriquement neutres. Le semi-conducteur dopé par atome pentavalent est appelé semi-conducteur de type N. Les électrons sont les porteurs majoritaires.

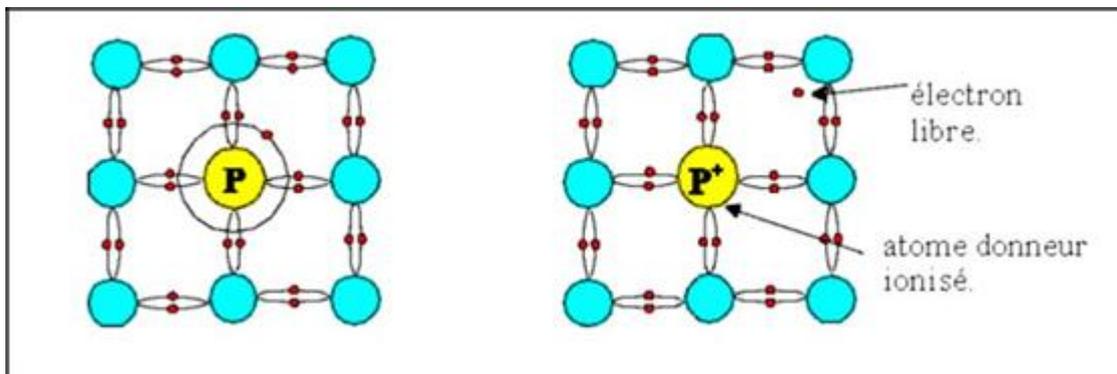


Figure I-9 Distribution électronique du semi-conducteur de type N [1.7]

De l'autre côté, en dopant le semi-conducteur avec des atomes trivalents, on se retrouve avec 7 électrons sur la couche de valence du semi-conducteur dopé. Soit un électron en moins ce qu'on peut considérer comme un trou. Le semi-conducteur dopé par atome trivalent est appelé semi-conducteur de type P. Les trous sont les porteurs majoritaires.

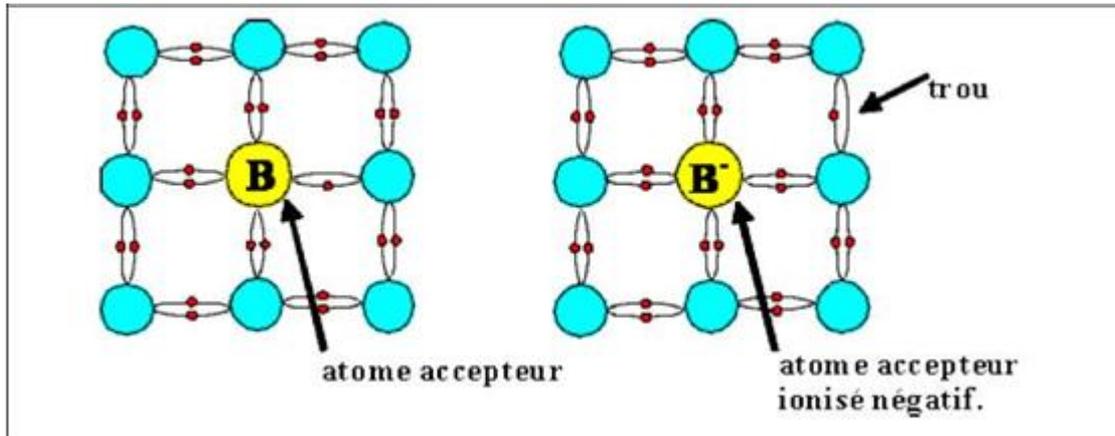


Figure I-10 Distribution électronique du semi-conducteur de type P [1.7]

Pour former une jonction P-N, il faut juxtaposer les deux types de dopages côte à côte d'un même semi-conducteur. C'est-à-dire doper une face du semi-conducteur en type P et l'autre face en type N.

Lorsque la région dopée P est mise en contact avec la région N, les électrons libres de la zone N sont piégés par les trous de la zone P. Il en résulte une zone de déplétion où la concentration en porteurs de charge libres est quasiment nulle. Dans cette zone de déplétion, les ions fixes génèrent un champ électrique E. Ce champ électrique empêche la circulation d'électrons à travers la jonction et la recombinaison électron/ trou : elle crée une séparation entre les trous et les électrons. Le champ électrique est équivalent à une différence de potentiel appelée barrière de potentiel. A 20°C, elle vaut 0,6 V pour le silicium. [2.36]

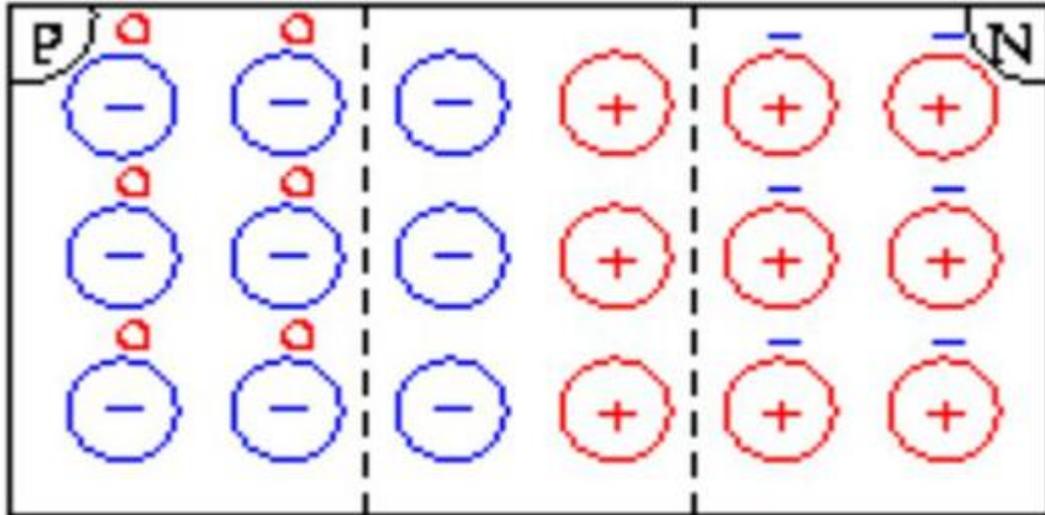


Figure I-11 Répartition des charges dans la jonction PN

Le fonctionnement des générateurs photovoltaïques repose sur les propriétés de la jonction P-N. Les cellules photovoltaïques sont constituées d'une jonction p-n de grande surface. A l'obscurité, elle est en équilibre. Si elle est éclairée, les photons assez énergétiques qu'elle absorbe créent des paires électrons-trous séparées par le champ électrique de la jonction, c'est bien l'effet photovoltaïque. Les électrons libres sont entraînés vers la partie n et les trous positifs vers la partie p.

I.9 Les différentes technologies des cellules photovoltaïques :

Il existe différentes technologies de fabrication des cellules photovoltaïques telles que les méthodes classiques basées sur le silicium, existant en abondance dans le sable. La purification du silicium, matière première, coûte de plus en plus cher en raison de la forte augmentation de la demande. D'où vient la nécessité de développer des nouveaux matériaux solaires à base de techniques de purifications simplifiées.

D'autres matériaux sont actuellement exploités dans ce domaine afin d'améliorer le rendement des cellules solaires et diminuer le coût de fabrication. Les recherches se sont lancées sur différentes voies et donc on en distingue trois catégories principales de cellules photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques de première génération ce sont les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin. C'est une technologie mature et son développement consiste à réduire le

Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque

coût de fabrication en optimisant le nombre d'étapes de fabrication et la quantité de matière première utilisée. 95% des panneaux solaires installés sur les champs ou les toits utilisent des cellules PV de silicium cristallin. Elle reste toujours la voie la plus avancée dans le domaine du photovoltaïque. [1.6].

Les cellules photovoltaïques de deuxième génération ce sont des cellules à base de couches minces de semi-conducteurs simple, comme le silicium cristallin ou amorphe, ou composé comme le cuivre-indium-gallium-sélénium, tellure de cadmium, organique à base de polymère... ou organiques. En 1970 les travaux de recherche se sont lancés dans cette filière. Durant ces dernières années, le développement de ces technologies a connu un progrès très important tant sur la fiabilité des cellules que le rendement de conversion. Le rendement est autour de 11% pour le silicium et atteint 17% pour le CIGS et CdTe. [1.4].

Compte tenu du peu de matière utilisée et du développement remarquable des technologies associées, le coût de fabrication baissera pour venir concurrencer la filière dominante.

Les cellules photovoltaïques de troisième génération sont à base des matériaux contenant des éléments chalcogènes, comme le composé cuivre-indium-sulfure (CIS).[2.37].

Elles sont plus souples et ultrafines. Elles sont très agiles donc elles pourraient équiper tant les toits que les objets de tous les jours comme le dos d'un sac à dos ou même les vêtements. Elles possèdent le plus grand rendement des cellules photovoltaïques 31%. Elles réduisent fortement les pertes optiques et électriques. Les recherches sont orientées vers les nouveaux matériaux notamment structurés. [1.6].

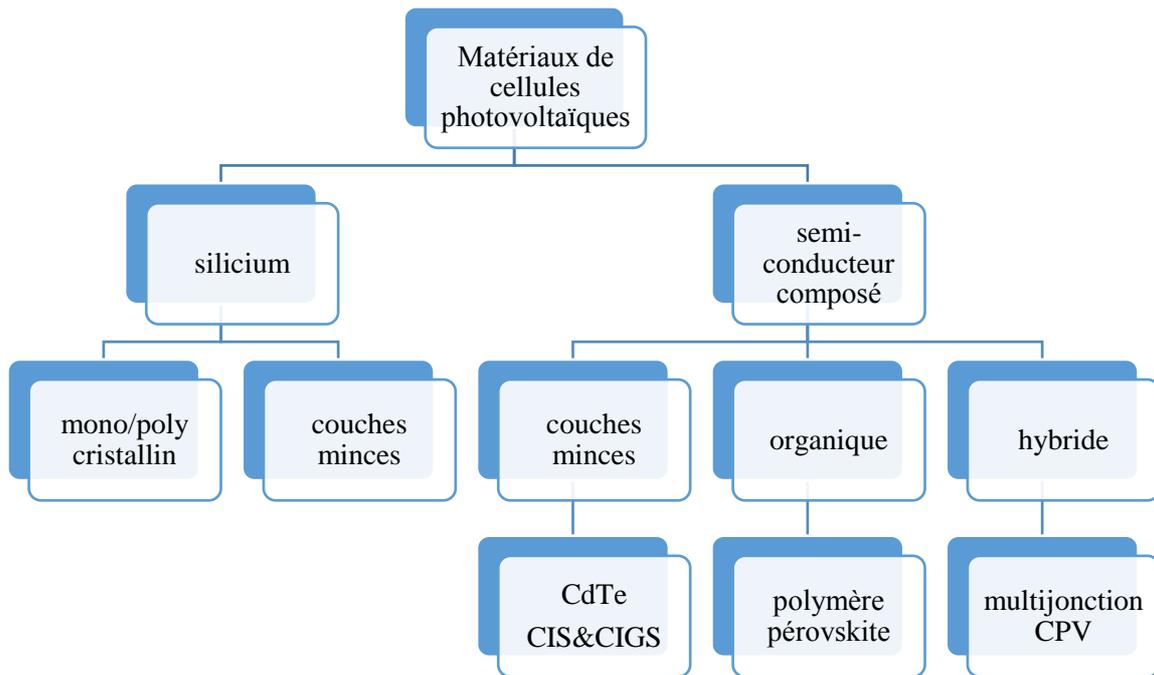


Figure I-12 Organigramme récapitulatif des différentes technologies photovoltaïques

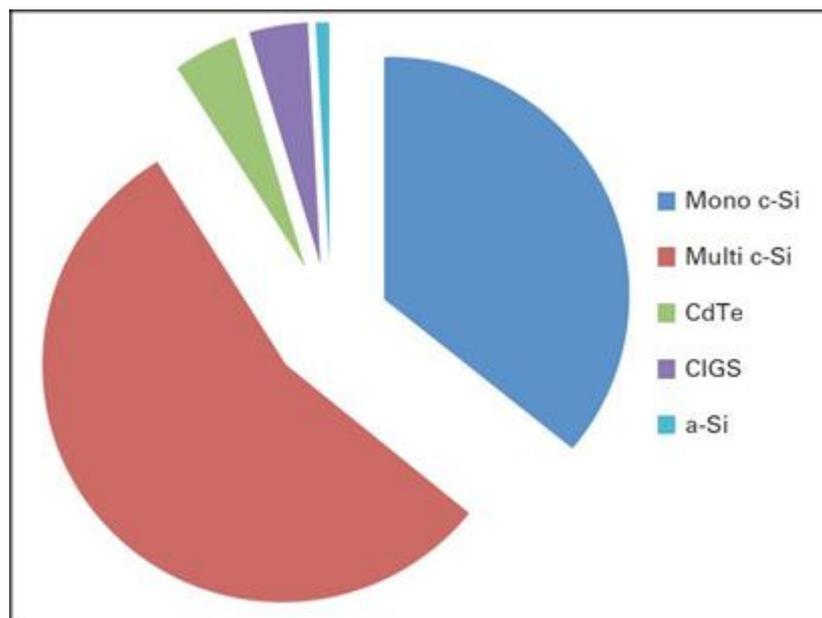


Figure I-13 Prépondérance des matériaux utilisés dans la production de cellules en 2014

I.9.1 Le silicium monocristallin :

Pour obtenir le silicium monocristallin, on utilise la méthode Czochralski qui consiste à tirer un seul et immense cristal. Sachant que d'un kilogramme de minerai de silice on obtient 100g de silicium monocristallin avec une dépense énergétique considérable.

Tout d'abord le silicium poly cristallin est fondu dans un creuset à une très haute température (1). Ensuite un germe de monocristallin est mis en contact avec le silicium liquide (2) puis tiré lentement avec un lent mouvement de rotation (3) (4). On obtient un lingot cylindrique qui sera ensuite découpé en fines plaquettes de silicium monocristallin(5). [1.5]

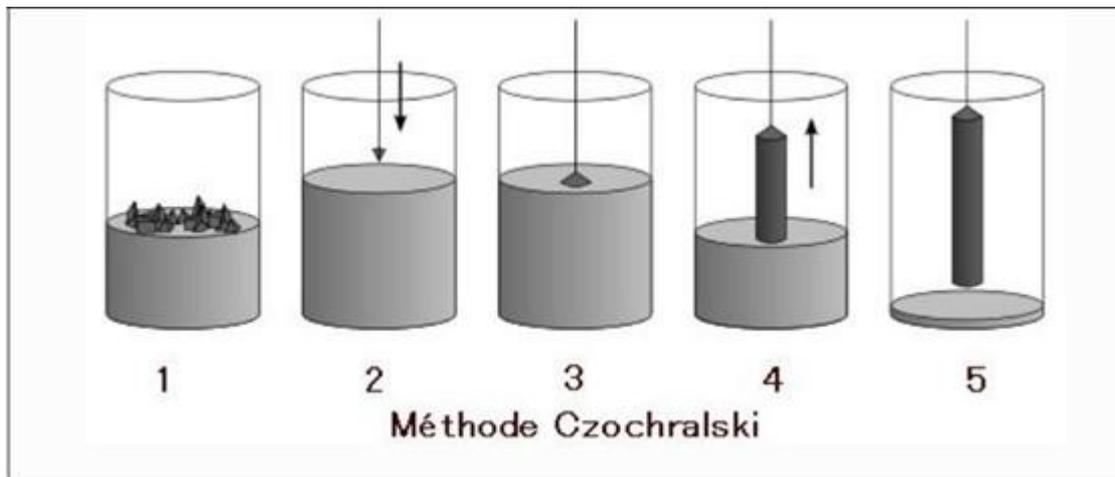


Figure I-14 Les différentes étapes de la méthode Czochralski

Ensuite vient le processus technologique de fabrication des cellules photovoltaïques avec la méthode PECVD, la sérigraphie [voir l'annexe -1-]

Les cellules photovoltaïques monocristallines, utilisant cette méthode, atteignent un rendement de conversion record 25,6% au laboratoire de l'université de New South Walles, Australie.

I.9.2 Le silicium poly cristallin :

Le silicium poly cristallin est obtenu par un procédé de coulage plus rapide et moins couteux que dans le cas de la synthèse de monocristallin. Le procédé Polix permet d'obtenir des lingots par un refroidissement contrôlé du silicium en fusion. Un gradient de température contrôlé entre le haut et le bas du creuset, le silicium se solidifie en donnant naissance à un lingot avec des grains de silicium épais donc plusieurs cristaux se forment dans différentes directions et avec différentes tailles.



Figure I-15 Cellule à base du silicium poly cristallin

Il existe plusieurs techniques de fabrication de silicium poly cristallin qui produisent toutes un silicium moins pur que le monocristallin. Le rendement au laboratoire est de 18,5%. Les recherches dans ce domaines sont orientés vers la maîtrise des défauts de cristallographie afin de minimiser le nombre de cristaux construit et s'approcher le plus possible du silicium monocristallin.

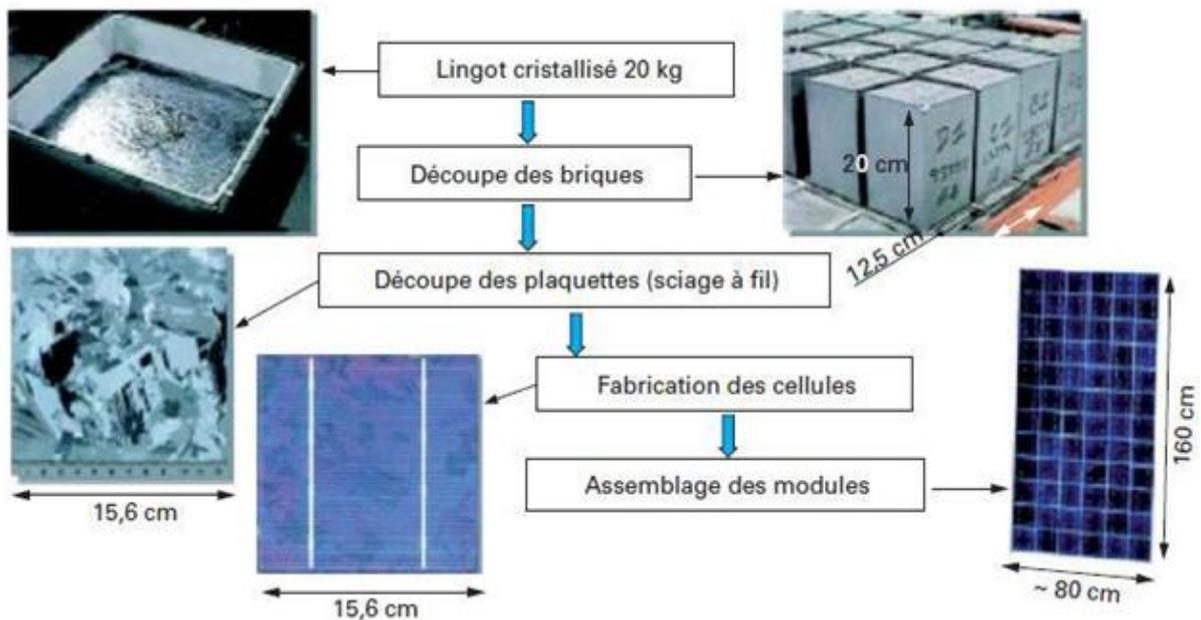


Figure I-16 Principales étapes de fabrication du matériau, de la cellule et du module PV[1.4]

I.9.3 Le silicium morphe et nanocristallin :

Le silicium amorphe est non cristallisé et ses liaisons pendantes sont saturées par l'hydrogène. Les recherches ont été lancées dans cette filière dans les années 1990. Parmi ses propriétés :

- Un grand coefficient d'absorption solaire (une très petite épaisseur des cellules)
- Un cycle énergétique à une faible consommation énergétique et un retour énergétique inférieur à un an.

Les cellules à base de silicium amorphe sont composées d'un ensemble de couches superposées comme suit :

1. Une couche dopée type P
2. Une couche non dopé (intrinsèque)
3. Une couche dopée type N

La couche intrinsèque aide à améliorer les caractéristiques des deux couches de semi-conducteurs en améliorant (agrandissant) le champ électrique qui permet la séparation des paires électron-trou.

Le domaine d'application des cellules solaires au silicium amorphe est varié tel que les modules souple qui peuvent être installés sur différents supports. Le rendement de cette technologie est faible mais il est compensé par la simplicité de la méthode de fabrication avec beaucoup moins d'étapes que dans le cas des technologies silicium classique. D'un autre coté, l'inconvénient majeur de cette filière est la dégradation des modules sous éclairement fort : instabilité de Staebler-Wronski

Des recherches très actives sont menées pour améliorer les performances de la filière.

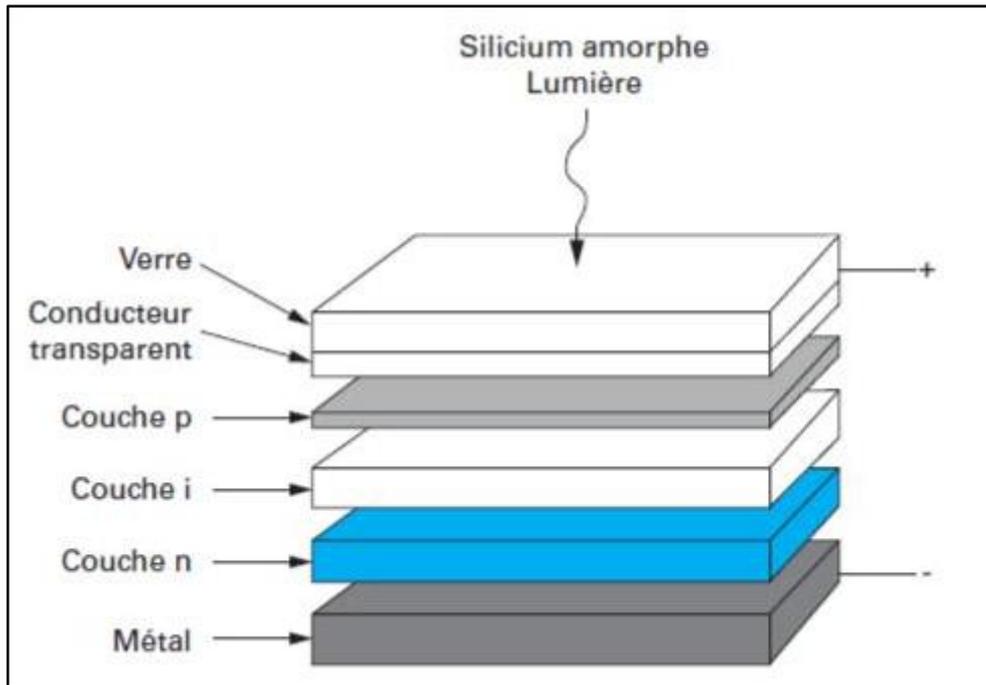


Figure I-17 Vue en coupe de l'empilement des couches du silicium amorphe [1.4].

Au début des années 2000 le silicium nanocristallin fait surface. Les recherches ont abouti à des modifications dans la méthode de fabrication et les conditions expérimentales pour avoir une cristallisation partielle des films : ce sont des couches composées de nano-cristaux de silicium cristallin dans une matrice de silicium amorphe.

Pour un rendement maximal, la couche de nano-cristaux est devenue la couche majoritaire pour bénéficier au maximum des propriétés du silicium cristallin ce qui a fait un progrès remarquable dans le domaine des couche minces.

Les recherches ont prouvé que les hétéro-structures à base du silicium amorphe et silicium nanocristallin ont un rendement de 12,4% à 13,5%. Le domaine de recherche sur cet axe reste très vaste. [1.4]

I.9.4 Cellules à base de tellure de cadmium

La technologie tellure de cadmium CdTe se base sur la jonction P-N mais par la mise en contact de deux matériaux semi-conducteurs différents ce qu'on appelle hétérojonction. En effet, la couche N est en semi-conducteur CdS, sulfure de cadmium, une grande bande interdite (2.4 eV) qui laisse passer la lumière : fenêtre des photons. Les photons sont alors facilement absorbés jusqu'à la couche P du semi-conducteur CdTe. Sachant que la valeur de la bande

énergétique interdite de CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire ce qui fait que la totalité du spectre est absorbé sur une profondeur de $2\mu\text{m}$.

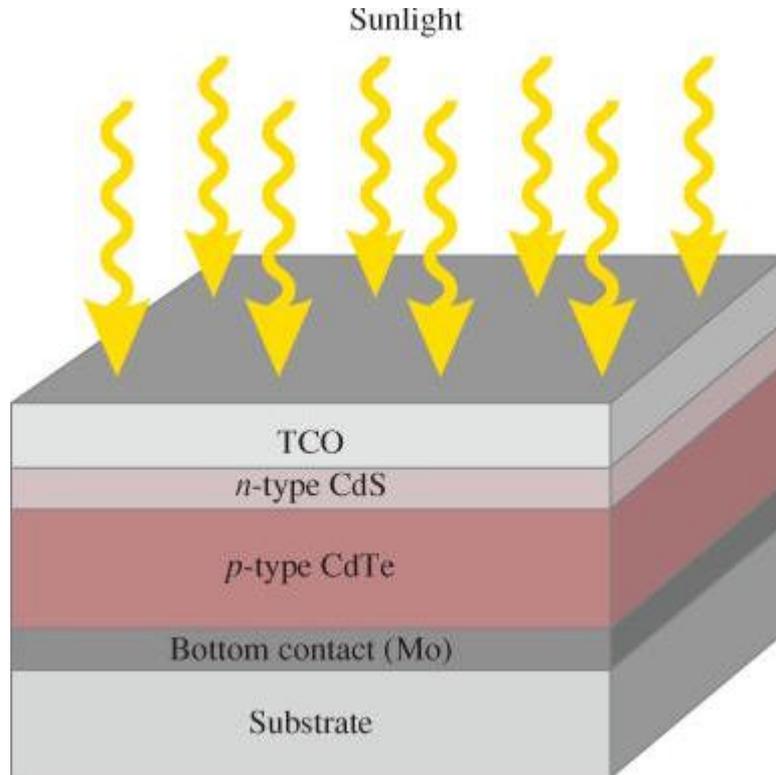


Figure I-18 Vue en coupe d'une cellule à base de CdTe.

Cette filière a connu un progrès remarquable depuis son lancement. Cela est dû à la simplicité de sa structure et sa méthode de fabrication ce qui diminue considérablement le coût de fabrication à 0,5\$ par watt-crête. [1.4] L'inconvénient de cette technologie est la toxicité du cadmium.

I.9.5 Cellules à base de sélénium de cuivre indium gallium :

Ce type de matériau a un coefficient d'absorption supérieur de 100 à 1000 fois que celui de silicium cristallin. Le disélénium de cuivre et d'indium est un matériau très prometteur avec une structure complexe qui rend la fabrication de ces couches plus complexe que celle de CdTe mais avec un rendement meilleur qui se situe autour de 25%.

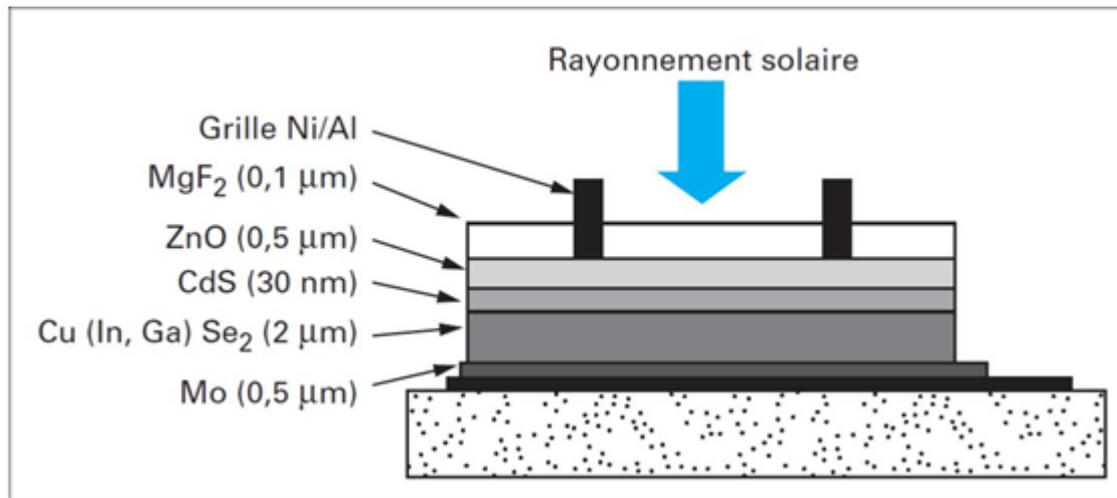


Figure I-19 Vue en coupe d'une cellule à base de Cu (In,Ga)Se [1.4].

Les chercheurs de cette filière s'orientent vers le développement des matériaux absorbeurs utilisant uniquement des éléments abondants. Il faudra encore des années de recherche intenses pour faire évoluer cette filière.

I.10 Les panneaux photovoltaïques :

Les caractéristiques électriques d'une seule cellule sont insuffisantes pour alimenter les équipements électriques. Il faut associer les cellules en série pour obtenir une tension plus importante et en parallèle pour obtenir un courant important. Les panneaux solaires sont composés d'une matrice des cellules solaires reliées en série ou/ et en parallèle selon le besoin.

Les modules photovoltaïque commercialisés sont constitué des ensembles de cellules photovoltaïques reliées en série, appelé string ou guirlande. A son tour un ensemble de strings sont reliés entre eux en parallèle afin d'avoir la puissance voulue.

Une fois l'assemblage terminé, le circuit électrique est placé entre deux couches d'éthylène-acétate de vinyle (EVA) ou de polyvinyle de butyral (PVB). Ces deux polymères sont à la fois transparents, non conducteurs de courant, très collants sous certaines conditions, imperméables à l'eau et résistants à la chaleur. Il assure l'isolation des cellules de leur environnement. Ensuite il est couvert d'un verre de qualité solaire. Il contient moins de fer qu'une vitre classique, pour permettre une meilleure transmission de la lumière

A ce stade Le module solaire n'est pas en mesure d'être utilisé. Il renferme toujours de l'air et l'encapsulation n'est pas parfaite car l'isolant (EVA ou PVB) n'est pas encore fortement lié

Chapitre I Généralités sur le photovoltaïque

aux divers constituants. Donc il subit une opération de laminations. A la fin de cette étape, une boîte de connexion et un cadre en aluminium sont monté sur le panneau et il est prêt à être utilisé.

II Chapitre II Refroidissement des panneaux photovoltaïques

II.1 Introduction et problématique :

II.1.1 Cout d'investissement et les avantages du photovoltaïque :

Il est devenu cruciale de penser à une source d'énergie propre et inépuisable, pour cela les différents types d'énergies renouvelables ont pris de l'importance ces dernières années notamment l'énergie solaire photovoltaïque.

La production photovoltaïque mondiale est estimée par 39,5 GW en 2010, 60,8 GW en 2011 et selon les perspectives elle devrait atteindre 345 GW en 2020. [1.28]

On prend l'exemple de l'Allemagne qui a pour objectif de porter la part des énergies renouvelables consommées à 50 % d'ici à 2030.

En 2009 l'Allemagne était le leader en énergie solaire avec une capacité de 3800MW après c'était l'Italie avec 700MW et le Japon avec 484MW, la Tchèque avec 411MW et en 5ème place USA avec 432. [2.40]

D'après Simon Cossus le directeur de la compagnie française Enercoop spécialisée en énergies renouvelables : « le photovoltaïque va devenir la source principale de l'électricité dans le monde, à l'horizon de 2050... »

En route vers la pérennisation du PV, la technologie devient de moins en moins cher, considérée comme une technologie mature et prête à être la source principale de l'énergie dans les prochaines années, d'après Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems dans une période de 10 ans le rendement de la technologie de silicium a augmenté de 9% à 17→21% sur le marché et de 45% en laboratoire.

Filières	Coûts de production en €/MWh (actualisation 8%)
Solaire thermique	195-689
Solaire photovoltaïque	114-547
Solaire thermodynamique	94-194
Eolien en mer	87-116
Eolien terrestre	62-102
Méthanisation	61-241
Biomasse	56-223
Géothermie	50-127
Hydroélectricité	43-188

Tableau II-1 Le cout de production des différents types

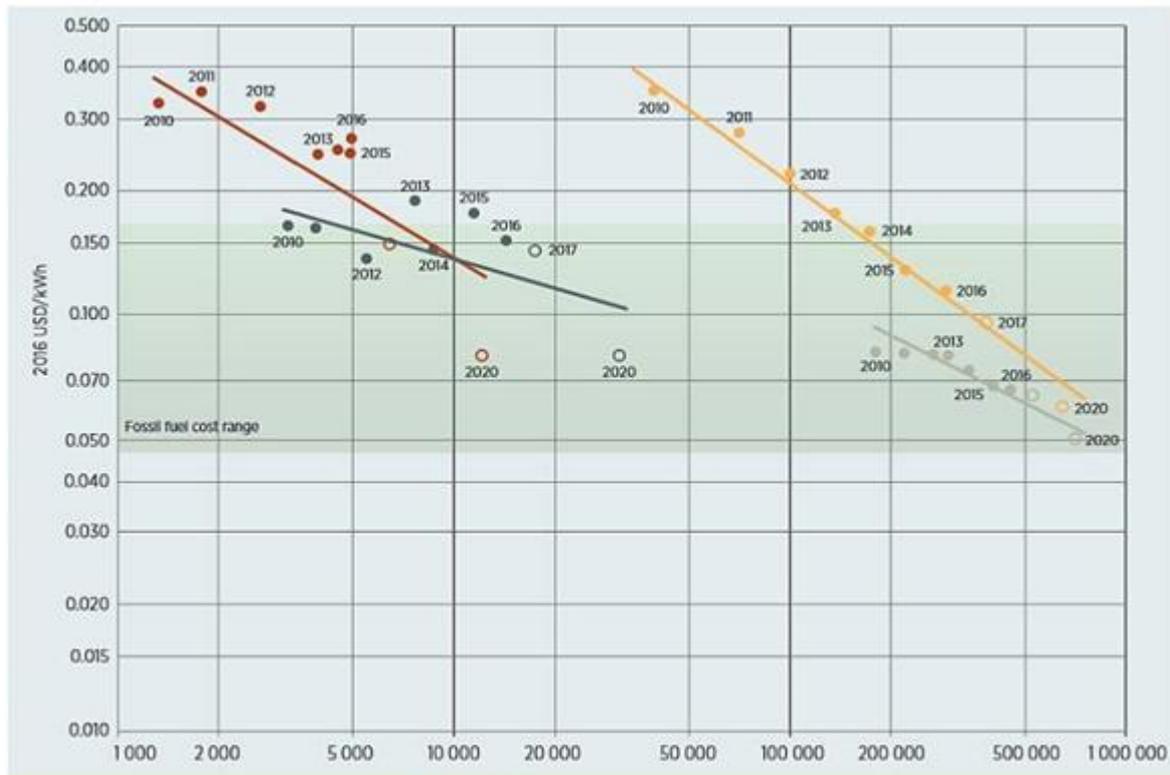


Figure II-1 La courbe du cout d'un kilowattheure photovoltaïque évolution dans 10 ans fait par [2.28]

L'agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) a déclaré que le prix des ER

Le tableau II.1 représente des statistiques faites en 2009, on constate que le coût du mégawattheure photovoltaïque était entre 114-547 €/MWh, le cout de production d'énergie renouvelable aujourd'hui est beaucoup moins cher. Il est estimé entre 3 à 10 dollars pour le

MWh suivant la technologie éolienne ou photovoltaïque par rapport au prix des énergies fossiles qui vaut 5→17 dollars pour le Mégawattheure (MWh). [2.29]

La courbe en jaune dans la figure II.1 représente l'évolution du coût de production d'un kilowattheure photovoltaïque, d'après cette courbe la fonction est décroissante, en une dizaine d'année le cout du kilowattheure photovoltaïque a diminué 5 fois par rapport à son cout initial de 0.35/KWh dollar en 2010 à 0.07 dollar/KWh en 2019. Grâce à cette forte diminution l'énergie photovoltaïque devient concurrentielle par rapport à l'énergie fossile. Nous pouvons remarquer ceci dans la figure II.1 par la zone ombrée « fossil fuel coast range » dont le coût est compris entre [0.049 0.152], cela permet de prévoir le coût dans les prochaines années. Par extrapolation vers l'année 2020 nous pouvons remarquer que le coût du kilowattheure photovoltaïque sera strictement moins cher par rapport à celui d'énergie fossile.

II.1.2 Le gisement solaire en Algérie :

De toutes les énergies renouvelables, le solaire photovoltaïque (PV) présente un intérêt particulier pour l'Algérie, puisqu'elle dispose d'un gisement solaire propice au développement de cette forme d'énergie.

Selon des statistiques récentes l'Algérie est l'un des pays les plus ensoleillés dans le monde. La carte solaire fournie par le CDER (centre de recherche et de développement des énergies renouvelables) montre l'insolation moyenne annuelle et la puissance reçue dans les différentes régions de l'Algérie. [2.22]

La figure II.2 montre l'insolation moyenne annuelle en Algérie, qui varie entre 11.87h en sud et 11.74h dans le nord du pays.

La figure II.3 représente la moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue par une surface horizontale en Algérie réalisée par CDER. Elle montre que les zones du sud algérien reçoivent une puissance supérieure à 6900wh/m^2 , la plus faible puissance reçue est marquée dans le nord algérien, elle varie entre 4700 et 4900Wh/m^2 .

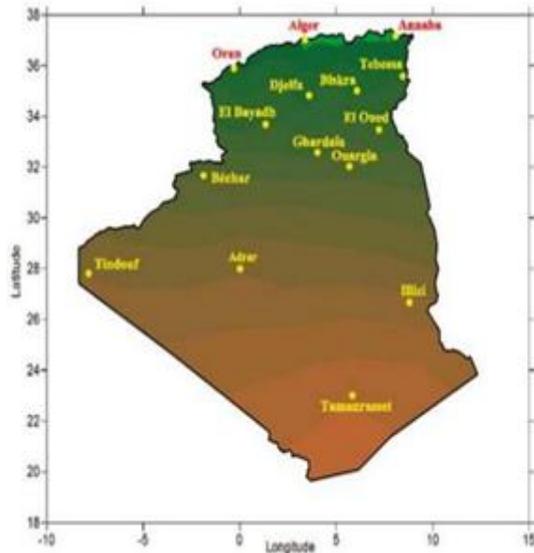


Figure II-2 La moyenne annuelle d'insolation calculée cas d'un ciel totalement dégagé CDER [2.22]

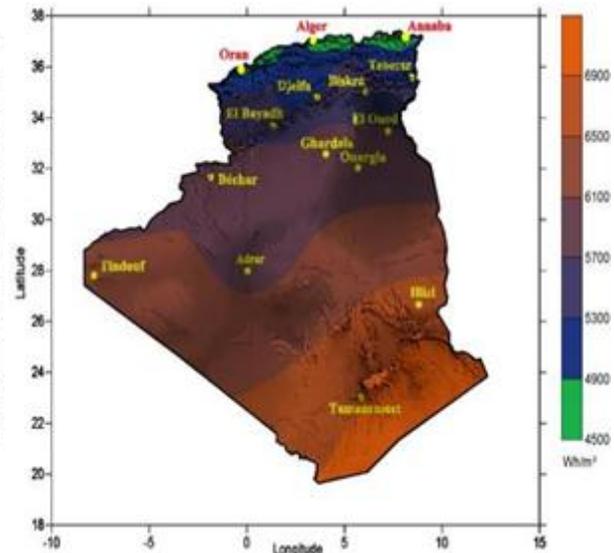


Figure II-3 La moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue par une surface horizontale-CDER [1.22]

« La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les **2000 heures** annuellement et peut atteindre les **3900 heures** (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de $1m^2$ est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700KWh/m^2/an$ au Nord et $2263 kWh/m^2/an$ au »

[2.8]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m2/an)	1700	1900	2650

Tableau II-2 les valeurs de l'insolation et l'énergie

D'après le tableau II.2 l'Algérie dispose d'un énorme potentiel en énergie solaire, en termes de puissance reçue et d'insolation moyenne annuelle. Cela est dû à la position géographique. On peut évidemment conclure que l'Algérie est qualifiée pour adopter de grands projets en énergies solaire photovoltaïque et en solaire thermique. .

II.1.3 Les installations PV en Algérie :

II.1.3.1 La distribution des centrales photovoltaïques en Algérie :

Les prévisions pour l'énergie solaire en Algérie ont mis pour but d'atteindre les 2600Mw à l'an 2020 pour le marché national avec une estimation d'exportation d'une puissance de 2000Mw. Actuellement la capacité installée est de 384Mw étalée sur 23 centrales tout au long du territoire algérien [2.39]

Nom de la centrale	Type de la centrale	Localité	Puissance
Oued Kebrit	Photovoltaïque	Souk Ahras	15 MWe
El Hadjira	Photovoltaïque	Touggourt	10 MWe
Ain El Melh	Photovoltaïque	M'Sila	20 MWe
Ain El Bel	Photovoltaïque	Djelfa	20 MWe
Ain Skhouna	Photovoltaïque	Saida	30 MWe
E.B.S Chikh	Photovoltaïque	El Bayadh	24 MWe
Telga	Photovoltaïque	Tlemcen	12 MWe
Naama	Photovoltaïque	Naama	20 MWe
Kaberten	Photovoltaïque	Sud Algérie	03 MWe
Kaberten	Eolienne	Sud Algérie	10 MW
Timimoune	Photovoltaïque	Sud Algérie	09 MWe
Ain Salah	Photovoltaïque	Sud Algérie	05 MWe
Aoulef	Photovoltaïque	Sud Algérie	05 MWe
Reggane	Photovoltaïque	Sud Algérie	05 MWe
Z.Kounta	Photovoltaïque	Sud Algérie	06 MWe
Adrar	Photovoltaïque	Sud Algérie	20 MWe

Tableau II-3 Les centrales photovoltaïques les plus importantes en Algérie avec la capacité de chacune [1.29]

A part la centrale solaire pilote de Ghardaïa (1,1 MW). Il y a aussi 22 stations électriques solaires d'une capacité de 343 MW dans 14 wilayas, dont 270 MW sont déjà en service et raccordées au réseau de distribution à deux niveaux 30 et 60KV. [2.30]

Il existe d'autres centrales comme la centrale de **BirRebaa**, à Ouargla conçue pour alimenter le champ pétrolier dans cette région. Elle contient 31 320 panneaux photovoltaïques avec une capacité de production de 18 GWh/an d'énergie électrique.

La wilaya de Ouargla est considérée parmi les endroits les plus chaud dans toute l'Afrique en été 2018 l'ONM a enregistré 51.3C° qui était la plus grande valeur de température enregistrée



Figure II-4 Cartes de la distribution des centrales photovoltaïques les en Algérie, SONALGAZ

D'après le tableau II.3 et la figure II.7 on remarque que plus que la moitié de ces centrales sont localisées dans le sud algérien qui est considéré parmi les endroits les plus chaud au monde

II.1.3.2 Les conditions climatiques en Algérie

D'après Wikipédia l'Algérie possède deux types de climat principaux, au nord un climat méditerranéen au sud un climat désertique, avec des climats de transitions comme le climat semi-aride, mais en générale l'Algérie est classifiée comme une zone chaude et sèche.[2.23]

Dans cette partie nous allons prendre trois wilayas de l'Algérie chacune appartient à une région différente, évidemment le type de climat sera aussi différent. Nous allons beaucoup plus nous concentrer sur la température moyenne mensuelle présentée dans les tableaux suivants :

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Min (°C)	6	6	7	9	12	16	19	20	18	14	10	7
Max (°C)	17	17	19	21	24	28	31	32	30	26	21	18
Heure ensoleillées	4	6	7	8	10	10	11	10	9	6	5	5

Tableau II-4 Les valeurs de la température moyenne min et max et les heures ensoleillées sur la wilaya d'Alger[2.23]

Le tableau II.4, représente les températures moyennes Max et les heures ensoleillées sur Alger. On remarque que la température Max moyenne dépasse les 25C° dans 5 mois de l'année.

On constate bien que les heures ensoleillées sont de 10h ou plus à partir du mois de mai jusqu'à septembre ce qui est considérable comme gisement au nord dupays.

Remarque :

Les températures marquées au nord sont inférieures aux celles-ci du sud n'empêche que le réchauffement des modules PV dans cette zone est très important dès que la température ambiante dépasse les 25C° et c'est ce que nous avons bien remarqué dans les mesures que nous avons fait sur le site de Tlemcen. (Voir chapitre III)

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Min (°C)	7	9	11	15	19	24	27	27	23	18	12	8
Max (°C)	17	19	23	26	31	37	40	40	34	28	22	18

Tableau II-5les valeurs de la température moyenne min et max sur la wilaya de Biskra [2.23]

D'après le tableau II.5 les températures moyennes Max dans la wilaya de Biskra dépasse les 25 C° pendant 7 mois de l'année, pour cela elle est considérée parmi les endroits les plus chauds en Algérie.

Mois	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Min (°C)	6	8	11	16	20	26	28	27	25	18	11	7
Max (°C)	20	23	28	33	37	43	45	43	40	34	26	21
Heure ensoleillées	9	9	11	11	11	12	12	12	11	10	9	8

Tableau II-6 les valeurs de la température moyenne min et max et les heures

Dans le tableau II.6 on voit bien que In Salah dispose d'un gisement solaire très important car l'heure ensoleillée dépasse les 10h à partir du mois de mars jusqu'au mois d'octobre. La température maximale dépasse les 25C° pendant 9 mois de l'année.

D'après l'Office National de Météorologie (ONM) dans un article publié par la radio algérienne en 22/07/2018 nous citons :

« Des températures maximales atteignant ou dépassant localement 48°C ».

« La hausse de température qui dépasse par endroits les 50°C »

« Dès le matin, relate-t-il, le soleil pointe à l'horizon, même la nuit il fait chaud. Les ventilateurs impuissants ne servent à rien, mais les plus démunies devraient s'en contenter avec **plus de 65 degrés**, la chaleur n'arrête pas de chauffer les crânes et le bitume, même les animaux la supportent difficilement. La facture de l'électricité sera salée cette année et les habitants d'Adrar demandent son annulation »

« Une semaine plus tôt, cette dernière localité avait enregistré un record de 54 °C à l'ombre et 65 °C au soleil... pour une température maximale de 46 °C en moyenne.

L'ONM a marqué en 2017, 6 périodes de canicules dans le mois de juillet seulement. Une période de canicule est une succession de 6 jours ou plus où la température atteint des valeurs plus que la température normale de 5C° au minimum » fin de citation

Les panneaux photovoltaïques sont conçus pour fonctionner à une température de cellules de 25 °C. En réalité la température du panneau dépasse largement cette valeur. Lorsqu'un panneau sera exposé au soleil le rendement de conversion de l'énergie rayonnante en électricité est très faible par rapport au pourcentage de l'énergie qui sera réfléchi ou dissipé sous forme de chaleur. Pour cela la température du panneau augmente rapidement même avec une température ambiante de 25°C,

Pour un panneau photovoltaïque, on trouve les indications suivantes sur la plaque signalétique :

Conditions de mesures NOTC (Normal Operating Thermal Conditions) :

- Température ambiante : 25 °C
- Irradiance solaire : 1000 W/m²
- Vent : 1 m/s, refroidissement des deux faces par convection naturelle.
- Température de cellules : 47 +/- 2 °C

D'après les tests que nous avons fait sur le site de Tlemcen qui est situé au nord-ouest de l'Algérie, durant le mois d'avril avec une température ambiante de 23°C, celle du panneau a atteint 46°C et dans le mois de juin à une température de 27°C la température du panneau a atteint 63°C cela est après deux heures d'exposition au soleil. La température sur le site de Tlemcen peut atteindre 47°C donc la température du panneau pourrait dépasser les 83°C.

Le vent de 1 m/s n'est pas toujours présent, et le refroidissement s'en ressent, surtout pour une installation intégrée, très mal aérée en dessous. La température des cellules peut facilement atteindre 100 °C [2.41]

Sur la base de ce qui a été présenté, nous avons conclu que l'Algérie reçoit une quantité d'énergie rayonnante très importante. Cette énergie est associée avec des températures très élevées, soit pour le nord ou pour le sud les conditions de température ne sont pas favorables pour le fonctionnement optimal d'un panneau PV.

II.1.4 L'impact de la température sur les panneaux PV :

L'étude des performances d'un panneau PV à haute température pourra se faire par des tests de température dans des endroits chauds (les milieux désertiques), ou bien par des protocoles expérimentaux dans le laboratoire (des projecteurs lumineux) et aussi par des logiciels de simulation comme (Matlab, SCAPS...).

Dans les paragraphes suivants nous allons présenter quelques travaux de recherche qui ont prouvé que la température provoque une diminution considérable du rendement des cellules photovoltaïques. Dans le dernier chapitre nous allons effectuer des expériences réelles et aussi par projecteurs lumineux pour confirmer l'effet de la température sur la performance des panneaux PV.

Par la suite nous allons découvrir d'autres effets de la température à part la chute du rendement. (Le vieillissement, le stress mécanique ...)

II.1.4.1 L'impact de la température sur un panneau photovoltaïque de type monocristallin

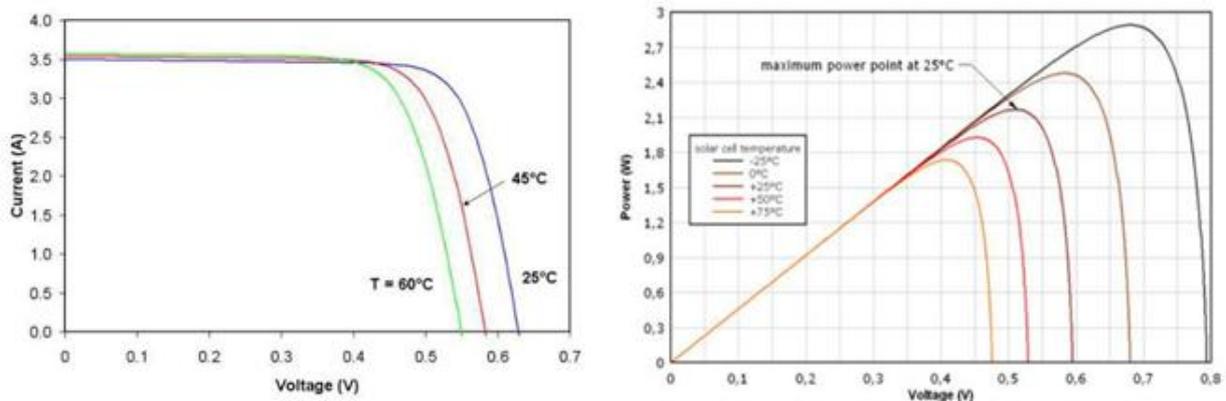


Figure II-5 La caractéristique I-V et P-V d'une cellule monocristalline [1.30]

D'après la figure II.5 qui représente la caractéristique courant tension I-V et puissance tension P-V d'une cellule monocristalline, on perçoit que pour une température de 60°C la tension donnée par cette cellule chute de 0.68V à 0.54V. La représentation graphique de la puissance en fonction de la tension indique aussi que la puissance d'une cellule photovoltaïque de type monocristallin démunie de 2.2W jusqu'à 1.65W à 75°C

Dans la data-sheet d'un panneau de type monocristallin on trouve le coefficient de température de courant qui a la valeur de +0.05% /C°, la valeur positive signifie que le courant augmente avec la température, ce qu'on constate dans la figure II.5(a).

Par contre le coefficient de température de tension est de -0.34%/C°, la valeur négative indique que la tension diminue avec l'augmentation de la température, comme on voit dans la figure II.5(b).

D'après ce qu'on a vu dans les paragraphes précédents, la température influence directement sur la caractéristique I-V de la cellule photovoltaïque à base de silicium monocristallin, dont elle provoque une chute significative de tension et donc une chute de puissance.

II.1.4.2 L'impact de la température sur les panneaux photovoltaïques poly cristallins

Pour une cellule polycristalline, le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température or que la tension diminue d'une façon significative. La température a un effet remarquable particulièrement sur la tension, dont elle provoque une chute considérable. La puissance maximale diminue si la température du panneau augmente.

II.1.4.3 La problématique :

Le marché mondial notamment le marché algérien est dominé à plus de 80% par des modules photovoltaïques à base de silicium,

Le silicium est un matériau caractérisé par

- La stabilité.
- La bonne qualité du cristal
- La Non toxicité
- La band gap est parfaite pour la conversion photovoltaïque ($E_g=1.11$ eV)

Tous ces avantages lui a permis d'être la base des cellules les plus utilisées dans le monde entier. En contrepartie elles ne résistent pas les températures élevées, lorsqu'un panneau se réchauffe, il perd sa fiabilité. D'après une étude expérimentale la densité de puissance d'une cellule monocristalline a diminué de 43.4 à 36.32 mW/cm² et pour le poly-cristalline de 48.76 à 41.88mW/cm² pour une température de 10 à 50 C°. [1.9]

La cellule photovoltaïque convertit l'énergie radiative en énergie électrique avec un rendement compris entre 5 et 16 %. D'après « Photovoltaic Reportss, Fraunhofer Institute for Solar energy Systems » c'est un petit pourcentage qui sera transformé en électricité, la majorité de l'énergie radiative sera réfléchi ou bien dissipée sous forme de chaleur. En absence de toute sorte de refroidissement la température du panneau augmente rapidement.

D'après Abd-Elhadye et al (2018) [1.8], la chute de rendement des panneaux PV en silicium cristallin pourrait atteindre 25%.

D'après Francis Domain, et Hervé Boileau, [1.11]

***La formule pour calculer la puissance crête du panneau est la suivante :**

$$P_c (W_c) = S(m^2) * R * 1000W/m^2 \quad (R \text{ est le rendement du module})$$

***La formule pour calculer la puissance crête du panneau pour une irradiation variable :**

$$P_e (W) = P_c (Wc) \cdot Irrad (kW/m^2)$$

***La formule qui permet de calculer la puissance électrique à une température et irradiation variable :**

$$P_e = P_c(Wc) \cdot Irrad(KW/m^2) \cdot (1 - (T-25) \cdot Coef_{tp})$$

***la formule pour calculer le rendement d'un panneau photovoltaïque :**

$$\eta_{PV} = \eta_{PV, T=25} (1 - \beta [T - 25^\circ C])$$

Où β représente le coefficient de température indiqué sur la datasheet d'un panneau PV, il varie suivant la technologie adoptée. (Monocristalline, polycristalline...)

Par exemple :

Pour un panneau de type polycristallin de puissance crête 110.Wc, à une température de 60C° :

Sous une irradiance de 1000 W/m² produira une puissance électrique P_e de :

- $P_e = 110.1 \cdot (1 - (60-25) \cdot 0,0043) = 88.0871 = 76,65 \text{ W}$
- Le rendement à 60C° :

Selon Swapnil Dubey et al [1.24], la courbe qui décrit la diminution de la tension et de la puissance d'un panneau en fonction de la température est linéaire. Donc la température est une condition essentielle pour le bon fonctionnement des modules PV.

II.1.5 Le phénomène à l'échelle microscopique :

Comment le rayonnement solaire peut-il augmenter la température de la surface d'un panneau photovoltaïque ? et pour quoi l'augmentation de la température provoque-t-elle une chute de la tension ?

Le transfert de la chaleur par rayonnement :

Le transfert de la chaleur par rayonnement est un mode de transfert de l'énergie qui ne nécessite pas l'existence de la matière. En d'autres termes, elle se propage dans le vide sous forme d'une onde électromagnétique, comme le cas du rayonnement solaire. Au sien d'un panneau photovoltaïque une partie de l'énergie rayonnante est transformé en électricité par l'effet photovoltaïque et une partie est réfléchié et une autre partie est transformée en énergie thermique (chaleur) par agitation des particules. Par conséquent la température de la surface du panneau augmente.

« Un certain pourcentage de photons pénètre la cellule parfaitement, mais ne sert qu'à augmenter l'agitation thermique (l'échauffement) et donc la température de la cellule »
[1.31]

Dans un article réalisé par A.G. Imenes, D.R. Mills publié en 2004 [1.4], le réchauffement de la surface d'un capteur PV est expliqué par le comportement des photons vis à vis la bande interdite. Les photons situés sous l'énergie de la bande interdite traversent la zone active de la cellule sans être absorbés, et se dissipent sous forme de chaleur dans l'autre partie de la cellule. Les photons d'une énergie plus grande que la bande interdite ne peuvent être utilisés que partiellement, le reste de leur énergie est également dissipé sous forme de chaleur.

II.2 Les travaux antérieurs de refroidissement des panneaux photovoltaïques :

II.2.1 Les technologies de refroidissement

Tout système de puissance doit être doté d'un dispositif de refroidissement. Notamment les panneaux PV. Pour éviter la dégradation de ses performances qui est principalement dû à l'augmentation de la température, beaucoup de systèmes ont été développés pour diminuer la température du panneau photovoltaïque.

Les systèmes proposés se divisent en deux types :

- Des systèmes actifs
- Des systèmes passifs

II.2.1.1 Les systèmes passifs pour le refroidissement des panneaux PV :

Cette catégorie inclut les systèmes qui ne consomment pas d'énergie pour refroidir le panneau, tenant comme exemple :

a) *Le refroidissement par trous :*

Cette méthode a prouvé son efficacité par des travaux de recherche réalisés par M.S. Abd-Elhady et al [1.19], ils ont trouvé qu'à une température de 75°C le panneau perd 25% de son rendement, surtout au nord de l'Afrique et dans les pays du golfe. Le refroidissement se fait par convection naturelle entre l'air ambiant et les cellules PV. Les trous sont localisés dans les zones neutres du panneau (ne contiennent pas de cellule PV), évidemment le nombre et le diamètre de ces trous influent sur la qualité du refroidissement.

Ils sont arrivés à atteindre une différence de 8°C qui est équivalente à 8% de l'efficacité. Les valeurs maximales sont enregistrées à midi avec une différence entre le panneau troué et le

panneau non troué est de 13C°. Ils ont remarqué que la température du panneau diminue de 66C° jusqu'à 53C°.

Number of holes	Holes density= Number of holes Panel's area	Average Temp. T	Decrease in Temp., ΔT = T _{noholes} - T _{holes}
0 (No holes)	0	70°C	0°C
3	11.5 hole/m ²	58°C	12°C
6	23 hole/m²	54°C	16°C
9	34.5 hole/m ²	52°C	18°C
12	46 hole/m²	51°C	19°C

Tableau II-7 Les résultats expérimentaux des panneaux troués[1.19]

Le tableau II.7 représente des valeurs expérimentales qui prouve que les trous contribuent à diminuer la température des panneaux on remarque que de plus la densité des trous est élevée de plus la température diminue.

b) La limitation de la surchauffe d'un panneau PV par un séparateur de faisceau :

Cette méthode est aussi passive. Elle se base sur l'un des caractéristiques de la technologie de silicium. D'après ce que nous avons détaillé dans les paragraphes précédents, les panneaux en silicium n'absorbent pas tout le spectre solaire, il n'y a qu'une seule partie du spectre (la partie visible du spectre) qui sera absorbé par le capteur et donc contribue à la production de l'électricité c'est la partie opérationnelle du spectre.

Cette approche consiste à scinder le spectre solaire à l'aide d'un séparateur de faisceau, et donc elle laisse passer que la partie du spectre qui contribue à l'effet photovoltaïque l'autre partie sera éliminer avant d'atteindre la surface du panneau.

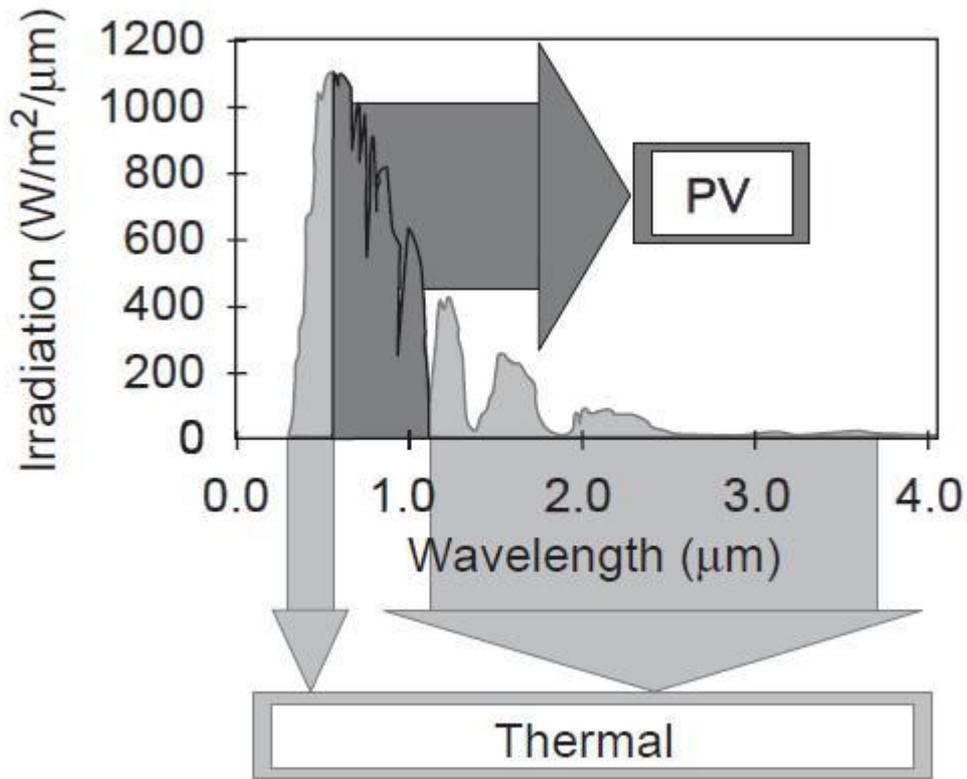


Figure II-6 Courbe qui représente la séparation du spectre solaire en partie PV et une partie thermique [1.4]

On voit dans la figure II.2 que la partie thermique du spectre est plus grande que la partie photovoltaïque. Cela explique le réchauffement rapide des panneaux PV, or que cette partie du spectre sera très utile avec l'intégration d'un concentrateur thermique donnant ce qu'on appelle un système hybride PVT. [1.2]

c) La régulation thermique du module PV par un matériau de changement de phase MCP :

Le but de l'utilisation d'un matériau à changement de phase (MCP) intégré aux modules PV est de maintenir leurs températures proches de la température ambiante. Le principe c'est d'absorber l'excès de chaleur par le MCP jusqu'à ce qu'il se fonde (par exemple : le sel la paraffine ...). Le prototype expérimental a été conçu par Huang et al, ou ils ont fait une étude numérique validée expérimentalement. Ils ont conçu une unité de refroidissement d'un panneau PV en utilisant un MCP dans une enceinte rectangulaire,

Les essais expérimentaux de ce système derrière un PV ont trouvé des résultats encourageants : sa température est maintenue à 36°C pour 150 min pour la configuration sans ailettes et à 30°C pendant 150 min pour une configuration à quatre ailettes, sous un flux de chaleur de

750 W/m², et une température ambiante de 20°C. Et à une température ambiante de 25°C avec un rayonnement de 1000W/m². La température du module est maintenue à 40°C pendant 80min, avec un MCP de température de fusion de 32°C. Les ailettes sont ajoutées pour bien répartir le flux de chaleur. Le nombre des ailettes est un paramètre important, de plus en augmente le nombre des ailettes de plus le système est efficace. Le type de MCP aussi joue un rôle primordial dans cette technique, des travaux de recherche ont varié le type de MCP ils ont marqué une température minimale de 10°C avec un rayonnement de 1000W/m² pendant 5 heures

Cette méthode a prouvé son efficacité mais elle reste encore derrière les portes des laboratoires.

II.2.2 Les systèmes actifs pour le refroidissement des panneaux PV :

II.2.2.1 *Le refroidissement des panneaux PV par un collecteur thermique :*

Le refroidissement par collecteur thermique est une technique efficace, à double bénéfice. Elle permet d'obtenir une énergie thermique et électrique, mais elle est coûteuse. Car chaque panneau doit être doté d'un collecteur thermique en arrière. Le problème du réchauffement des panneaux PV à été posé bien longtemps par des chercheurs qui ont développé des systèmes hybrides solaire thermique. Martin Wolf [1.26], a abordé en 1976 la première étude concernant le photovoltaïque thermique PV/T. Cette étude a été suivie par une série d'autres études qui entament toujours le PV/T.

Entre le PV/T et le refroidissement des panneaux PV il y a une légère différence, c'est la récupération de la chaleur retirée des panneaux PV sous forme d'eau chaude sanitaire. L'installation des systèmes PV/T est considérée même ces jours-là trop chère, pour cette raison on préconise d'améliorer le rendement des panneaux PV par des systèmes de refroidissement bien adaptés aux besoins. [1.14]

II.2.2.2 *Le refroidissement par pulvérisation d'eau de panneau :*

Cette méthode est aussi à double bénéfice elle assure à la fois le nettoyage et le refroidissement. Parmi les travaux on cite :

II.2.2.2.1 *Le système de Suni-Brain*

En France, il y a une société qui a commercialisé le système et l'installe chez les clients qui ont tous remarqué une amélioration des performances. Cette société s'appelle SUNI Brain, est

Chapitre II Refroidissement des panneaux photovoltaïques

une start-up française. Elle a fait des études qui montrent que le panneau peut atteindre une température de surface de 100°C (ceci est en France), sans aucun système de refroidissement les conditions extrêmes provoquent un stress mécanique aux cellules photovoltaïques. Ce système non seulement assure un rendement optimal par refroidissement et nettoyage mais aussi permet l'allongement de la durée de vie des panneaux photovoltaïques. Ce système est breveté dans 30 pays.

Le principe de fonctionnement est de faire circuler l'eau en traversant la surface du panneau grâce aux pompes et des arrosoirs revenant au réservoir de stockage (cycle fermé). Cette circulation de l'eau de pluie récoltée est effectuée avec le minimum l'énergie.

Le système de SUNI Brain est un système totalement autonome (système automatisé), suit 4 étapes :

- La récolte de l'eau de pluie
- Le stockage de l'eau de pluie dans un réservoir de stockage
- Arrosage des panneaux en cas de besoin

Enregistrement des données pour des futurs travaux de maintenances Ce système a pu assurer une augmentation du rendement avec $20 \rightarrow 25\%$.

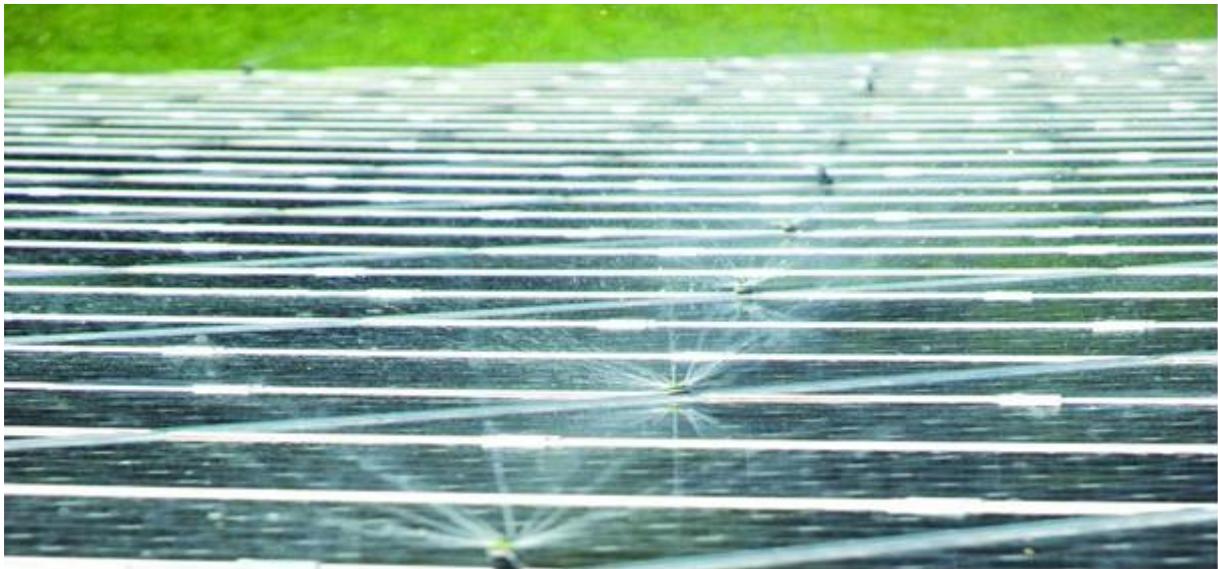


Figure II-7 Système de refroidissement SUNI Brain par arrosage

II.2.2.2.2 Le système de refroidissement conçu par le CDER.

Parmi les systèmes de refroidissement déjà existant, on a le système de refroidissement et de nettoyage réalisé par une équipe de recherche en Algérie : Mohamed Fathi et al. [1.20]

Le prototype conçu à l'Unité de Développement des Energies Renouvelables de Bousmail, EPST CDER, assure la circulation de l'eau sur la totalité de la surface de la face avant du panneau photovoltaïque. Cette dernière est faite avec une pompe de 12V contrôlée par une armoire électrique et cela en fonction de la température. Le système est muni d'un régulateur de charge pour gérer et sécuriser le stockage de l'électricité dans la batterie de 150 Ah. Pour éviter le dépôt d'une couche de calcaire ou autre, un filtre est installé avec un réservoir de 12L d'eau distillée. Une matrice de thermocouple est installée sur le panneau pour surveiller en permanence l'évolution de la température. Les données de températures sur la face avant et arrière sont stockées dans l'ordinateur.

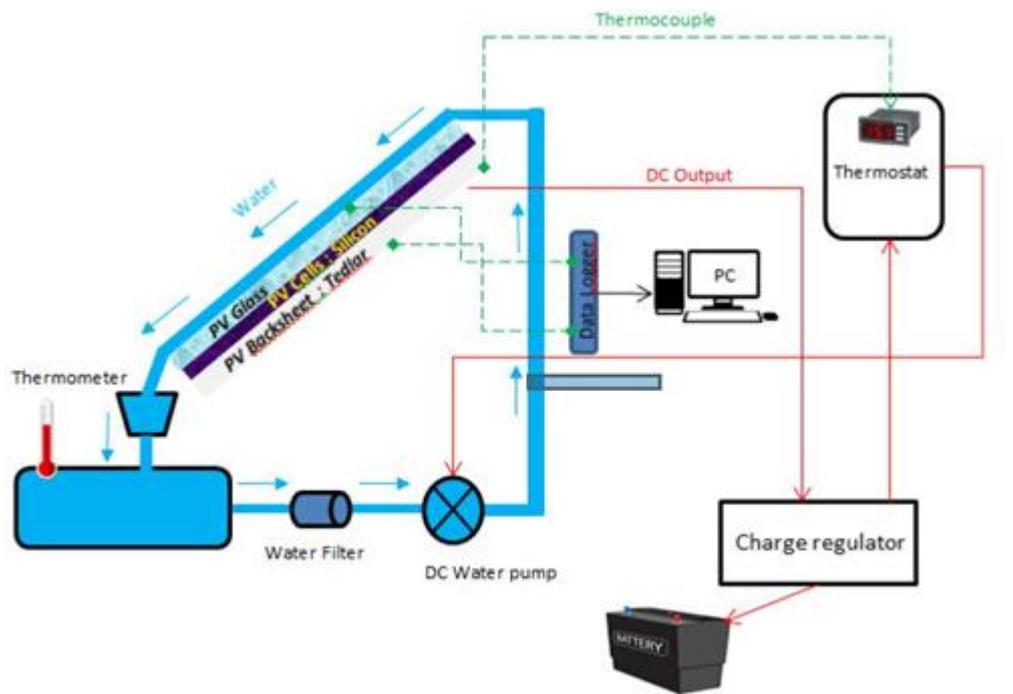


Figure II-8 Un schéma descriptif du système conçu par CDER

- Le panneau utilisé : 150W de 1.08m^2 référence PS-M605-150 son constructeur Philadelphia Solar company.
- La pompe utilisée : pompe DC 12V Santoprene@diaphragm, référence 8000-443-136 avec une puissance de 38,4 W

L'expérience est faite durant une journée d'été où l'irradiation moyenne de $870\text{W}/\text{m}^2$. Après 40min d'exposition, la température augmente jusqu'à 70°C sur la face avant. Le cycle de refroidissement adopté est de 30 min durant lequel la circulation d'eau est de 6min. Il permet d'abaisser la température la face avant jusqu'à 40°C et la stabilisée. Après 24min la pompe se réactive.

Durant le cycle de refroidissement, le rendement a augmenté de 2%. Le surplus de l'énergie produite couvre la consommation de la pompe qui sera commune entre un string de panneaux PV. Le gain quantifié entre un panneau refroidi et chauffé est de 15W.

Ce premier prototype a pour but d'optimiser le refroidissement qui engendre une baisse de l'énergie consommée par la pompe

II.3 Les avantages du refroidissement des panneaux PV :

Depuis que la technologie des cellules solaires cristallines à base de silicium a pris sa place dans le domaine de production de l'énergie propre, plusieurs défis sont apparus, non seulement en termes de coût et de rentabilité des systèmes installés, mais aussi la durée de vie des modules et ses performances dans les différentes conditions météorologiques. En revanche les chercheurs ainsi que les ingénieurs ont été mis devant des challenges pour améliorer l'exploitation de ces systèmes pour augmenter le rendement et la durée de vie.

La température élevée entraîne sur la durée un vieillissement prématuré. Il est donc essentiel d'aérer les panneaux pour apporter un surplus de refroidissement par convection. On peut réduire ainsi la température de 20%, à condition qu'il y ait un peu de vent.

Dans les régions très ensoleillées, les cellules subiront des conditions beaucoup plus sévères que celles qui sont décrites dans les notices.

Les cellules PV sont montées dans un cadre qui permet la circulation d'un fluide de on peut adopter soit des systèmes de refroidissement par l'air, ou par l'eau, pour assurer :

- ⇒ Abaissement de la température des cellules.
- ⇒ Augmentation du rendement électrique.
- ⇒ Prolongation de la durée de vie.
- ⇒ Et parfois le nettoyage de la surface.

Les installations photovoltaïques actuelles n'utilisent que 10 % de l'énergie reçue. La technologie hybride permet de porter ce rendement à plus de 50%, et donc d'optimiser l'utilisation de surface tout en garantissant la fiabilité.

II.3.1 Ralentissement du vieillissement des panneaux photovoltaïques :

Les tests effectués en sortie de l'usine servent à éliminer les pièces défectueuses mais ils ne donnent pas des informations bien précises sur la durée de vie. Ils existent différents types de tests parmi :

- Les tests qui assurent que le module satisfait les normes.
- Des tests de vieillissement accéléré.

Les normes mondiales et les règles de l'art disent qu'un semi-conducteur de puissance doit être muni d'un système de refroidissement pour maintenir la température de la jonction à une valeur bien déterminée. Les panneaux photovoltaïques sont des systèmes qui reçoivent une puissance de 1000W/m^2 , dans les zones chaudes comme l'Algérie la puissance reçue atteint les 1043W/m^2 (mesurée sur le site de Tlemcen). Environ 16% sera transformé en puissance électrique utile, et l'autre partie sera dissipée sous forme de chaleur. En absence d'un système de refroidissement cette chaleur va contribuer à l'augmentation de la température.

La certification des panneaux PV se fait après avoir effectué des tests de vieillissement accélérés.

Le mécanisme de dégradation des modules PV est soumis aux plusieurs facteurs, principalement la température et l'humidité.

Pour prolonger la durée de vie d'un module PV, il faut assurer

- Le bon entretien.
- Rapprocher les conditions de fonctionnement le maximum aux conditions standards de fonctionnement STC (température, humidité, rayonnement ...)

Les technologies qui interviennent dans la conception d'un panneau PV lui rendent un objet de haute technicité ce qui exige des conditions de fonctionnement critiques. En sortant de laboratoire, les panneaux PV sont exposés à des conditions extrêmes de la nature, comme :

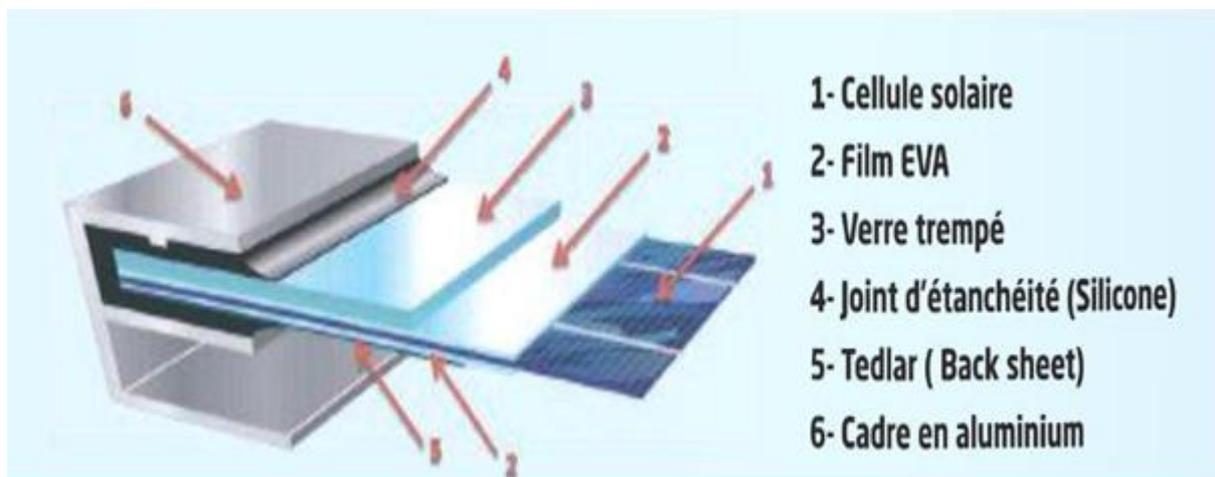
Pluie, neige, grêle, poussières abrasives, embruns salés, pluies acides, rayons UV, ammoniac (milieu agricole), chocs, corrosion.

Les panneaux PV fonctionnent dans des températures extrêmes des milieux désertiques avec une valeur qui dépasse les 49C° ambiante, sans aucun dissipateur thermique. Au long de 25 ans de fonctionnement il y a 9000 alternances jour/nuit, avec un écart de température important (20C° à 23C°) à chaque cycle de température la surface du panneau subit des

contraintes de dilatation de **plusieurs millimètres**. Ce régime dure sur toute la durée des 25 ans pénalise la fiabilité du produit et le fragilise, ce qui implique le dysfonctionnement du module et lui empêche de donner une puissance optimale.

Le vieillissement des modules photovoltaïques se traduit par différents types de dégradations. Ces dégradations touchent les différentes parties constitutives d'un panneau PV :

- Le verre
- Les matériaux d'encapsulation (EVA, thermoplastique),
- La cellule en silicium, les matériaux réflecteurs à l'arrière de la cellule (aluminium et Tedlar par exemple),
- Les collecteurs de charges et la feuille en polymère résistant à l'arrière. (Barresbus)



La dégradation touche les parties que nous avons citées avant et elle peut apparaître sous forme de :

- Jaunissement de l'encapsulant
- Délamination
- Bulles
- Corrosion (hot spots)
- Fissuration
- Stresse mécanique
- Court-circuit au niveau d'une cellule.
- Claquage par formation d'arc électrique.
- Craquage de la plaquette de Si (contraintes de dilatation).
- Délaminage des couches de protection.

- Détérioration d'une ou plusieurs diodes de by-pass.
- Hotspot.
- Jaunissement ou brunissement du matériau d'enrobage (EVA ou autre).
- Détérioration du traitement anti-réflexion.
- Pénétration d'humidité ou de moisissure.
- Corrosion électrochimique.
- Surchauffe (mauvais refroidissement).
- Claquage du verre de protection (contrainte de dilatation suite à mauvais montage).
- Détérioration des contacts électriques par corrosion.

Le système de refroidissement sert principalement à diminuer la température des cellules, donc évidemment les pannes qui sont reliés à la température deviennent moins fréquentes, on peut dire que la température influe directement sur les performances des cellules photovoltaïques.

II.3.2 Le nettoyage des panneaux :

Le nettoyage peut se faire dans le cas de refroidissement des panneaux PV en face avant par un jet d'eau. Le nettoyage périodique est nécessaire car l'accumulation de la poussière sur la surface du panneau diminue le rayonnement absorbé par le panneau.

Des chercheurs ont précisé le pourcentage de la chute en rendement par 17.4% ce qui est énorme, en absence du nettoyage automatique, le rendement de l'installation PV diminue. Pour cela beaucoup de chercheurs favorisent le refroidissement face avant car non seulement il limite la température du panneau mais aussi il assure un nettoyage continu.

III Chapitre III La réalisation d'un système de refroidissement des panneaux photovoltaïques

III.1 Les modes de transfert de chaleurs

Notre travail consiste à récupérer le maximum de la chaleur stockée dans le panneau pour le refroidir. Pour cela on va considérer le panneau comme un corps qui reçoit une quantité de chaleur par rayonnement solaire. Entre les couches du panneau la chaleur est transmise par conduction thermique et le refroidissement agit par échange thermique par convection forcée (que ce soit pour le refroidissement face avant ou le refroidissement face arrière).

Les trois types d'échanges d'énergie thermique ou communément appelé transfert de chaleur, sont décrits comme suit :

La conduction thermique est définie comme un transfert direct de la chaleur au sein d'un matériau. L'échange d'énergie se fait sans déplacement de matière : il concerne donc les solides et les fluides immobilisés. Il peut se réaliser au sein d'un seul corps ou par contact entre deux corps.

Ce transfert d'énergie est dû à l'agitation moléculaire ou atomique qui est transférée d'une région à une autre sous l'effet d'une différence de température, c'est-à-dire quand l'énergie moyenne d'agitation des molécules n'est pas la même en différents endroits du corps, un transfert de chaleur par conduction se produit. La chaleur est ainsi transmise des particules les plus agitées vers les particules les moins agitées. [2.38]

- Dans les fluides, la conduction thermique résulte des chocs entre les molécules « rapides » qui viennent des régions chaudes et les molécules « lentes » des régions froides.
- Dans les solides, la conduction résulte de l'énergie vibrationnelle des atomes qui est transportée le long du réseau cristallin car leur seul mouvement possible est une vibration autour de leurs positions d'équilibre.

D'après la loi de Fourier on définit le flux thermique comme suit :

$$q_{th} = k(T_2 - T_1)$$

Avec :

- T_1, T_2 sont respectivement la température initiale et finale
- K est la conductance thermique

- La résistance thermique est définie par $1/K$

On peut donc écrire :

$$q_{th} = 1/R_{th} (T_2 - T_1)$$

L'expression de K est la suivante :

$$K = 1/R_{th}$$

La convection thermique est un transfert de chaleur qui s'effectue grâce à un mouvement de matière dans un milieu liquide ou gazeux. Elle se produit lorsqu'une partie du fluide change de température. Ce changement de température influe sur la masse volumique du fluide qui se retrouve modifiée par rapport à la masse volumique du fluide environnant. Ce qui produit un déplacement vertical de la matière, c'est un déplacement macroscopique de l'énergie thermique : le fluide chauffé se dilate et remonte vers la surface, vers les zones moins chaudes. Il cède de la chaleur, il se refroidit au fur et à mesure et il se contracte. Sa masse volumique diminue et il finit par redescendre. En effet, la circulation d'un fluide dégage de la chaleur et la fait circuler.

On peut distinguer deux types de convection.

- La convection naturelle (ou libre) due uniquement à la différence de masse volumique entre les particules composant le fluide (produit le déplacement du fluide).
- La convection forcée due à la mise en mouvement du fluide par une action extérieure ce qui accélère le transfert thermique.

Le flux de chaleur par convection est exprimé par la formule suivante :

$$\Phi = h \cdot A \cdot (T_2 - T_1)$$

Avec (h le coefficient d'échange thermique, A la surface, T_2 et T_1 sont respectivement la température initiale et finale.)

Pour le troisième mode est le transfert de la chaleur « **rayonnement** », nous l'avons détaillé dans le chapitre II page 37

Remarque :

Le panneau PV se réchauffe par le rayonnement solaire. Le refroidissement que nous avons effectué est par convection thermique entre l'eau en mouvement et la surface du panneau.

Dans notre système de refroidissement, la chaleur récupérée sera dissipée, mais il y a une possibilité d'effectuer un stockage thermique, pour différentes applications selon le besoin.

III.2 Simulations :

III.2.1 Les projecteurs lumineux du laboratoire

Le dispositif qui existe dans le laboratoire est composé d'un projecteur lumineux et un système de ventilation. Il permet le réglage de l'intensité de lumière ainsi que la ventilation. Le capteur de température intégré dans ce système permet de mesurer la température ambiante, pour cette raison nous utilisons un thermocouple associé avec le multimètre pour mesurer manuellement la température de la face avant et la température de la face arrière du panneau.

Il faut signaler que la lumière émise par les projecteurs n'est pas une lumière blanche, et qu'elle n'est pas uniforme sur toute la surface du panneau. La face avant est enfermée ce qui va causer un réchauffement très rapide tandis que la face arrière du panneau est entourée par l'air ambiant du laboratoire.

Ce dispositif sert à simuler les endroits de haute température pour étudier l'impact de la température sur le panneau PV.

Le panneau intégré dans ce système a les caractéristiques suivantes :

Tableau III-1 La plaque signalétique du panneau

Type de module	Monocristallin 72 cellules
Puissance maximale (W_{pmax})	210
Tension en circuit ouvert (V)	45.90
Courant de court-circuit (A)	6.00
Tension V_{mpp} (V)	37.2
Courant I_{mpp} (A)	5.65
Coefficient de température de puissance en %	0.42



Figure III-1 Photos du projecteur lumineux pris en laboratoire de l'école ESSA Tlemcen

III.2.2 Description du mode opératoire

Dans cette expérience, nous allons procéder par étapes suivantes :

1. Essai à vide

- Prélèvement des mesures à froid après avoir fixé les conditions initiales sans ventilation et une température ambiante de 25°C
- Nous prenons les mesures de températures, tensions, courants chaque 10 min
- A une température de 75°C pour la face avant nous lançons le refroidissement

2. En charge

- Nous installons une charge composée de trois lampes de 21W, 12V
- Nous branchons un ampère mètre en série et un voltamètre en parallèle
- Nous reprenons toutes les étapes de l'essai à vide (conditions initiales, et puis augmentation de la température, puis refroidissement)

III.2.3 Résultats et interprétation :

Tlemcen est une ville qui se situe en nord-ouest de l'Algérie. Elle a un climat mix entre méditerranéen et semi-aride. Les températures max qu'on pourra atteindre sont inférieures aux températures dans le sud. Pour pouvoir estimer la chute en tension et en puissance dans le sud, nous allons utiliser un simulateur qui existe sur le laboratoire de notre école, en tenant compte des différences qui existent entre la réalité et le simulateur pour pouvoir expliquer les anomalies.

- Le spectre lumineux délivré par le projecteur n'est pas le même que celui du soleil.
- Les conditions d'aération sont complètement différentes d'une face à l'autre car la face avant est enfermée par contre la face arrière est exposé à la température ambiante du laboratoire.

Essai à vide :

Le tableau III.2 représente un essai à vide à l'aide des projecteurs lumineux. Le réchauffement du panneau de 75C° à 86C° a provoqué une chute de tension de 35.5V à 35.2V on remarque aussi qu'après le refroidissement du panneau à 47C° la tension a augmenté jusqu'à 37.7V, elle représente la plus grande valeur de tension atteinte.

Tableau III-2 Les valeurs de température, tension Vco, courant Icc

La température ambiante(C°)	La température face avant du panneau C°	La température face arrière du panneau(C°)	La tension circuit ouvert Vco	Le courant court-circuit Icc
32	75	67	35.3	1.62
36	75	68	35.5	1.68
37	86	71	35.2	1.73
Avec vent 50% 30	47	51	37.5	1.77
30	47	52	37.7	1.85

La courbe dans la figure III.2 représente l'évolution de la tension en fonction de la température. Nous remarquons que c'est une fonction décroissante de 37.5 à une température de 47 C° jusqu'à 35.2 C° à la température de 86C°. Les chercheurs supposent toujours que

cette évolution est linéaire pour l'estimation de la chute en tension pour les températures élevées.

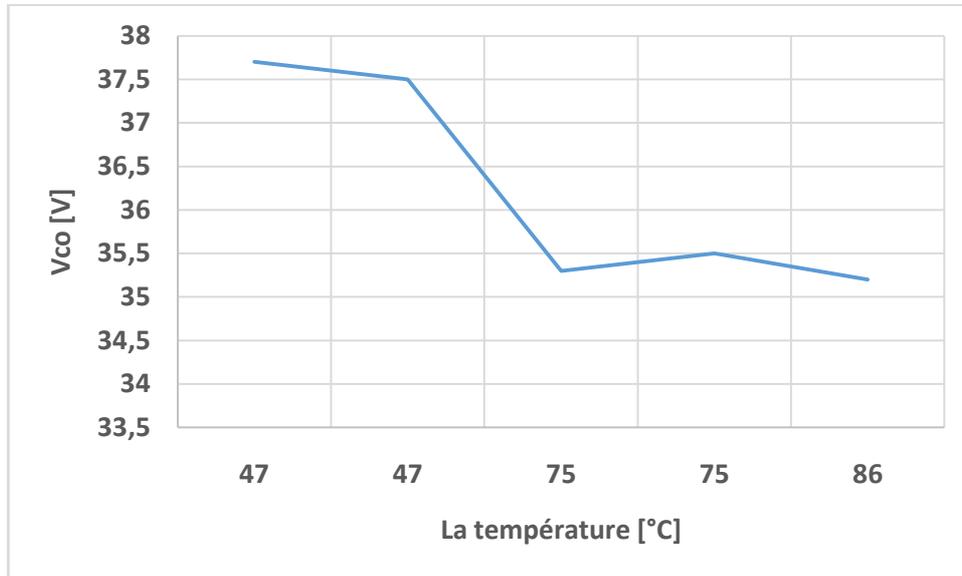


Figure III-2 La courbe de la tension V_{co} en fonction de la température essai à vide

Remarque :

Même en activant la ventilation pour une longue durée, la température de la face avant du panneau ne baisse pas en dessous de 47°C , car l'enceinte est fermée ce qui ne permet pas la circulation de l'air froid au tour de la face avant du panneau

Essai en charge :

Pour confirmer nos résultats nous allons appliquer la même expérience sur le même panneau en charge et étudier l'influence de la température sur la tension et le courant dans un circuit fermé. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III-3 Les valeurs de température, tension V_c et le courant I_c et la puissance-essai en charge

La température ambiante($^{\circ}\text{C}$)	La température face avant du panneau $^{\circ}\text{C}$	La température face arrière du panneau($^{\circ}\text{C}$)	La tension circuit ouvert V_{co}	Le courant court-circuit I_{cc}	La puissance
33	54	51	13.8	1.07	14.766
34	67	62	14.8	1.1	16.28
34	70	67	16	1.15	18.4
35	72	70	16.8	1.18	19.824

Avec vent 50%	43	48	17.5	1.18	20.65
30					
30	43	48	17.5	1.18	20.65

D'après le tableau III.3 nous remarquons que la tension pour les températures élevées est beaucoup inférieure à celle des basses températures. A 56C° elle était à 13.8V et à 39C° elle était à 18V. Cela a une influence directe sur la puissance. Nous pouvons constater que le panneau froid donne la plus grande puissance en charge 21.78W.

III.3 Réalisation d'un prototype du système de refroidissement

III.3.1 La liste du matériels utilisés

Thermocouple :

Le thermocouple est le capteur de température le plus utilisé car il couvre une large gamme de température et est peu onéreux. Il est assez précis avec une erreur de 0,1°C. ce capteur se présente sous forme de deux fils conducteurs de différentes nature reliés par une jonction appelée : soudure chaude. Chaque variation de température est décrite par une variation de tension mesurée au niveau des deux soudures froides du thermocouple.

✚ Le principe de fonctionnement :

La tension thermoélectrique générée résulte de l'effet Seebeck et appelée tension Seebeck. La soudure chaude se trouve à la température à mesurer. Les deux soudures froides doivent être à la même température, c'est la température de référence. La tension mesurée aux bornes du thermocouple est fonction de la température de la soudure chaude, de la température des soudures froides et du coefficient Seebeck. Une tension de compensation doit être calculée lorsque les soudures froides ne sont pas à $T = 0^{\circ}\text{C}$

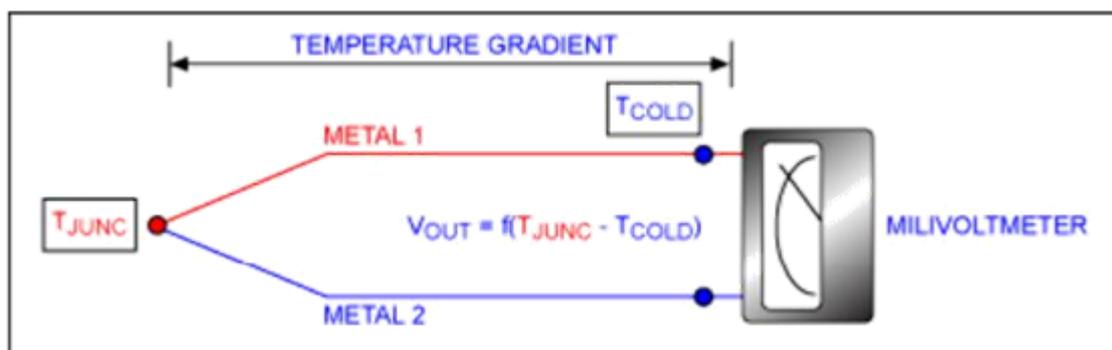


Figure III-3 Schéma explicatif d'un thermocouple.

 **L'effet Seebeck**

L'effet Seebeck est un effet thermoélectrique, découvert par le physicien allemand Thomas Johann Seebeck en 1821. [2.42] Lorsque deux métaux sont utilisés pour former une boucle ouverte, un potentiel électrique est généré entre les deux bornes non reliées de la boucle s'il existe un gradient de température dans la boucle. Ce potentiel électrique est fonction du coefficient Seebeck qui représente la sensibilité des matériaux utilisés.

Il existe différents types de thermocouples selon les matériaux utilisés. Chaque type possède des caractéristiques précises telles que : la plage d'utilisation et l'erreur. Dans notre cas nous avons utilisé un thermocouple type K qui a une FEM qui évolue linéairement en fonction de la température :

Tableau III-4 Les caractéristiques du thermocouple choisis.

Type	Métal A(+)	Métal B (-)	Limites théoriques	Coéf. Seebeck α ($\mu\text{V}/^\circ\text{C}$) à $T^\circ\text{C}$	Erreur standard	Erreur Mini	Plage d'utilisation
K	Chromel	Alumel	-270 à 1372 $^\circ\text{C}$	39,45 μV à 0 $^\circ\text{C}$	2,2% à 0,75%	1,1% à 0,2%	-40 à +1200 $^\circ\text{C}$

Alumel est un alliage composé de 95% de Nickel, 2% d'Aluminium, 2% de Manganèse et 1% de Silicium.

Chromel est un alliage composé de 80% de Nickel et 20% de Chrome.

Le LM35 :

Le LM35 est un capteur de température analogique. C'est un circuit intégré à basse tension de 4 à 20V simple à utiliser, précis, peu coûteux, et extrêmement fiable. La variation de la tension est de 10 mV par degré Celsius sur une plage de température de 0 $^\circ\text{C}$ à +100 $^\circ\text{C}$.

nettoyage des panneaux, mais aussi des inconvénients, principalement la consommation d'eau par évaporation. D'un autre côté, le refroidissement face arrière permet de récupérer l'énergie en chauffant de l'eau pour son utilisation future. Par contre, cette méthode ne permet pas le nettoyage des panneaux qui devra se faire par d'autres moyens.

Les premiers essais :

Le **refroidissement de la face avant** du panneau est réalisé par un contacte directe de l'eau avec la couche supérieure en verre du panneau. Dans le premier essai, la répartition de l'eau sur la totalité de la surface du panneau était faite par un tuyau multicouches perforé placé horizontalement au-dessus du panneau. La consommation de l'eau était très grande et la sa répartition n'était pas uniforme : l'eau ne couvrait pas la totalité de la surface du panneau et surtout les cellules du bas du panneau.

Pour résoudre ces deux problèmes, nous avons utilisé un tuyau en cuivre d'un diamètre de 14mm qui permet la distribution de l'eau à travers 5 sorties en cuivre type Té. Nous avons étranglé ces sorties afin d'augmenter la pression de l'eau et l'orienter dans les deux directions à droite et à gauche. Le résultat n'était pas satisfaisant.

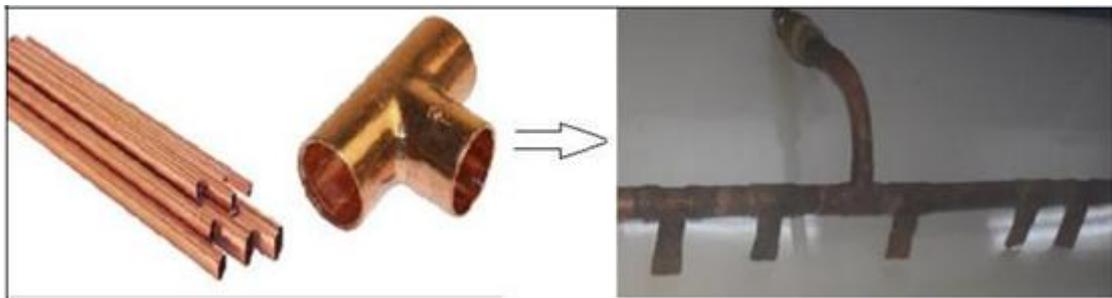


Figure III-6 Tuyau en cuivre utilisé dans l'essai.

Pour le deuxième essai, nous avons choisi d'utiliser des pulvérisateurs d'eau pour distribuer l'eau sur la totalité de la surface du panneau. Ce sont des buses de pulvérisation d'essuie-glaces de voitures. Toute la surface du panneau était couverte d'eau ce qui permettait l'échange thermique et donc le refroidissement. La quantité d'eau répartie sur la surface du panneau s'évaporait partiellement en dissipant une quantité d'énergie relativement grande grâce au changement de phase : refroidissement passif.



Figure III-7 Pulvérisateurs d'eau utilisés pour le refroidissement

Pour assurer la circulation de l'eau jusqu'aux pulvérisateurs, nous avons utilisé une pompe DC. Et pour minimiser la consommation de l'énergie, nous avons opté pour une pompe de lave glace, accessoire de voitures. C'est une pompe duelle rotative axiale dont le débit est de 200 l/h. Sa consommation en énergie est de 12V / 0,68A. Ses caractéristiques parviennent à assurer la montée et la circulation de l'eau.

Référence de la pompe utilisée : **Peugeot 643475**.

Ce dispositif d'élévation directe d'eau n'a pas été très efficace pour de longs cycles de refroidissement. On a dû changer la pompe par une « trousse bouteille/pompe » pour faire les derniers essais.

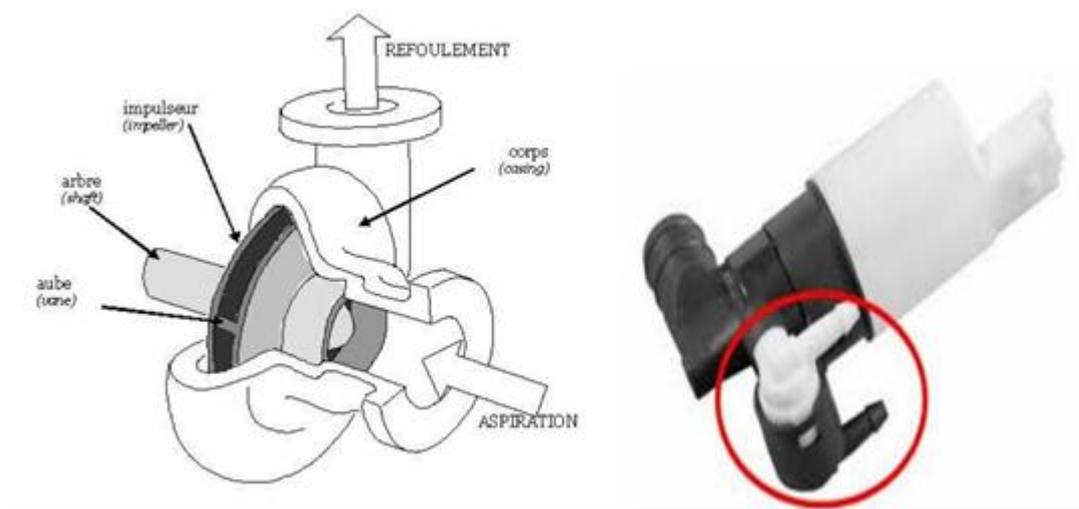


Figure III-8 Pompe DC lave glace qui assure la circulation d'eau

Dans ce deuxième essai, nous avons commandé la pompe afin d'assurer un rendement optimal du système. Pour cela, nous avons utilisé un relai commandé par carte Arduino.

Une carte Arduino Uno :



Figure III-9 Une carte Arduino Uno

Le relai :

Le relai est un interrupteur mécanique contrôlé électriquement par le champ magnétique d'une bobine. Il assure la commande du circuit de puissance en commutant entre différents états.



Figure III-10 Le relai SRD-05 VDC-SL-C

✚ Principe de fonctionnement

Nous avons utilisé un relai « Single Pole Double Throw ». Le relai SPDT possède un seul contact mais avec une borne commune, un contact normalement ouvert et un contact normalement fermé. Lorsque le bobinage reçoit une énergie électrique, un champ magnétique est créé. Ce champ magnétique déplace la borne commune qui va se connecter sur le contact normalement ouvert et le contact normalement fermé s'ouvre.

Dès qu'on coupe la tension aux bornes de la bobine, le relais revient à son état de repos. On peut ainsi basculer d'un circuit à l'autre. [2.39]

Le relais SPDT possède 5 broches au total : 3 pour les contacts, 2 pour la bobine.

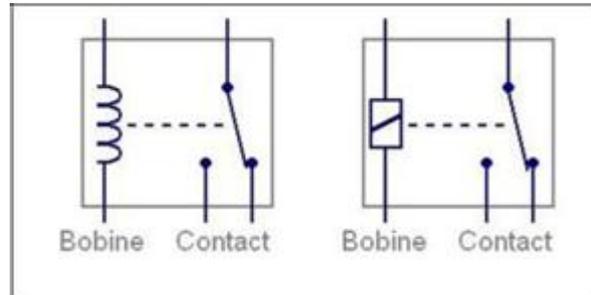


Figure III-11 Symbole électrique du relais

Dans le troisième essai, nous avons dimensionné un distributeur d'eau qui assure l'uniformité du flux d'eau sur la totalité de la surface. Il est constitué de 43 becs d'où l'eau sort avec un débit de 771 l/h qui permet l'uniformité de haut en bas du panneau, du flux d'eau.



Figure III-12 Distributeurs d'eau uniforme de la face avant.

Pour ce qui est du **refroidissement face arrière**, nous avons conçu un prototype à base de PVC alvéolé et dans chaque couloire nous avons incéré un bout de tuyau pour pouvoir le connecter au distributeur ci-dessus. Un autre distributeur était utilisé pour récupérer l'eau injectée dans le PVC alvéolé pour former une sorte de radiateur.

L'idée était de faire circuler l'eau à l'intérieur du PVC et récupérer la chaleur du back-sheet du panneau. Nous avons enveloppé le PVC avec des feuilles d'aluminium pour favoriser l'échange thermique. Ce prototype a échoué. Il n'a eu aucun échange thermique entre les back-sheet et le PVC.



Figure III-13 le radiateur avec les distributeurs d'eau pour la face arrière.

Donc nous opté pour la réalisation d'un autre prototype qui assure le contacte directe de l'eau avec la face arrière. Nous avons fait une encapsulation arrière avec du plexi glace qui enveloppe toute la face arrière du panneau. L'eau y est infectée par une ouverture en haut du panneau et est récupérée par le bas du panneau.

Nous avons appliqué nos systèmes à deux panneaux similaires de type monocristallin. Les caractéristiques sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau III-5 Caractéristiques du module utilisé dans la réalisation

Type de module	100M-36
Puissance crêt (Wc)	100
Tension en circuit ouvert(V)	22.7
Courant de court-circuit (A)	5.84
Tension Vmpp (V)	18.50
Courant Impp (A)	5.45
Charge maximale de fusible (A)	10

Tension maximale du system VDC	1000 V
Facteur de température de la cellule	
Température nominale de fonctionnement C°	45±C°
Coefficient de température de puissance	-0.41
Coefficient de température de courant	+0.06
Coefficient de température de tension	-0.32

III.3.2 Le refroidissement face avant :

III.3.2.1 Le principe de fonctionnement :

Les systèmes de refroidissement par eau sont les plus répandus dans l'industrie, car ils disposent de beaucoup d'avantages. Les propriétés thermiques de l'eau permettent de la classer parmi les meilleurs fluides caloporteurs. En plus de sa disponibilité et de son pouvoir calorifique très élevé (4180 J.kg^{-1}), l'eau peut collecter le maximum de chaleur. Pour cela nous avons choisi comme système de refroidissement face avant, une simple circulation d'eau dans un circuit ouvert, sans récupération pour éviter le réchauffement du réservoir de stockage.

Comme mentionné précédemment, notre système consiste à pomper de l'eau à partir d'un réservoir de stockage vers des pulvérisateurs d'eau. Ces derniers assurent le contact direct de l'eau avec la surface avant du panneau PV, pour uniformiser le flux au maximum nous avons utilisé 5 pulvérisateurs d'eau.

Nous avons effectué une pulvérisation discontinue d'eau, pour optimiser la consommation de la pompe ainsi que pour laisser une partie de l'eau se vaporiser et donc tirer une quantité de chaleur plus grande (phénomène de changement de phase). Lors du changement de phase, l'eau consomme plus d'énergie pour passer à l'état gazeux. Il est aussi utilisé dans le refroidissement par MCP (matériau à changement de phase), (voir chapitre II) Lorsque le MCP passe de la phase solide vers la phase liquide, il consomme beaucoup d'énergie thermique ce qui implique que la température du panneau diminue (même phénomène de la phase liquide vers la phase gazeuse).

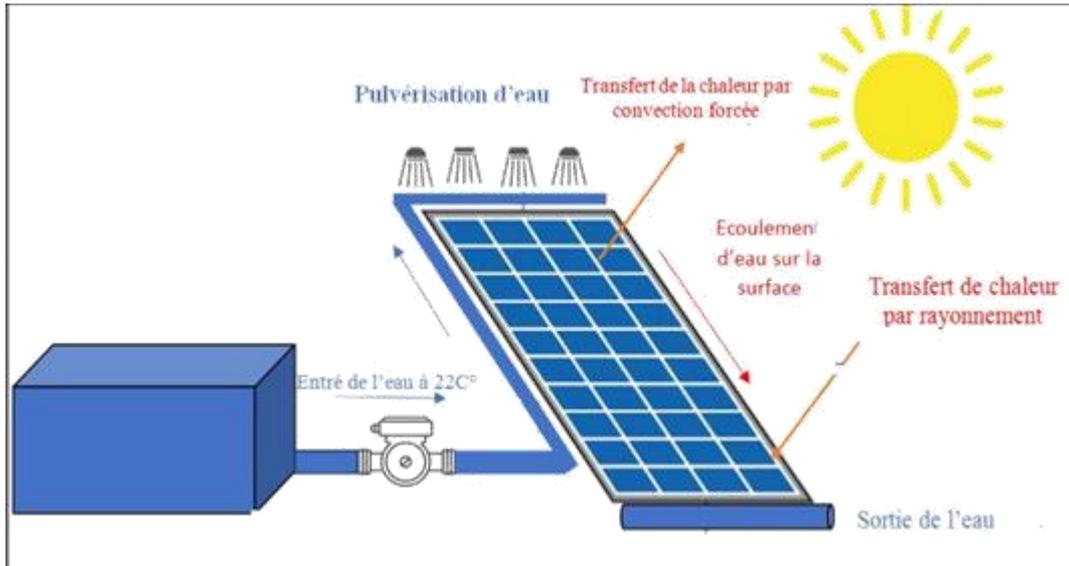


Figure III-14 Schémas explicatif du refroidissement face avant



Figure III-15 Le système de refroidissement par pulvérisation d'eau

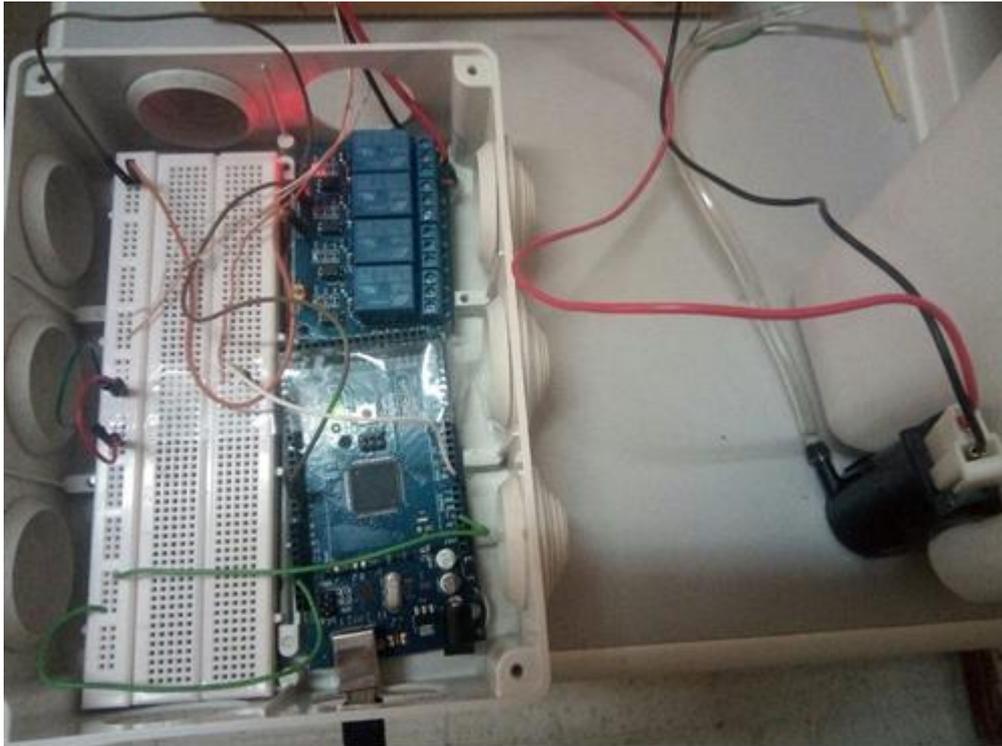


Figure III-16 la boîte de commande du système de refroidissement par pulvérisation d'eau

III.3.2.2 Résultats et interprétations :

Nous avons commencé notre réalisation par des expériences pour prouver l'impact de la température sur le rendement du panneau PV.

Le tableau suivant représente les résultats expérimentaux que nous avons pris en exposant un panneau de 100W au soleil pendant la journée.

Tableau III-6 Les résultats expérimentaux pris le 15/04/2019 à Tlemcen

15/04/2019	La tension V_{co} (V)	Le rayonnement (W/m^2)	T ambiante (C°)
10 :10	21,1	612	24
11 :10	20	807	24
12 :10	19,6	874	24
13 :10	19,6	891	24
14 :10	19,2	913	24
14 :15	18,8	275	30
15 :10	20,1	210	30
15 :35	20,8	922	24
16 :10	20,5	811	24
Froid	21,6	811	24

Dans le tableau III.6, nous constatons que le rayonnement n'est pas stable tout au long de la journée. La valeur maximale que nous avons mesurée était 922W/m^2 le 15/04/2019. Pour déterminer l'influence de la température sur la tension, nous devons fixer tous les autres paramètres et varier la température, en pratique cela est impossible car le rayonnement varie tout au long de la journée.

Dans la littérature le rayonnement doit provoquer une légère augmentation de tension lorsqu'il augmente, par contre son influence sur le courant est beaucoup plus importante.

Nous pouvons constater à partir des valeurs présentées dans le tableau que :

La première valeur a été prise à 10 :10 le panneau PV était encore froid, le rayonnement était 612W/m^2 et la tension 22.1V . A 14 :10 le panneau était chaud et le rayonnement était beaucoup plus fort (922W/m^2) mais la tension était plus faible 19.2V . Cette comparaison est valide pour les 5 premières valeurs du tableau, avant qu'il fût entièrement couvert par des nuages. Pour cette raison le rayonnement a diminué jusqu'à 275W/m^2 .

Dans les expériences suivantes nous allons mesurer la température du panneau pour confirmer la raison pour laquelle la tension diminue.

Tableau III-7 Les résultats expérimentaux pris le 16/04/2019 à Tlemcen

16/04/2019	Tension V_{co} (V)	Rayonnement (W/m^2)	T ambiante ($^{\circ}\text{C}$)	T panneau ($^{\circ}\text{C}$)
9 :50	21,9	570	24	
10 :50	20,2	745	24	
11 :55	20,8	820	24	
20 :15	19,9	845	24	
13 :50	19,6	920	24	
14 :50	19,7	940	27	42
15 :50	19,9	750	29	44
16 :50	19,9	550	26	35

D'après le tableau III.7 :

- ❖ Nous avons commencé la prise de mesures des températures à 14 :50, on constate un écart de 15°C entre la température ambiante et la température de surface du panneau.
- ❖ Nous remarquons que même avec une température ambiante de 27°C , le panneau s'échauffe jusqu'à 42°C .

- ❖ La journée où nous avons pris ces mesures il y avait une circulation d'air qui a contribué au refroidissement du panneau par convection naturel.

Tableau III-8 Les résultats expérimentaux pris le 17/04/2019 à Tlemcen

17/04/2019	Tension Vco (V)	Rayonnement (W/m ²)	T ambiante (°C)	T panneau (°C)
9 :50	21,4	560	23	26
10 :50	20,6	730	23	32
11 :50	20,6	868	25	42
12 :50	20,4	880	27	50

Dans le tableau III.8 nous remarquons que le panneau atteint 50C° à une température ambiante de 27C°, donc un écart de 23C° entre la température ambiante et la température du panneau.

Avec un faible rayonnement solaire de 560W/m² la tension était 21.4V (la plus grande valeur mesurée), car le panneau était encore froid, par contre à 12 :50 le rayonnement était 880W/m² et la tension était plus faible 20.4V à cause du réchauffement du panneau.

Tableau III-9 Les résultats expérimentaux pris le 22/04/2019 à Tlemcen

22/04/2019	Tension Vco (V)	Rayonnement (W/m ²)	Courant Icc (A)	T panneau (°C)	T ambiante (°C)
10 :10	22,6	631	3,04	23	16
10 :30	20,7	900	5,09	44	24
13 :00	20,4	803	4,5	43	21
13 :30	20,6	263	3,03	43	19

D'après le tableau III.9, nous pouvons remarquer que

- ❖ Lorsque le rayonnement augmente, la valeur du courant court-circuit augmente elle aussi, même lorsque le panneau est chaud. La valeur initiale de la tension était 22.6V (avec un rayonnement 631W/m²) à une température ambiante 16C° cela est avant le réchauffement du panneau.
- ❖ Lorsque la température du panneau augmente à 44C° la tension diminue jusqu'à 20.7V pourtant le rayonnement était plus élevé (900W/m²). Le comportement du courant vis-à-vis des mêmes variations de du rayonnement est différent de celui de la tension.

Nous constatons que le courant augmente avec l'accroissement du rayonnement même lorsque le panneau est à une température élevée.

Tableau III-10 Les résultats expérimentaux pris le 27/04/2019 à Tlemcen

27/04/2019	Tension V _{co} (V)	Rayonnement (W/m ²)	Courant I _{cc} (A)	T panneau (°C)	T ambiante (°C)	Puissance max
10:55	20,8	781	4,66	27	19	77,45958
11:50	20,5	880	5,42	38	18	83,3096
12:50	20,4	905	5,88	34	20	87,16055
14:50	20,4	655	3,53	38	19	62,00885
15:50	19,6	150	6,04	54	19	13,2165

Tableau III-11 Les résultats expérimentaux pris le 25/04/2019 à Tlemcen

25/04/2019	Tension V _{co} (V)	Rayonnement (W/m ²)	Courant I _{cc} (A)	T panneau (°C)	T ambiante (°C)	Puissance max
10:55	20,8	781	4,66	38	19	77,46
11:50	20,5	880	5,42	34	18	83,3096
12:50	20,4	905	5,88	38	20	87,16
14:50	20,4	655	3,53	54	19	62,008
15:50	19,6	150	6,04	27	19	13,21

D'après les mesures dans les tableaux III.10 et III.11 du 27 et 25 avril respectivement, il y avait une forte circulation d'air qui a prévenu le panneau d'atteindre de grande valeur de température.

Les courbes de rayonnement et température en fonction du temps :

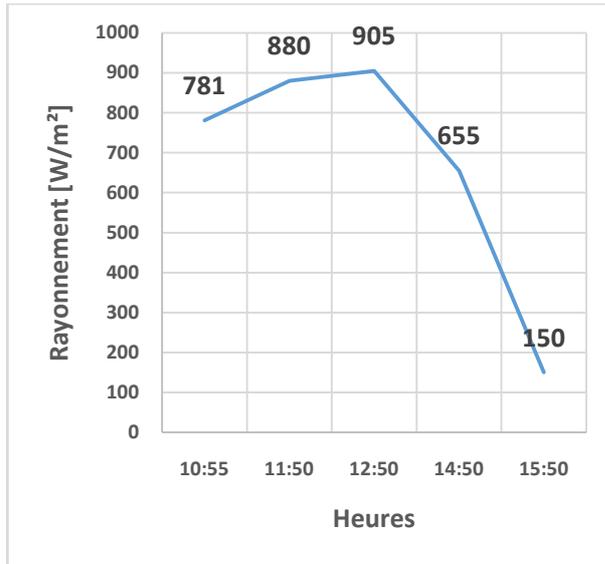


Figure III-17 La courbe du rayonnement en fonction des heures de la journée prise le 25/04/2019 Tlemcen

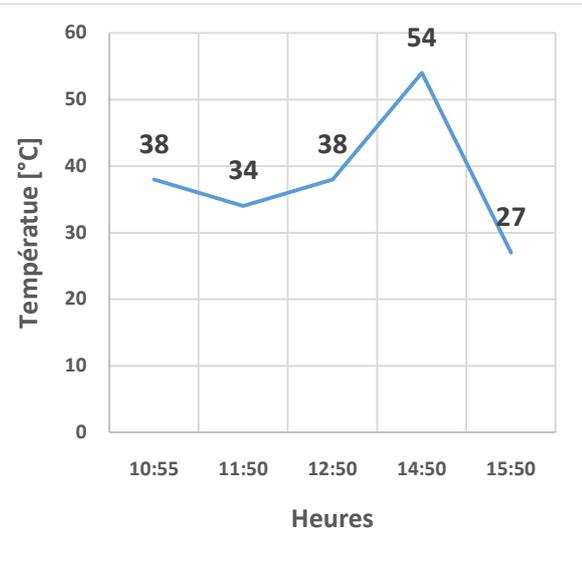


Figure III-18 La courbe de la température en fonction des heures de la journée prise le 25/04/2019 Tlemcen

D'après les figures III.16 et III.17 :

Le rayonnement solaire atteint une valeur maximale approximativement à 12 :30→13 :30, comme nous l'avons mesuré le 25/04/2019 la valeur maximale est de $935W/m^2$, par contre la courbe de la température du panneau est ascendante, et la température augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne des valeurs très élevées.

D'après les courbes de rayonnement et de la température en fonction du temps, la température augmente constamment en fonction du temps même si le rayonnement chute après avoir atteint sa valeur maximale.

Les courbes de la tension en fonction de la température :

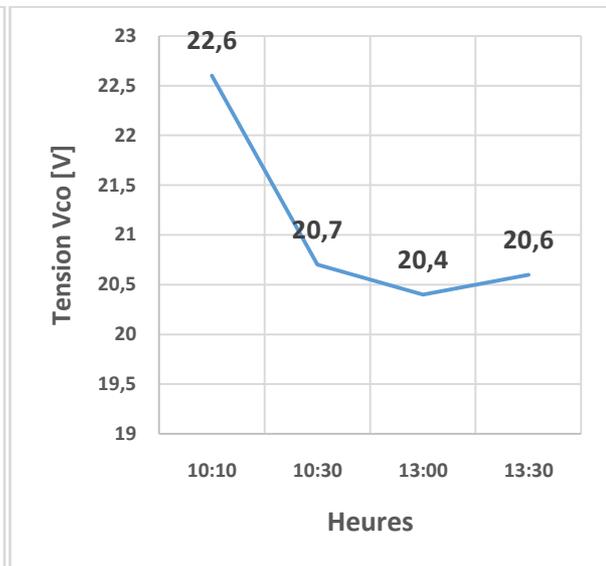
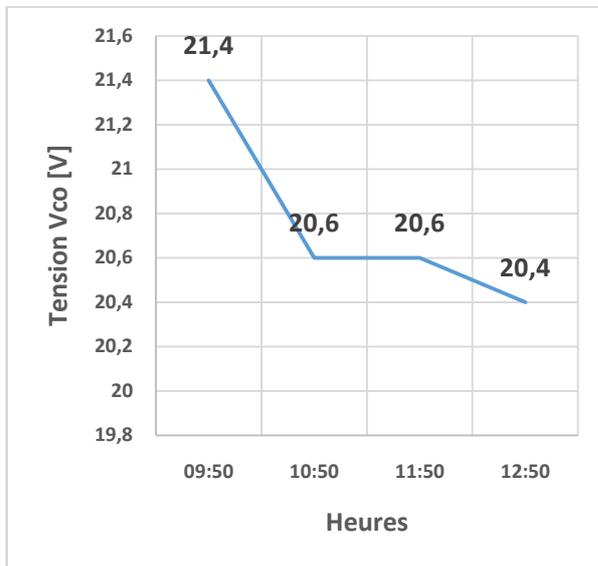


Figure III-19 La courbe de la tension en fonction de la température du 17/04/2019

Figure III-20 La courbe de la tension en fonction de la température du 22/04/2019

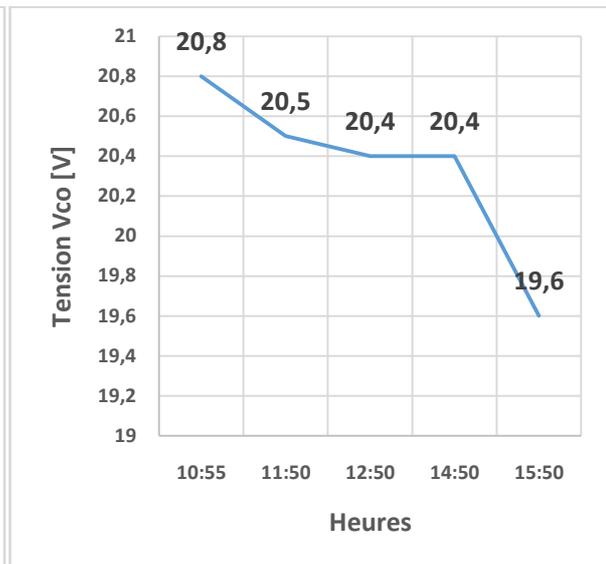
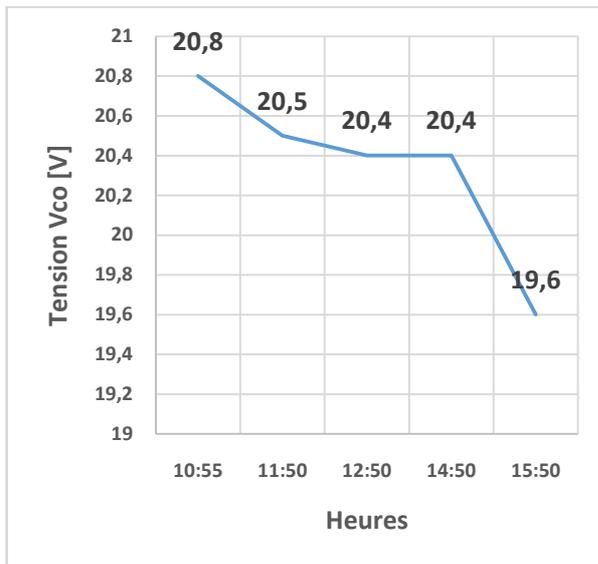


Figure III-21 La courbe de la tension en fonction de la température du 27/04/2019

Figure III-22 La courbe de la tension en fonction de la température du 25/04/2019

Nous observons dans les courbes des tensions en fonction de la température (figures III.18, 19, 20 & 21), qu'ils ont une allure décroissante.

La température affecte le rendement du panneau dont elle provoque une chute considérable de tension. La formule de calcul de la puissance à une température et rayonnement variable (voir

chapitre II page 37), contient deux variables, pour cela les courbes de puissance-température ne permettent pas de voir l'influence de la température sur la puissance.

Tableau III-12 Les valeurs de la tension et du courant et puissance pour l'essai en charge

09/05/2019	Tension V _{co} (V)	Courant I _{cc} (A)	T panneau (°C)	T ambiante (°C)	Puissance
12 :10	6.61	1,26	45	31	8.337
12 :25	6.48	1,23	48	36	7.97
12 :40	6.46	1,29	48	29	8.342
13 :15	6.5	1,26	53	32	8.19

Nous avons aussi considéré l'impact de la température sur le panneau en charge. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Le tableau III.12, représente les mesures que nous avons pris lors de l'essai en charge, nous avons commencé l'essai à 12 :10 le panneau était déjà chaud. La différence de température n'était pas grande car nous avons exposé le panneau que pour une heure de temps, mais nous pouvons constater une chute de puissance de 0.367W.

Résultats et interprétations:

Nous avons testé le système de refroidissement par pulvérisation d'eau dans les conditions climatique suivantes :

Condition météorologique	Valeur
Irradiation (W/m ²)	967(mesure sur place)
Vitesse du vent (m/s)	/
Humidité relative (%)	/
Température ambiante (C°)	27C° (mesure sur place)

Tableau III-13 Test du prototype de refroidissement du panneau le 21/05/2019

	Température panneau C°	Le rayonnement W/m ²	La tension V _{co} (V)	Le courant I _{cc} (A)
	62	967	19,2	6,01
Début du cycle de refroidissement →	13:39	57		
	13:57	967	20,4	5,89
Fin du cycle de refroidissement →	14:00	29	21.1	
	14:30:00	967	21,1	5,76
	4:33	39		
	15:54	42		

Nous avons actionné la pompe pendant 21 minutes ou elle pompait de l'eau pendant 5 secondes puis elle s'arrête 5 secondes.

- Le temps total de la marche de pompe est 10,5min
- Nous avons diminué la température du panneau de 62C° jusqu'à 33C°
- Le panneau après refroidissement a pris environ 54 min pour attendre une température de 42C°.
- Cet essai primaire nous a permis de déterminer les cycles de refroidissement et de finaliser le programme de commande de la pompe.

L'essai final du système de refroidissement par pulvérisation d'eau

Les conditions météorologiques où nous avons testé le système de refroidissement face avant sont les suivantes :

Tableau III-14 les conditions météorologiques du teste de refroidissement 11/06/2019

Condition météorologique	Valeur
Irradiation (W/m ²)	933(mesure sur place)
Vitesse du vent (m/s)	23 km/h (donnée météo)
Humidité relative (%)	28 (donnée météo)
Température ambiante (C°)	26C° (mesure sur place)

- Nous avons programmé le relai pour qu'il soit actif pendant 5 secondes et il s'arrête pendant 5 secondes, et puis l'Arduino prend une mesure de température et vérifie la condition, si la température dépasse les 30C° il réactive à nouveau la pompe pendant 5 secondes. Le programme s'exécute en boucle infinie, jusqu'à la diminution de la température en dessous de 30C°. Où la température est dans l'intervalle de fonctionnement nominal comme indiqué dans la datasheet du panneau (47±1 C°).
- L'eau à l'entrée a une valeur de température de 23C°
- Le programme d'Arduino que nous avons écrit est le suivant :

```
int rel=5;
int temp=A0;
int i;
void setup() {
  pinMode(temp, INPUT);
  pinMode(5,OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  int valeur_brute = analogRead(A0);
  float temperature_celcius = valeur_brute * (5.0 / 1023.0 *
  100.0); Serial.println(temperature_celcius); delay(250);
}
void loop() {
  int valeur_brute = analogRead(A0);
  float temperature_celcius = valeur_brute * (5.0 / 1023.0 *
  100.0); Serial.println(temperature_celcius); delay(250);
  if(temperature_celcius > 30){
    digitalWrite(rel, LOW);
    delay(5000);
    Serial.println(i);
    i ++;
    digitalWrite(rel, HIGH);
    delay(5000);
    int valeur_brute = analogRead(A0);
```

```
float temperature_celcius = valeur_brute * (5.0 / 1023.0 *  
100.0); Serial.println(temperature_celcius); delay(250);  
  
}  
else {  
digitalWrite(rel, HIGH);  
int valeur_brute = analogRead(A0);  
float temperature_celcius = valeur_brute * (5.0 / 1023.0 *  
100.0); Serial.println(temperature_celcius); delay(250);  
  
Serial.println("temperature  
panneanormale""//n"); delay(250);  
  
}  
}
```

Les résultats obtenus durant le teste système de refroidissement par pulvérisation d'eau sont résumés dans le tableau III.15 :

→ Les cases signalées en bleu désignent la phase de refroidissement (pompe en marche) et les cases signalées en orange désignent la période de réchauffement (pompe en arrêt).

Tableau III-15 Test du prototype de refroidissement face avant du panneau PV le 11/06/2019

Rayonnement W/m ²	Tension V	T ambiante C°	Tpanneau C°	Heure	La puissance W	le gain en puissance
895	19,9	28	56,21	14:00	77,88232631	
894	20,9	28	38,21	14:03	84,47344859	
894	21	28	34	14:05	86,01503886	
894	21,3	28	33	14:06	86,38121232	
894	21,2	28	31,77	14:07	86,83160568	
894	20,9	28	37,15	14:09	84,86159246	6,979266148
931	20,7	28	42,52	14:11	91,79674337	
931	20,5	28	43,99	14:14	91,20066704	
931	20,3	28	45,43	14:15	90,61675554	
931	20	28	46,2	14:20	90,30452508	
931	20	28	47,41	14:21	89,81387722	
931	20	28	48,4	14:21	89,41243806	
931	19,9	28	49,36	14:22	89,02316372	
931	19,9	28	49,99	14:23	88,76770244	
931	19,9	28	53	14:24	87,5471652	
931	19,8	28	56	14:28	86,3306829	
931	19,8	28	56	14:30	86,3306829	
980	20,6	28	52	14:36	87,1426593	3,844084068
980	20,9	28	47	14:38	89,0712396	
980	21	28	44	14:39	90,2754342	
980	21,1	28	42	14:40	91,0782306	
980	21,2	28	41	14:41	91,4796288	
980	21,2	36	39,1	14:42	92,24228538	
980	21,2	36	38,61	14:43	92,4389705	
980	21,4	36	36,71	14:43	93,20162708	
980	21,4	36	34,7	14:45	94,00843746	
980	21,4	36	36,7	14:48	93,20564106	
980	21	36	40,57	14:51	91,65223003	2,580990426
944	20,8	36	45,59	14:54	86,34441555	
944	20,5	36	47,95	14:55	85,43191457	
944	20,4	36	49,85	14:56	84,69727394	
944	20,4	36	51,8	14:57	83,94330067	
944	20,3	36	51,8	15:00	83,94330067	
944	20,2	38	52,79	15:01	83,56051424	
944	20,2	38	52,79	15:03	83,56051424	
944	20,1	38	54,79	15:08	82,78720832	
944	20	38	54,23	15:08	83,00373398	
944	20	38	55,23	15:09	82,61708102	
944	20	38	56,72	15:09	82,04096811	
944	19,9	38	56,21	15:10	82,23816112	77
944	19,9	38	57,18	15:10	81,86310775	4,481307806

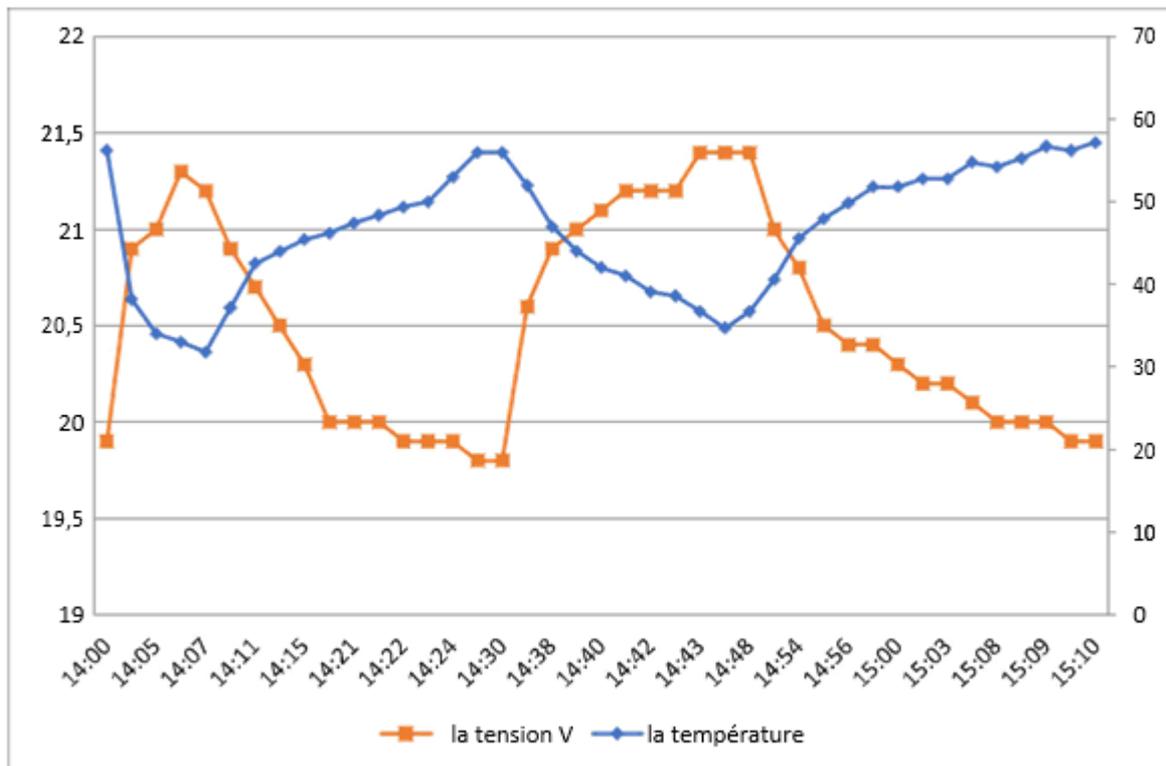


Figure III-23 Courbe de la tension et de la température en fonction du temps pour le refroidissement face avant

La courbe dans la figure III.22 représente l'évolution de la tension et de la température en fonction du temps, nous constatons que les deux courbes sont apposées, lorsque la tension est maximale la température est minimale et vice versa.

D'après les résultats expérimentaux du système de refroidissement face avant avec pulvérisation d'eau représenté dans le tableau III.15 représente, nous pouvons établir le bilan énergétique suivant :

III.3.2.3 Le bilan énergétique :

✚ Le premier essai :

- Nous avons commencé notre essai à chaud avec la température du panneau à $56,21^{\circ}\text{C}$ (en face arrière). Nous avons aussi constaté une différence de l'ordre de 5°C entre la température face avant et la température face arrière
- La tension était à $19,9\text{V}$
- Au bout de 7 minute la température du panneau a diminué jusqu'à $31,77^{\circ}\text{C}$ et la tension a augmenté jusqu'à $21,2\text{V}$. La température du panneau a repris sa valeur initiale au bout de 21min. A un rayonnement considéré constant à $894\text{W}/\text{m}^2$ on peut calculer le gain en

puissance électrique en utilisant la formule citée dans le chapitre II page 37), On trouve les valeurs suivantes :

$$P_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.894 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 77.96W$$

Après le refroidissement nous avons augmenté la puissance jusqu'à :

$$P_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (31.77 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.894 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 86.91W$$

→ Donc un gain en puissance de 8.95W. qui représente 10.30% de la puissance du panneau

→ La consommation de la pompe est estimée avec la méthode suivante :
 $E_{consommé} = I_{pompe} * V_{pompe} * t = (0.68 * 12 * 3.5 * 60) / 3600 = 0.476Wh$ (3.5min est le temps de marche de la pompe)

→ L'énergie totale gagnée par le système est :

$$E_{gagné} = ((86,83 - 77,88) * 7 * 60 + (91,79 - 86,33) * 21 * 60) / 3600 = 2.38Wh$$

Le gain total dans le premier cycle est de : $G_{totale} = 2.38 - 0.476 = 1.904Wh$

La pompe ne consomme que 20% de l'énergie que nous avons récupérée du panneau.

Le deuxième essai :

- Nous avons commencé l'essai à chaud avec la température du panneau à 56°C
- La tension était à 19.8Vco
- Au bout de 9 minute la température du panneau a diminué jusqu'à 34.7°C et la tension a augmenté jusqu'à 21.4V. Au bout de 22min la température a augmenté jusqu'à 57.18°C. A un rayonnement considéré constant à 980W/m² on peut calculer le gain en puissance électrique en utilisant la même formule :

$$Z_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (56 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.980 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 87.15W$$

Après le refroidissement nous avons augmenté la puissance jusqu'à :

$$P_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (34.7 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.894 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 94W$$

→ Donc un gain en puissance de 6.85W qui représente 7.2% de la puissance du panneau.

→ La consommation de la pompe est estimée avec la méthode suivante :

Chapitre III La réalisation d'un système de refroidissement des panneaux photovoltaïques

$E_{\text{consommé}} = I_{\text{pompe}} * V_{\text{pompe}} * t = (0.68 * 12 * 4.5 * 60) / 3600 = 0.612 \text{Wh}$ (4.5min est le temps de marche de la pompe).

→ L'énergie totale gagnée par le système est :

$E_{\text{gagné}} = ((94,00 - 89,071) * 12 * 60 + (86,34 - 81,86) * 22 * 60) / 3600 = 0.9858 + 1.64 = 2.62 \text{Wh}$

Le gain total dans le premier cycle est de : $G_{\text{totale}} = 2.62 - 0.612 = 2.008 \text{Wh}$

Dans cet essai la pompe a consommé 30% de l'énergie récupérée.

III.3.2.4 Le coût du prototype :

Tableau III-16 Le coût du système de refroidissement par pulvérisateur d'eau

Composant	Coût Da
Panneau photovoltaïque	8000
Pulvérisateurs d'eau	200
Tuyauterie	200
Thermocouple	1000
LM35g	400
Arduino	2500
Relais	2000
Pompe DC 12V	1000
Total sans le panneau PV	7300

 Essai de refroidissement face avant avec distributeur d'eau :

Bilan énergétique :

Dans le tableau III.17, les cases signalées en bleu indiquent les résultats de l'essai de refroidissement face avant par distributeur d'eau.

Tableau III-17 résultats du test du système de refroidissement face avant avec distributeur d'eau

11/06/2019

Rayonnement	Heure	Tension V _{co}	T	T	puissance	gain en
-------------	-------	-------------------------	---	---	-----------	---------

			ambiante	panneau	W	puissance W
713	11:05	20,5	21	35	68,3767	
797	11:42	19,6	27	59	68,58982	
797	11:44	22,1	27	32	77,41261	8,82279

Le distributeur nécessite un débit beaucoup supérieur au débit donné par la pompe 12V DC (200L/h), pour cette raison nous avons utilisé la pompe AC de l'installation de l'école directement à partir du réservoir de stockage.

- Nous avons réglé le débit manuellement de telle sorte que le flux soit uniforme et l'eau couvre le maximum de la surface du panneau.
- Nous avons pompé l'eau pendant 1.78min.
- Nous avons commencé notre essai à chaud avec la température du panneau à 59C°
- La tension était à 19.6Vco
- Au bout de 2 minute la température du panneau a diminué jusqu'à 32C° et la tension a augmenté jusqu'à 22.1V.

La puissance du panneau chaud :

$$Pe=Pc(Wc)*Irrad(Kwh)*(1-(59-25)*0.0041)=100*0.797*(1-(59-25)*0.0041)= 68.58W$$

Après le refroidissement nous avons augmenté la puissance jusqu'à :

$$Pe=Pc(Wc)*Irrad(Kwh)*(1-(32-25)*0.0041)=100*0.797*(1-(32-25)*0.0041)= 77.41W$$

Donc un gain en puissance de 8.82W ce qui représente 11.42 %.

Le cout du prototype

Le coût du prototype du système de refroidissement face avant avec distributeur d'eau :

Tableau III-18le coût du système de refroidissement face avant par distributeur d'eau

Composant	Coût Da
Panneau photovoltaïque	8000
Thermocouple	1000
Distributeur d'eau	3200
Tuyauterie	200
Total sans le panneau PV	4400

III.3.3 Le refroidissement face arrière :

III.3.3.1 Résultats et interprétations

Le refroidissement face arrière a prouvé son efficacité avec un refroidissement plus long (durable). Nous avons testé notre prototype sous une température ambiante qui varie entre 21/27, les résultats sont résumés dans le tableau III.19 :

Tableau III-19 Résultats du test du système de refroidissement face arrière le 11/06/2019

Rayonnement	Heure	Tension V _{co}	T ambiante	T panneau	Puissance W	Gain en puissance W
860	14:35	18,9	27	62	72,9538	
860	14:37	20,9	27	27	85,2948	12,341
780	14:40	21,7	27	27	77,3604	
780	14:42	22,3	27	27	77,3604	
780	15:02	19,8	27	38	73,8426	

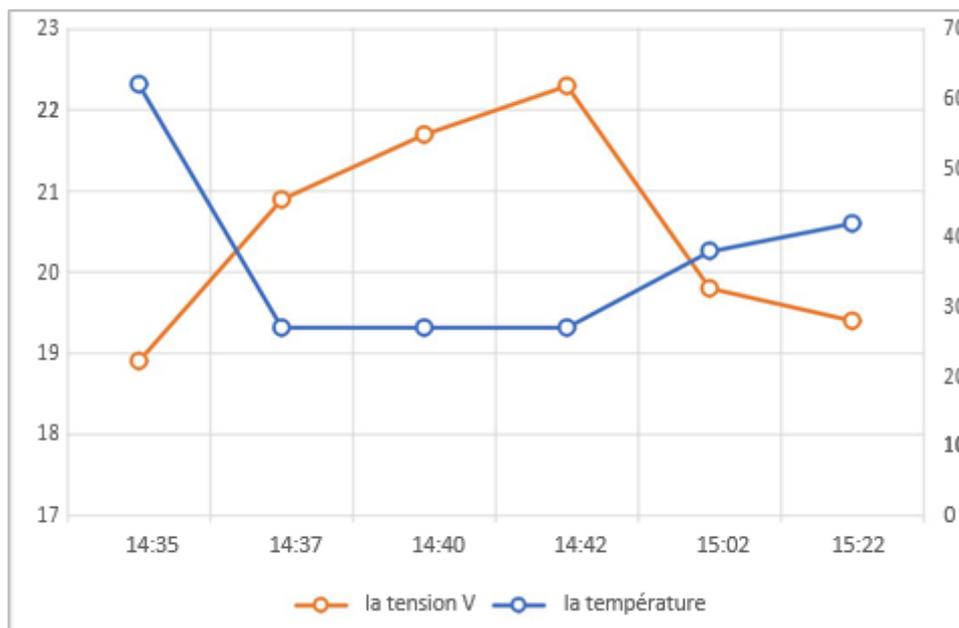


Figure III-24 Courbe de la tension et de la température en fonction du temps pour le refroidissement face arrière

La courbe dans la figure III.24 représente l'évolution de la tension et de la température en fonction du temps, nous constatons que les deux courbes sont apposées, lorsque la tension est maximale la température est minimale et vice versa. Sauf dans ce cas la température prend une plus longue période pour augmenter à sa valeur initiale.

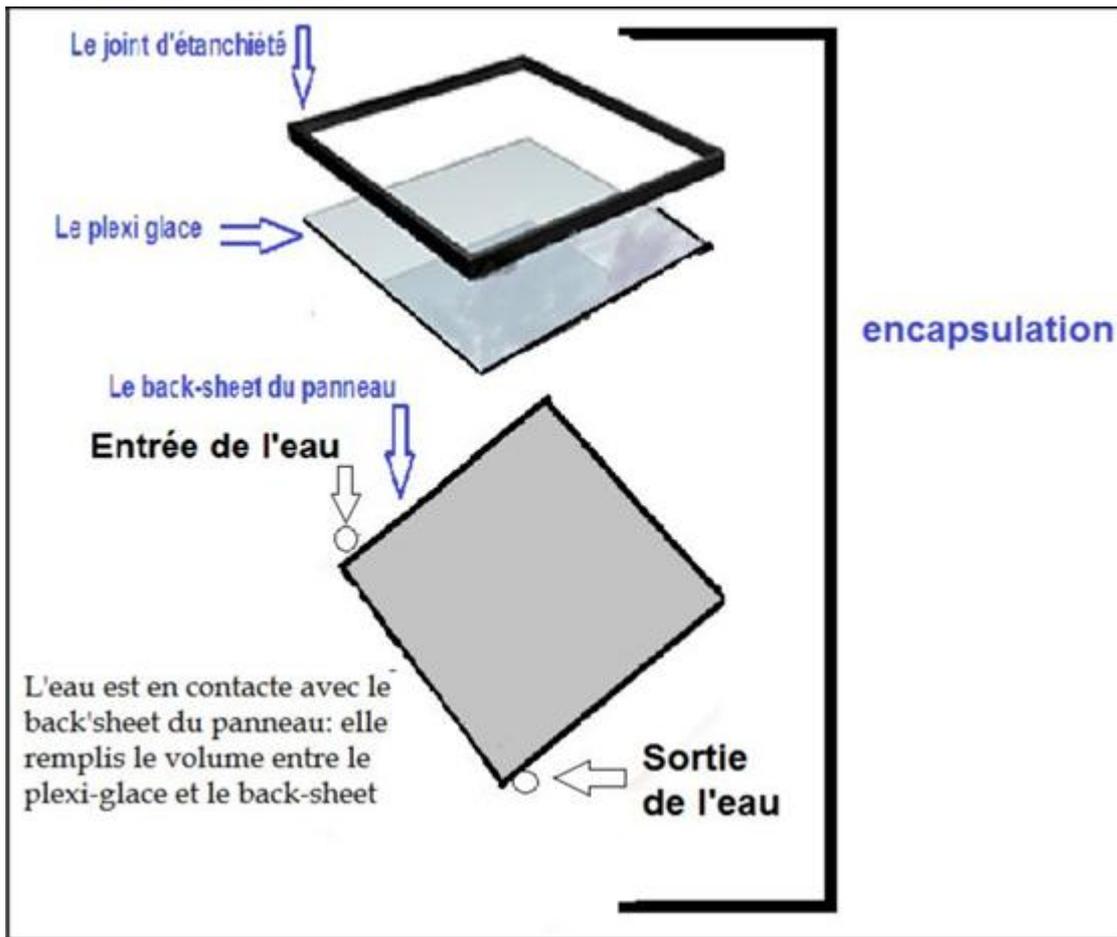


Figure III-25 Schémas explicatif du refroidissement face arrière

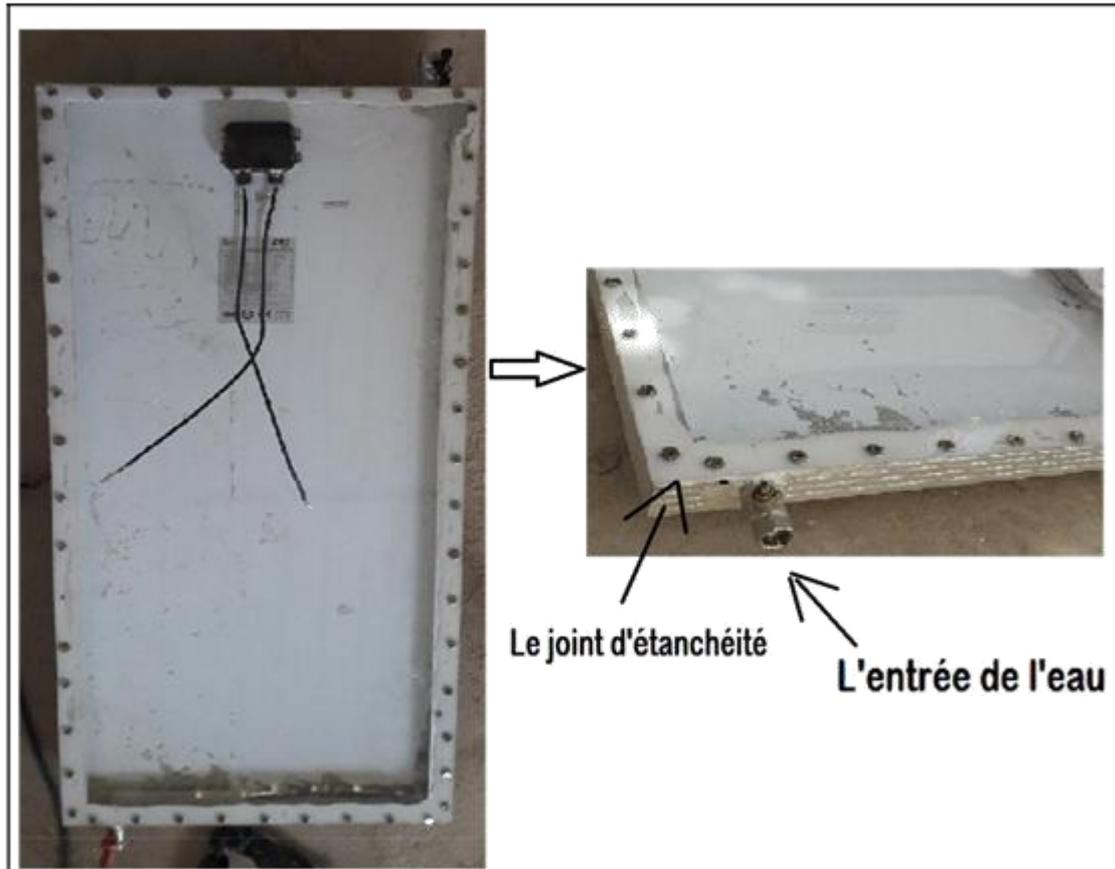


Figure III-26 Le système de refroidissement face arrière réalisé

La figure III.25 représente un schéma explicatif du système que nous avons conçu, et la figure III.26 représente une photo du system avant de le mettre sur le support.

Pour le refroidissement face arrière nous avons constaté que :

- La température du panneau a diminué de 62C° jusqu'à 27C° dans 2 min, puis elle s'est stabilisée à cette valeur.
- La tension a augmenté de 19.6V jusqu'à 22.1V.
- Nous avons arrêté le pompage de l'eau à 14 :42, après 20 minutes la température du panneau était 38C°, et après 22 minutes de plus la température du panneau a augmenté jusqu'à 42C°. La tension a cette température a diminué jusqu'à 19.4V.

III.3.3.2 Le bilan énergétique

$$P_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (62 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.894 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) =$$

72.95W Après le refroidissement nous avons augmenté la puissance jusqu'à :

$$P_e = P_c(W_c) * Irrad(Kwh) * (1 - (27 - 25) * 0.0041) = 100 * 0.894 * (1 - (56.21 - 25) * 0.0041) = 85.29W$$

Donc un gain en puissance de 12.34W qui représente 14.46% de la puissance du panneau

III.3.3.3 Le coût du prototype du système de refroidissement face arrière :

Composant	Coût Da
Panneau photovoltaïque	8000
Plexi-glace	1750
2 robinets métalliques	600
Thermocouple	1000
Tuyauterie	200
Total sans le panneau PV	3550

III.3.4 Conclusion

- Le système de refroidissement face avant par pulvérisateurs d'eau : nous avons réussi à augmenter le rendement de 10.3% avec un gain en énergie de 1.904Wh dans le premier essai et dans le deuxième essai nous avons augmenté le rendement de 7.2% avec un gain en énergie de 2.008Wh.
- Le système de refroidissement face avant par distributeur d'eau : le rendement du panneau PV à augmenter de 11.42%
- Le refroidissement face arrière nous a donné les meilleurs résultats en termes de température et de rendement. Nous avons réussi à améliorer le rendement du panneau PV de 14.46% et de diminuer la température du panneau jusqu'à 27 C°. Le cycle de refroidissement de ce système est le plus long (plus de 40 min) aussi nous avons récupéré de l'eau chaude à 42C°.

IV Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire de projet de fin d'études s'est porté sur la réalisation d'un système de refroidissement de panneaux photovoltaïques vu l'impact néfaste de la température sur le rendement de ces derniers.

Durant ces derniers mois nous avons pu réaliser différents types de systèmes de refroidissement dont 4 systèmes sur la face avant du panneau et deux systèmes sur la face arrière du panneau.

Les systèmes de refroidissement ont donné des résultats satisfaisants :

Les résultats obtenus dans chaque manipulation prouvent l'importance et la nécessité du refroidissement pour les panneaux photovoltaïques afin de maximiser leurs rendements et allonger leurs durées de vie.

Nous avons rencontré de nombreuses difficultés dans la conception de ces systèmes. Malgré ces obstacles, nous avons pu définir le rendement et les limites de chaque prototype.

Notons que les résultats de ce modeste travail constituent les bases d'un travail à poursuivre et à améliorer pour une étude beaucoup plus approfondie. En se basant sur l'effet du refroidissement de la face arrière pour concevoir une encapsulation des modules photovoltaïques avec un système de refroidissement optimisé. Un système de ce genre pourra faire l'objet d'un projet pilote pour une centrale photovoltaïque à très grand rendement.

Ainsi, les perspectives futures sont dans un premier temps l'étude détaillée des limites du système de refroidissement de la face arrière et l'optimisation du circuit d'eau et la consommation de la pompe par le dimensionnement de la pompe adéquate. L'amélioration des matériaux utilisés dans le prototype pour augmenter la résistance du système aux différents facteurs environnants et assurer la durée de vie optimale du système.

Nous espérons avoir posé une pierre dans l'édifice qui représente le futur du domaine photovoltaïque. Et nous encourageons nos futurs ingénieurs à s'orienter dans cet axe de recherche.

Bibliographie

- [1.1] El Amrani et al, article « Procédé d'encapsulation des modules photovoltaïques type mono-verre » Unité de développement de la Technologie du Silicium, 02, Bd Frantz Fanon, B.P. 399, Alger.
- [1.2] A.G. Imenes, D.R. Mills, Spectral beam splitting technology for increased conversion efficiency in solar concentrating systems: a review
- [1.3] A.L. Abdullah et al. Photovoltaic Thermal /Solar (PVT) Collector (PVT) System
- [1.4] Abdelilah SLAOU, *Électricité photovoltaïque -Matériaux et marchés*, Énergies | Ressources énergétiques et stockage, avril 2016.
- [1.5] ABOUBI Fatima Zohra, *Etude générale sur les étapes de fabrication d'une cellule solaire conventionnelle à base de silicium*, CRTSE, 2017/2018.
- [1.6] Anne Labouret, Pascal Cumunel, Benjamin Faraggi, Jean-Paul Braun, *Editions Cellules solaire, les bases de l'énergie photovoltaïque*, 5ème édition Techniques et Scientifiques Françaises, 2010.
- [1.7] BERREZZOUG Hanane, *PFE Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque*, Université Dr Moulay Tahar de Saïda, 2016.
- [1.8] Danijel Topi, 2017 *Influence of external factors on the performance of PV systems*, faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek
- [1.9] El-Shaer et al; 2014, *Effect of Light intensity and Temperature on Crystalline Silicon Solar Modules Parameters*, International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering Volume 4, Issue 8)
- [1.10] Fatiha BELLABES, Mohamed BENLEKKAM. Thermal regulation of photovoltaic's cells with a phase change material; juin 2016
- [1.11] Francis Domain, et Hervé Boileau, *chapitre' caractéristiques des cellules des panneaux PV'* université de Savoie Mont-Blanc, France
- [1.12] Gao Jianqiang, Zhang Ying, Liu Yanfeng, Gao Xin "Study on the Temperature Variation of the Water-cooled Photovoltaic Solar Template"; College of Energy and Power, North China Electric Power University

Bibliographie

- [1.13] *Grand Dictionnaire Encyclopédie Larousse*, volume 8, Larousse, 1984.
- [1.14] *HOURIA ALIOUA*, *el Watan* le 25 novembre 2018
- [1.15] Information resource management USA. Sustainable development, concept, methodologies, tools and applications
- [1.16] K.A. Moharram, Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels. 2013
- [1.17] La revue semestrielle éditée par SKTM n°=04 « Mawarid »
- [1.18] *Lyes M. El Watan article CDER 14/01/2018*
- [1.19] M.S. Abd-Elhady et al, May 2016 article “An innovative solution to the overheating problem of PV panels” *Energy Conversion and Management* 157.
- [1.20] Mohammed FACI et al, 2018 article « *Analyse des journées caniculaires au Sahara algérien* » Centre de Recherche Scientifique et Technique sur les Régions Arides (CRSTRA), Biskra, Algérie
- [1.21] Radhia DOUMANE, 2011 Thèse de magistère « *modélisation du vieillissement des panneaux PV* ». École doctorale pour l'énergie et le développement durable.
- [1.22] Redhayacine Mohammed et Abdellah Bouhanik, 2002, atlas solaire algérien, CDER
- [1.23] Safa BARA, *Etude, simulation et réalisation d'un trakeur solaire et MPPT par PIC16F877*, université BadiMoukhtar Annaba, 2015.
- [1.24] Swapnil Dubey et al, Temperature Dependent Photovoltaic (PV) Efficiency and Its
- [1.25] Thèse doctorat « *utilisation des énergies renouvelables influence de la température sur les performances du module PV* » Université Mohamed Khider – Biskra
- [1.26] Wolf M. Performance analyses of combined heating and photovoltaic power
- [1.27] Zeyad A. Haidara et al, Experimental investigation of evaporative cooling for enhancing photovoltaic panels efficiency
- [1.28] Pierre-Olivier LOGERAIS et al, 2013
- [1.29] N. MERZOUGUI et B. BADACHE, 2018, 25
- [1.30] Cătălin George Popovici et al ; 2015
- [1.31] BALI AMINA

Bibliographie

Webographie

- [2.1] <http://leblogdedoczaius.over-blog.com/article-la-vie-risquee-d-un-panneau-photovoltaique-68496059.html> → Consulté le 21/03/2019
- [2.2] <http://mediwatt.com/business-parcs-solaires-gisement-solaire.php>
- [2.3] <http://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm> → consulté le 06/02/2019
- [2.4] <http://www.panneaux-solaires-france.com/historique-panneaux-solaires> Fonctionnement panneaux photovoltaïques [En ligne] Cour d'électronique, Polytech'Nice Sophia Antipolis C. PETER – V 3.0 pdf, En ligne (consulté 13/03/2019)
- [2.5] <http://www.cfcim.org/wp-content/uploads/2017/02/Energie-solaire-maroc-20151.pdf> → consulté le 15/02/2019
- [2.6] <http://www.condor.dz/fr/les-panneaux-solaires> → Consulté le 06/02/2019
- [2.7] <http://www.crdp.ac-caen.fr/energies/Soleil.htm> (consulté 18/03/2019)
- [2.8] <http://www.energy.gov.dz/francais/index.php?page=potentiels> → consulté le 15/02/2019
- [2.9] <http://www.gazettenucleaire.org/~resosol/SolPass/Capteurs%20solaires%20cours%20E-PFL.pdf> → consulté le 15/02/2019
- [2.10] <http://www.panneaux-solaires-france.com/histoire-panneaux-solaires> Histoire des panneaux photovoltaïques [En ligne] CRDP de Basse-Normandie - thémat@doc - Les énergies renouvelables, c'est quoi? Énergie solaire. [En ligne] (consulté 02/02/2019)
- a. <http://www.photowatt.com/uploads/fiches-produit/Fiche-produit-PW2450F-Crystal-Advanced.pdf> → consulté le 05/02/2019
- [2.11] <https://cahier-de-prepa.fr/mp1-janson/download?id=1364> → 19/06/2019
- [2.12] https://en.wikipedia.org/wiki/Phasechange_material#Characteristics_and_classification → Consulté le 17/02/2019
- [2.13] <https://fr.irefeurope.org/Publications/Articles/La-couteuse-plaisanterie-des-energies-renouvelables> → Consulté le 05/04/2019
- [2.14] https://fr.wikipedia.org/wiki/Climat_en_Alg%C3%A9rie → Consulté le 21/04/2019

Bibliographie

- [2.15] https://fr.wikipedia.org/wiki/Condor_Electronics
- [2.16] https://fr.wikipedia.org/wiki/Effet_photo%C3%A9lectrique#Constatations_exp%C3%A9rimentales_de_l%C3%A9mission_photo%C3%A9lectrique Effet photovoltaïque, [En ligne] → consulté 20/03/2019
- [2.17] <https://lenergie-solaire.net/definitions/rayonnement-solaire.html> → consulté 17/02/2019
- [2.18] <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/photovoltaique-avantages.html> → Consulté le 07/04/2019
- [2.19] <https://particuliers.engie.fr/electricite/conseils-electricite/photovoltaique/probleme-panneau-photovoltaique.html> → Consulté le 22/03/2019
- [2.20] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Klimadiagramm-Algerien-metrisch-deutsch.png> → Consulté le 21/04/2019
- [2.21] <https://www.businessinsider.com/renewable-energy-will-be-cheaper-than-fossil-fuels-by-2020-2018-1?IR=T> → Consulté le 05/04/2019
- [2.22] https://www.cder.dz/IMG/pdf/Atlas_solaire_Algerien_CDER.pdf
- [2.23] <https://www.climatestotravel.com/climate/algeria> → Consulté le 21/04/2019
- [2.24] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/solaire-photovoltaique> → consulté le 01/01/2019
- [2.25] <https://www.ecosources.info/innovations/443-invisible-solar-une-tuile-canal-traditionnelle-a-energie-solaire> → Consulté le 07/04/2019
- [2.26] <https://www.energies.ma/Docs/Energie%20Solaire.pdf> → consulté le 16/02/2019
- [2.27] <https://www.google.com/search?q=d%C3%A9finition+r%C3%A9sistance+thermique&oq=d%C3%A9finition+r%C3%A9sistance+thermique&aqs=chrome..69i57j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> → consulté le 21/05/2019
- [2.28] <https://www.lechodusolaire.fr/megacell-lance-la-production-de-cellules-solaires-biface-de-haut-rendement/> → Consulté le 07/04/2019

Bibliographie

- [2.29] https://www.lepoint.fr/environnement/les-energies-vertes-bientot-moins-cheres-que-les-energies-fossiles-13-01-2018-2186271_1927.php → 19/06/2019
- [2.30] <https://www.liberte-algerie.com/actualite/la-centrale-solaire-de-ghardaia-mise-en-service-208000> → consulté le 06/02/2019
- [2.31] <https://www.sunibrain.com/> → consulté le 09/02/2019
- [2.32] <https://www.universalis.fr/encyclopedie/photovoltaique/1-historique/> → consulté 16/02/2019
- [2.33] Synthèse par Samy Bouchaib <https://portail.cder.dz/spip.php?article3990> → Consulté le 01/04/2019
- [2.34] www.itacanet.org, solarphotovoltaic → consulté 19/06/2019
- [2.35] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/matiere-semi-conducteur-3875/>
- [2.36] http://www.optique-ingenieur.org/fr/cours/OPI_fr_M05_C02/co/Contenu_05.html
- [2.37] <https://www.sortirdunucleaire.org/La-3eme-generation-de-cellules>
- [2.38] <https://cahier-de-prepa.fr/mp1-janson/download?id=1364>
- [2.39] <https://alpvcompany.com/2017/08/06/lenergie-renouvelable-en-algerie>
- [2.40] .ALLEMAGNE, INTERNATIONAL , L'USINE DE L'ENERGIE, 03/01/2019
- [2.41] leblogdedoczaius.over-blog.com