



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

MEMOIRE

Présenté

A L'UNIVERSITE DE TLEMCEM
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : " génie thermique et énergie renouvelable"

Par

CHIBI Zahra

*Effet du refroidissement sur
les performances des panneaux PV*

Soutenue le 15 juin 2016 devant les Jurés:

| | |
|---------------|--------------|
| Mme. SAIB. H | Encadreur |
| Mr. RETERI. A | Co-encadreur |
| Mr. AZZI .A | 'Président |
| Mr. SAIM .R | Examineur |
| Mr. KORTI.A.N | Examineur |

"La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi. Ici, nous avons réuni théorie et pratique: Rien ne fonctionne... et personne ne sait pourquoi !

Albert Einstein.

Je dédie ce mémoire à :

*Mes chers parents, toute ma famille et tous qui ont donné
une contribution de réalisation de ce mémoire.*

zahra

Remerciement

*Le modeste travail présenté dans ce mémoire a été réalisé au laboratoire du transfert de chaleur à la faculté de technologie de Tlemcen, sous la direction de madame **SAIB Hind** mon encadreur, Je tiens à vous exprimer mes remerciements les plus sincères pour m'avoir choisi et confié ce travail. Votre aide scientifique inestimable, votre soutien moral durant les moments difficiles, votre compréhension et votre gentillesse m'ont beaucoup marqué. J'espère que ce travail témoigne de ma profonde reconnaissance et de ma haute considération.*

*En second lieu, je tiens à remercier **Mr RETERI Ahmed** co-encadreur, son précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.*

*Monsieur le Président de jury **AZZI .A**, vous me faites le grand honneur de présider le jury de ce mémoire. Soyez assuré de mon profond respect.*

*vifs remerciements vont également aux **Mr KORTI.A.N** et **Mr SAIM .R** pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant de l'examiner et de l'enrichir par leurs propositions. Je vous dis merci beaucoup pour tout vos efforts que vous avez faits pendant tout le cursus universitaire. Vos qualités humaines et professionnelles sont un modèle à suivre.*

*Je tient a remercier **BENAMARA Abdellatif** le responsable du laboratoires et la responsable de laboratoire de l'électronique pour leur aide dans tout la période d'expérience leur gentillesse et leur disponibilité.*

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Avec tous mes respects

Sommaire

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Dédicace. | |
| Remerciement. | |
| Table des matières. | |
| Liste des figures. | |
| Liste des tableaux. | |
| Nomenclature. | |
| Introduction générale..... | 1 |
| Chapitre I: Recherche bibliographique. | |
| Introduction : | 3 |
| Chapitre II: Généralités sur les capteurs solaires. | |
| II.1. Introduction : | 14 |
| II.2. Energie solaire thermique : | 14 |
| II.2.1 Capteurs thermiques : | 14 |
| A. Capteurs solaires non vitré : | 14 |
| B. Capteurs vitrés: | 15 |
| C. Capteurs sous vide : | 16 |
| D. Capteurs à concentration : | 17 |
| II.2.2. Avantages et inconvénients des capteurs solaires thermiques : | 18 |
| a) Avantages: | 18 |
| b) Inconvénients: | 18 |
| II.3. Energie solaire photovoltaïque : | 18 |
| II.3.1. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque : | 18 |
| II.3.2. Composition d'une cellule PV : | 19 |
| 1. Couche semi-conductrice de type p : | 19 |
| 2. Couche semi-conductrice de type n : | 19 |
| 3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière : | 19 |
| 4. Couche anti réflexion : | 19 |
| II.3.2. Types de cellules photovoltaïques : | 19 |
| A. Cellules photovoltaïques inorganiques : | 19 |
| a) Cellules au silicium monocristallin : | 20 |
| c) Silicium en ruban autosupporté : | 20 |
| d) Silicium amorphe : | 20 |
| B. Cellule photovoltaïque organique : | 22 |
| II.3.3 Panneaux solaire photovoltaïque: | 23 |
| A. Panneau solaire : | 23 |
| B. Technologie des capteurs : | 24 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.3.4 Avantages et inconvénients des modules photovoltaïques : | 25 |
| II.4 Capteurs solaires hybrides : | 26 |
| II.4.2 Classification des capteurs hybride <i>PV/T</i> : | 27 |
| 1. Capteur hybride <i>PV/T</i> à eau : | 27 |
| 2. Etude d'un capteur hybride <i>PV/T</i> à air : | 28 |
| II.5 Paramètres régissant le fonctionnement d'un capteur solaire plan: | 30 |
| 1) paramètres externes : | 30 |
| 2) paramètres internes : | 30 |
| II.6 Modèles mathématiques pour calculer les performances d'un capteur solaire hybride: .. | 31 |
| 1. Calcul du débit massique de l'air : | 31 |
| 2. Calcul de la puissance utile : | 31 |
| 3. Calcul du rendement thermique: [49] | 31 |
| 4. Puissance électrique : | 32 |
| 5. Calcul du rendement électrique : | 32 |

Chapitre III: Matériels utilisés

| | |
|-------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction : | 33 |
| III.2 Matériels utilisés : | 33 |
| III.2.1 Cellules solaires photovoltaïques : | 33 |
| III.2.2 Panneau solaire photovoltaïque : | 34 |
| III.2.3 : Unité de transfert thermique convective : | 35 |
| III.2.4 Ventilateur : | 36 |
| III.2.5 L'anémomètre à thermistor : | 36 |
| III.2.6 Unité de transfert thermique radiatif H110C : | 36 |
| III.2.7 Radiomètre : | 37 |
| III.2.8 Projecteurs utilisés : | 38 |
| III.2.9 Multimètres : | 39 |
| III.2.10 Thermocouples : | 39 |
| III.2.11 Potentiomètre : | 40 |

Chapitre IV: Expériences.

| | |
|-------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction : | 42 |
| IV.2 Préparation du panneau photovoltaïque : | 42 |
| IV.2.1 Etapes suivis : | 42 |
| | 45 |
| IV.2.2 Montage électrique réalisé: | 46 |
| IV.3 Description de l'installation : | 48 |
| 1) Cas de la cellule (panneau réalisé). | 48 |
| 2) Cas d'un panneau polycristallin commercial : | 49 |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.4 : variation de l'intensité du rayonnement | 49 |
| IV.5 difficulté de travail: | 51 |
| Chapitre V: Interprétation des résultats. | |
| V.1 Introduction : | 53 |
| V.2 Variation de l'intensité du rayonnement en fonction de distance :..... | 53 |
| V.3 : Variation de la température générés par le projecteur en fonction l'intensité du rayonnement. | 54 |
| V.4 Partie A : panneau réalisé. | 54 |
| V.4.1 Détermination des caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque polycristallin:..... | 54 |
| Etape I : Echauffement de la cellule. | 55 |
| Etape II : Refroidissement de la cellule à l'air libre. | 56 |
| V.4.2 Effet du vitrage :..... | 57 |
| V.4.3 Influence de la température de la cellule :..... | 60 |
| V.4.4 Effet du débit d'air : | 60 |
| V.5 Partie B : Panneau photovoltaïque polycristallin commercial..... | 63 |
| V.5.1 Effet de l'intensité du rayonnement : | 63 |
| V.5.2 Effet de refroidissement du panneau photovoltaïque par la circulation d'air à travers la cheminée..... | 66 |
| V.5.3 Effet de variation de débit d'air | 71 |
| Conclusion. | |
| Référence. | |
| Résumé. | |

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig.I. 1: A) vue du capteur hybride <i>PV/T</i> , B)vue du capteur hybride <i>PV/T</i> et module témoin. | 5 |
| Fig.I 2: Banc d'essai du capteur solaire <i>PV/TH</i> hybride à air. | 5 |
| Fig.I. 3: coupe du capteur solaire <i>PV/T</i> hybride à air à ailettes. | 6 |
| Fig.I. 4: a)- module <i>PV</i> entre verre et tedlar, b)- module <i>PV</i> entre verre et verre. | 7 |
| Fig.I. 5: Variation du rendement thermique dans le capteur verre-verre et verre-tedlar avec différent débit. | 7 |
| Fig.I. 6: Température d'entrée et de sortie d'eau du capteur hybride. | 8 |
| Fig.I. 7: Module photovoltaïque et absorbeur en tube et feuille. | 8 |
| Fig.I. 8: Evolution des températures d'entrée et de sortie du <i>PV/T</i> . | 9 |
| Fig.I 9: Prototype et schéma d'un capteur hybride à jets empiétant. | 10 |
| Fig.I 10 : Capteur hybride photovoltaïque-thermique avec lame | 11 |
| Fig.I 11: Banc d'essai du capteur bi-fluide. | 12 |
| Fig.I. 12: Schéma du capteur bi-fluide et photo du module <i>PV</i> transparent. | 13 |
| Fig.I. 13: Variation du rendement thermique et la différence de la température en fonction de débit massique de l'air et de l'eau respectivement. | 13 |
| | |
| Fig.II. 1: Capteur solaire thermique. | 14 |
| Fig.II. 2: Capteur solaire moquette. | 15 |
| Fig.II. 3: Capteur solaire plan vitré. | 15 |
| Fig.II. 4: Tube sous vide. | 16 |
| Fig.II. 5: Capteur sous vide. | 16 |
| Fig.II. 6: Capteur sous vide a caloduc. | 17 |
| Fig.II. 7: Capteur à concentration. | 17 |
| Fig.II. 8 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque. | 19 |
| Fig.II. 9: Exemple d'application des cellules solaires. | 22 |
| Fig.II. 10: Cellule photovoltaïque organique. | 22 |
| Fig.II. 11: Panneaux photovoltaïque. | 23 |
| Fig.II. 12 : Différent processus appliquer sur le silli.cium | 24 |
| Fig.II. 13: Effet photovoltaïque. | 25 |
| Fig.II. 14: Capteurs solaires hybride <i>PV/T</i> à eau. | 28 |
| Fig.II. 15: Coupe transversale dans un capteur hybride <i>PV/T</i> à air. | 29 |
| Fig.II. 16: Capteur de concentration. | 29 |
| Fig.III. 1: Cellule photovoltaïque monocristalin (face avant et arrière). | 33 |
| Fig.III. 2:Cellule photovoltaïque polycristalin d'une tension 0.6V. | 33 |
| Fig.III. 3 : Panneau solaire photovoltaïque. | 34 |
| Fig.III. 4 : Unité de transfert thermique convective. | 35 |
| Fig.III. 5 : Ventilateur. | 36 |
| Fig.III. 6: anémomètre à thermistor. | 36 |
| Fig.III. 7 : Unité de transfert thermique radiatif H110C | 37 |
| Fig.III. 9: Radiomètre. | 38 |
| Fig.III. 8: Unité de transfert thermique H110C. | 37 |
| Fig.III. 10 : Projecteurs non utilisés. | 38 |
| Fig.III. 11 : Projecteur utilisé dans les expériences. | 39 |
| Fig.III. 12: Multimètre. | 39 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig.III. 13: Thermocouples. | 40 |
| Fig.III. 14: (a) potentiomètre 1kΩ.(b) potentiomètre 2kΩ. | 41 |
| | |
| Fig. IV. 2: soudage des fils (positive et négative) sur la cellule photovoltaïque polycristalin..... | 43 |
| Fig. IV. 1 : Cellule photovoltaïque | 43 |
| Fig. IV. 4 : Vue de au dessous de la cellule PV | 44 |
| Fig. IV. 3: soudage des thermocouples sur la cellule photovoltaïque polycristalin. ... | 44 |
| Fig. IV. 5 : cellule PV avec vitrage..... | 45 |
| Fig. IV. 6: cellule PV avec vitrage poser sur le cheminer. | 45 |
| Fig. IV. 7 :panneau photovoltaïque polycristalin..... | 46 |
| Fig. IV. 8 : Montage électrique réalisé. | 46 |
| Fig. IV. 9 Montage électrique réalisé dont le multimètre de couleur noir est utilisé comme une charge. | 47 |
| Fig. IV. 10 Montage électrique réalisé :le potentiomètre c la charge électrique. | 47 |
| Fig. IV. 11 : Refroidissement de la cellule sous un rayonnement de 800W/m ² | 48 |
| Fig. IV. 12: Refroidissement du panneau photovoltaïque sous un rayonnement de 300W/m ² | 49 |
| Fig. IV. 13 :position de projecteur pour R=800W/m ² | 50 |
| Fig. IV. 14:position de projecteur pour R=450W/m ² | 50 |
| Fig. IV. 15:position de projecteur pour R=300W/m ² | 51 |
| Fig. IV.16: cellules cassé. | 52 |
| | |
| Fig. V. 1: Unité de transfert radiative..... | 53 |
| Fig. V. 2 : Variation de l'intensité du rayonnement en fonction de la distance. | 53 |
| Fig. V. 3: Variation de la température générés par le projecteur en fonction l'intensité du rayonnement. | 54 |
| Fig. V. 4: cellule photovoltaïque sans vitrage.. | 55 |
| Fig. V. 5: Evolution de la température en fonction du temps..... | 55 |
| Fig. V. 6: Variation de la température de cellule et la puissance électrique en fonction du temps. | 56 |
| | |
| Fig. V. 7: Cellule photovoltaïque polycristallin avec vitrage..... | 57 |
| Fig.V. 8: Evolution de la température de la cellule, le tedlar et | 58 |
| Fig. V. 9: Evolution de la température de la cellule et le tedlar en fonction de temps avec et sans vitrage. | 59 |
| Fig. V. 10: Variation de la température de la cellule T _{cell} et le rendement électrique en fonction du temps. | 60 |
| Fig. V. 11: Variation du rendement électrique et la différence de température de sortie et d'entrée d'air en fonction de débit massique..... | 61 |
| Fig. V. 12: Variation du rendement thermique et la différence de température de sortie et d'entrée d'air en fonction de débit massique..... | 62 |
| Fig. V. 13: Influence de l'intensité de rayonnement sur la température de haut du panneau photovoltaïque. | 63 |
| Fig. V. 14: Influence de l'intensité de rayonnement sur la puissance électrique. | 64 |
| Fig.V. 15: Influence de l'intensité de rayonnement sur le rendement électrique. | 65 |
| Fig.V. 16: Effet du refroidissement sur la température du panneau pour I=450w/m ² et I=800w/m ² | 66 |
| Fig.V. 17 : Influence de débit et l'intensité du rayonnement sur la puissance électrique | 67 |
| Fig.V. 18 : Influence de débit et l'intensité du rayonnement sur la puissance électrique. | 68 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Fig.V. 19: Evolution de la température de sortie d'air | 69 |
| Fig.V. 20 : Influence de l'intensité du rayonnement sur le rendement thermique. | 70 |
| Fig.V. 21 : Effet du refroidissement sur le rendement électrique et la différence de la température..... | 71 |
| Fig.V. 22 : Influence du débit sur le rendement thermique et différence de la | 72 |

Liste des tableaux

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau. II. 1: Caractéristique des trois types des cellules de silicium | 20 |
| Tableau. II. 2: Caractéristique physique du composant du capteur <i>PV/T</i> | 25 |
| Tableau. II. 3: Quatre principales technologies de production de la chaleur et/ou électricité par voie thermodynamique..... | 28 |
| Tableau.III. 1: Caractéristique du panneau photovoltaïque. | 34 |

Nomenclature

- PV/T: Photovoltaïque thermique.
- PV: Photovoltaïque.
- EVA: Ethyl Vinyl Acrylate.
- PV/TH: Photovoltaïque thermique.
- T_{ef} : Température d'entrée du fluide caloporteur.
- T_{sf} : Température de sortie du fluide caloporteur.
- Q_u : Puissance thermique utile.
- \dot{m} : Débit massique.
- C_p : Chaleur spécifique.
- T_s : Température de sortie du fluide caloporteur.
- T_e : Température d'entrée du fluide caloporteur.
- I : Intensité de rayonnement.
- A : Surface du panneau photovoltaïque.
- S : Section de passage du fluide caloporteur
- P : Puissance électrique.
- I_c : Intensité du courant.
- U : Tension électrique.
- CPV: Systèmes à concentration photovoltaïque.
- CPV/T : Capteur solaire hybride PV/T de concentration .
- T_{cell} : Température de la cellule.
- T_{ted} : Température de tedlar.
- T_h : Température du panneau en haut.
- T_b : Température du panneau en bas.
- e : Epaisseur du vitrage.
- ΔT : Différence de la température entre l'entrée et la sortie d'air.
- T_{amb} : Température ambiante.
- η_{th} : Rendement thermique.
- η_{ele} : Rendement électrique.
- V : Vitesse de l'air.
- ρ : Masse volumique de l'air.
- R : Intensité du rayonnement.

Introduction générale

Le gisement solaire représente l'une des sources d'énergie non polluante et économique de plus en plus demandée au niveau international. L'énergie produite par le rayonnement solaire est à l'origine de toute la vie sur la planète. C'est elle qui permet la croissance des végétaux, l'évaporation de l'eau de mer créant ainsi le cycle de l'eau. Cette énergie peut donc être indirectement utilisable par exemple en brûlant du bois pour créer de la chaleur, biomasse actuelle, ou bien en utilisant du pétrole ou du charbon biomasse fossile emprisonnée dans la profondeur de la croûte terrestre. Cette énergie solaire peut aussi s'utiliser directement en étant convertie en énergie électrique ou en énergie thermique.

Un capteur hybride photovoltaïque thermique permettant de réaliser simultanément une conversion électrique du rayonnement solaire et une récupération de chaleur véhiculée par ce rayonnement. Cette cogénération énergétique rend évidemment très intéressante l'utilisation de tels systèmes dans divers domaines.

Durant le fonctionnement réel des modules photovoltaïques, la caractérisation expérimentale montre que le rendement électrique diminue de façon significative avec la montée en température des cellules photovoltaïques exposées au soleil. La perte de l'énergie électrique peut atteindre 15% à 20% si aucun refroidissement du module n'est prévu. La température des cellules photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée d'un fluide caloporteur. Cela permet d'éviter une chute brutale du rendement électrique du module photovoltaïque tout en assurant une récupération d'une énergie thermique. [1]

Notre travail porte sur une étude expérimentale effectuée au sein de laboratoire de transfert thermique à la faculté de technologie université de Tlemcen, dans le but d'analyser l'effet du rayonnement sur les performances électriques et thermique du capteur hybride (photovoltaïque thermique) *PVT*, ainsi que l'effet du son refroidissement.

Le présent travail est structuré en cinq chapitres, une introduction et une conclusion générale.

Le premier chapitre est consacré à un bref historique sur les capteurs solaires, plus une recherche bibliographique des différents travaux expérimentale sur les capteurs solaire hybride PV/T.

Les panneaux photovoltaïques, capteurs thermiques et collecteurs hybrides, font l'objet du second chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons cité le matériel utilisé dans nos expériences.

Le quatrième chapitre a pour but de décrire les étapes d'expériences effectuées au sein de laboratoire pédagogique de transfert de chaleur.

Nous présenterons dans le cinquième chapitre les résultats obtenus pour le panneau réalisé à partir d'une cellule photovoltaïque polycristallin ainsi le panneau photovoltaïque polycristallin commerciale sous forme des graphes tracés avec l'origine 8 accompagnés de leurs interprétations physiques.

Introduction :

Diverses études expérimentales et théoriques ont été faites pour le développement de capteur hybride *PV/T*. La plupart des recherches dans ce domaine essaient d'évaluer la performance thermique et électrique et d'analyser l'économie des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire fournie. Pour cela, certains auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles thermiques analytiques ou mis ensuite une analogie électrique. Autre recherche visant à optimiser les performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (pente, orientation de la composante...) ou par des configurations géométriques innovantes proposées. Ainsi, elles sont basées sur le changement dans les dimensions ou les propriétés des matériaux constitutifs (isolation thermique, absorbeur, cellules photovoltaïques ...) ou des fluides caloporteurs (air, eau ...). Ces améliorations ont pour but d'augmenter la quantité d'énergie solaire absorbée et que le transfert de chaleur entre le réfrigérant et l'absorbant afin de réduire les pertes de chaleur avec l'extérieur. Les performances du capteur peuvent être calculé en tenant compte de la distribution de température entre les deux tubes du capteur, et en supposant que le gradient de température dans la direction d'écoulement est négligeable (Duffie et al., 1991).

Les premières études expérimentales portant sur des systèmes *PV/T* ont été réalisées par la modification d'un module photovoltaïque commercial et de modernisation avec un appareil de collecte chaleur. Les modules photovoltaïques ainsi transformées furent également utilisées par les chercheurs au cours de leurs efforts pour évaluer la viabilité économique de la technologie, puisque les produits commerciaux n'étaient pas disponibles à l'époque.[2]

Wolf [3] en 1976, effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur, Par la suite Kern et Russell, 1978 [4], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. En 1979 Hendrie [5], présente un modèle théorique sur les systèmes *PV/T*. En 1981 Raghuraman [6] présente des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans *PV/T* à eau ou à air. Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman [7] développent des

logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes hybride PV/T à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et d'autres [8] proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV. En 1991 Bhargava et d'autres [9] et Prakash, en 1994 [10], présentent les résultats de leurs travaux sur l'effet du débit et de canal d'air. Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont été étudiés par Sopian et d'autres, en 1995 et 1996 [11]. Dans les travaux précités, le rendement thermique de ces systèmes PV/T était dans la gamme de 45 à 65 %. Ensuite Bergene et Lovvik, 1995 [12], ont analysé le transfert de l'énergie entre les différents composants du système hybride PV/T utilisant du liquide comme fluide caloporteur.

En 1999 Garg et Adhikari [13] ont étudié le système PV/T utilisant de l'air pour le chauffage en simple et en double vitrage. Et en 2000 Hauser et Rogash [14] ont utilisé ces systèmes dans des immeubles.

Le capteur hybride PV/T avec réservoir d'eau chaude a été proposé par Huang et d'autres, en 2001 [15] une autre conception des systèmes PV/T a été incluse récemment par Zondag et d'autres, en 2002 et 2003 [16] [17]. EN 2005, Zondag [18] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult [19]. Parmi les premières études recensées par Zondag [18], certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation.

En 2006 [20] K. Touafek, A. Malek et M. Haddadi ont étudié le capteur hybride expérimentalement à travers le prototype réalisé. Pour les capteurs hybrides, on considère le rendement total qui est la somme du rendement électrique et du rendement thermique pour des conditions de rayonnement choisies. Ils ont obtenu un rendement thermique égal à 60 % du capteur hybride sans vitre et de 70 % pour le capteur hybride avec vitre.

Le rendement électrique a été amélioré pour le capteur non recouvert par rapport au capteur témoin. Par contre, pour le capteur recouvert, il a été diminué de 18 % par rapport au capteur témoin. Les résultats trouvés expérimentalement se concordent avec la théorie.



A)



B)

Fig.I. 1: A) vue du capteur hybride *PV/T*, B)vue du capteur hybride *PV/T* et module témoin.

En 2006, Tiwari et autre [21] ont présenté une étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire *PV/TH* à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur solaire est constitué de deux modules *PV* de 0.61m^2 de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante non corrosive de Tedlar. Le module *PV* est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'*EVA* et protégées par une couche de verre. Des ventilateurs disposés à l'entrée de la lame d'air située entre le Tedlar et une couche isolante en bois permettent la ventilation forcée des modules *PV* en face arrière. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système *PV/T* à air d'environ 18 %.



Fig.I 2: Banc d'essai du capteur solaire *PV/TH* hybride à air

En 2007, Othman et autres [22] ont amène l'étude théorique et expérimentale des productivités thermique et électrique d'un capteur solaire *PV/T* hybride à air a double circulation d'air. Le composant est constitue de deux lames dans lesquelles l'air circule successivement. La première lame d'une hauteur de 16.5 cm est comprise entre une couche de verre en face avant et les modules *PV*. La seconde lame d'air dont l'épaisseur est comprise entre 30 et 120 cm, se situe en sous-face des modules *PV*. La face arrière des modules est munie d'ailettes verticales n'étant pas en contact avec la plaque arrière du capteur solaire. Ces ailettes permettent d'accroître les transferts thermiques convectifs entre l'air et les modules *PV* (Figure.I.3). La surface totale couverte par les cellules *PV* en silicium monocristallin est de 0.38 m².

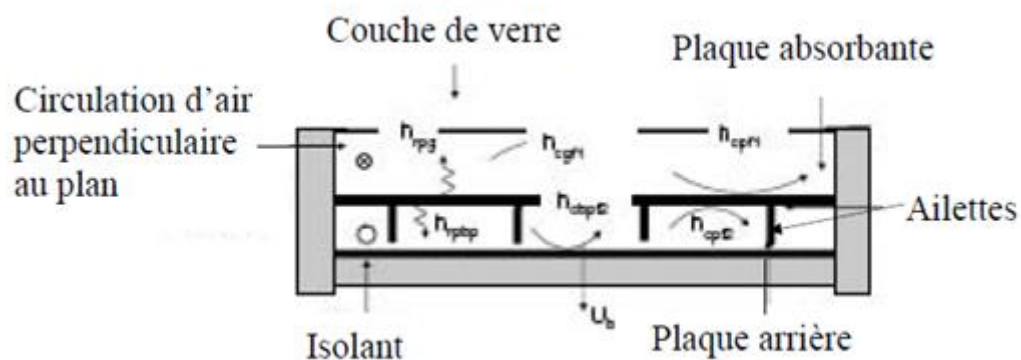


Fig.I. 3: coupe du capteur solaire *PV/T* hybride à air à ailettes.

Othman et al développent un modèle thermique unidirectionnel en régime permanent de ce composant hybride. La confrontation des données de la simulation réalisée par la suite avec les résultats d'une étude expérimentale effectuée a démontré qu'une utilisation des ailettes permet d'améliorer à la fois le rendement thermique et les performances électriques du composant hybride.

En 2008 A.S. Joshi et autres [23] ont fait une étude pour évaluer les performances thermique d'un capteur hybride (*PV/T*) à air. Deux types du Module photovoltaïque (*PV*) ont été étudiés pour comparer ces performances. Le premier est un module *PV* placé entre verre et tedlar et le deuxième est placé entre verre-verre. Les deux modules *PV* sont comparés pour le climat composite de New Delhi. Les expériences ont montré que le collecteur d'air hybride avec module photovoltaïque placé entre

verre-verre donne une meilleure efficacité thermique globale varie entre 43,4 à 47,4% qu'avec un module photovoltaïque placé entre verre et tedlar varie entre 41,6 à 45,4%.

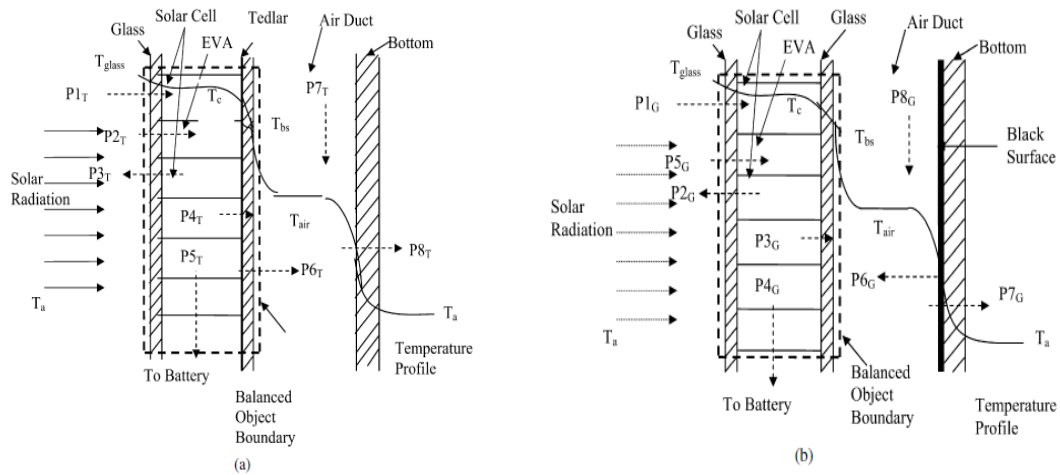


Fig.I. 4: a)- module PV entre verre et tedlar, b)- module PV entre verre et verre.

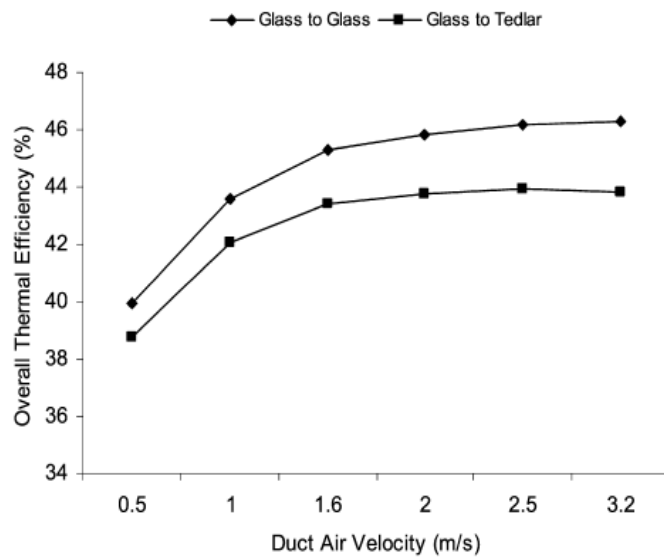


Fig.I. 5: Variation du rendement thermique dans le capteur verre-verre et verre-tedlar avec différent débit.

En 2011 K. Touafek , A. Ouled Sidi Abdennacer et N. Mezzi .[24] ont étudié

expérimentalement un capteur solaire hybride en feuille et tubes. Pour cela, ils ont réalisés un prototype à l'Unité de Recherche Appliquée en Energie Renouvelable de Ghardaïa et ils ont entamés des mesures de températures, de rendement thermique sur une période de temps qu'ils ont permis la détermination pratique de toutes les caractéristiques électriques et thermiques de ce nouveau capteur.

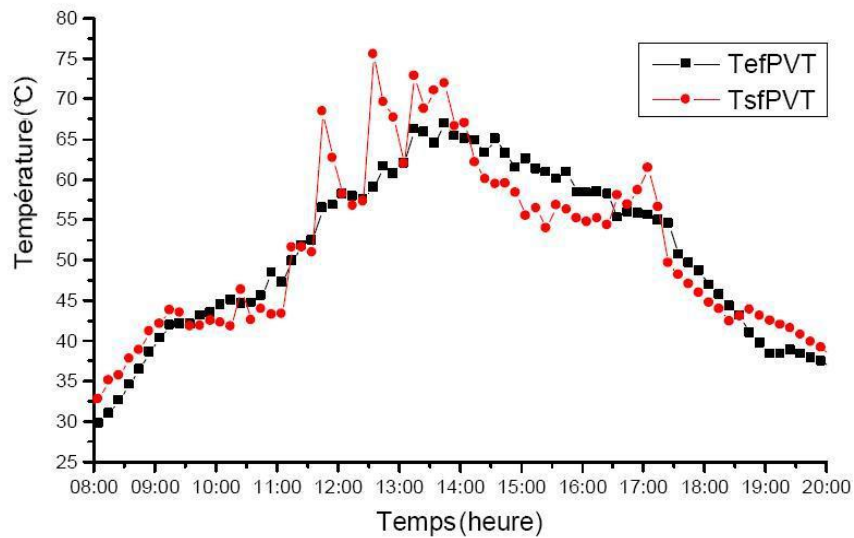


Fig.I. 6: Température d'entrée et de sortie d'eau du capteur hybride.



Fig.I. 7: Module photovoltaïque et absorbeur en tube et feuille.

Le capteur hybride photovoltaïque thermique est constitué d'un module photovoltaïque et d'un système thermique logé dans un seul capteur. Ceci permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée.

La production de l'énergie totale (électrique et thermique) du capteur hybride *PV/T* dépend des paramètres d'entrées: l'énergie lumineuse, la température ambiante et la vitesse du vent de sortie qui est la température de fonctionnement du système, cette production dépend aussi du mode d'extraction de la chaleur. La configuration en plaque et tubes de l'absorbeur du capteur hybride est comparable et celle utilisée dans les capteurs thermiques plan avec un avantage de produire en plus de l'énergie thermique de l'électricité.

En 2014 A. Khelifa , H. Ben Moussa , K. Touafek , M. Adouane et I. Tabet [25] cette étude est basée sur une approche qui combine les deux résultats numériques et expérimentaux et qui concerne la faisabilité du chauffage de l'eau par les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques. Sur la base de méthodes de transformation et les propriétés des matériaux améliorés, un banc d'essai de système *PV/T* efficace a été conçu et testé. Ce capteur est fait de cellules photovoltaïques connectées à la surface d'un échangeur de chaleur plan, et sur la face arrière par un matériau d'isolation thermique. Le capteur ainsi réalisé est installé dans un système permettant le chauffage de l'eau.

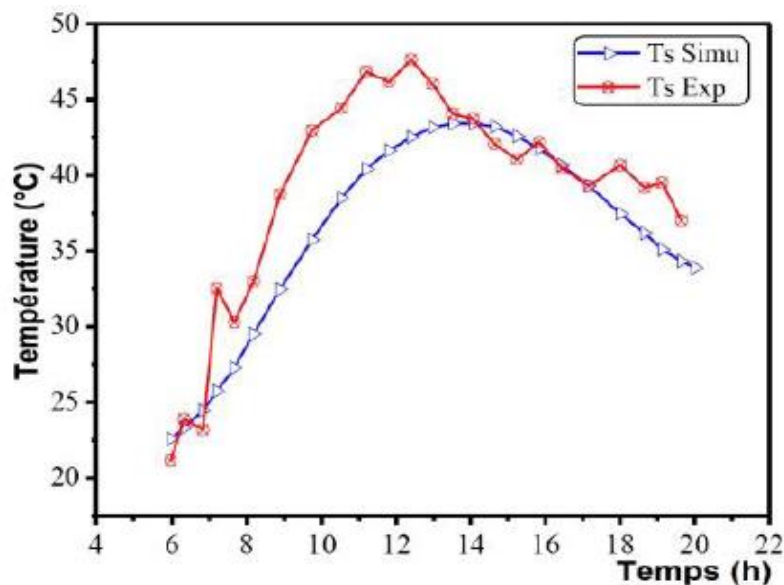


Fig.I. 8: Evolution des températures d'entrée et de sortie du *PV/T*

Tous les chercheurs concluent qu'une étude économique en utilisant des produits commerciaux réels est nécessaire pour l'évaluation précise de la faisabilité d'un système *PV/T*. Quelques études localisées ont été effectuées, mais au niveau expérimental et sans prendre en compte les caractéristiques des produits disponibles dans le commerce, donc leur applicabilité à des applications commerciales sont limitées.

En 2014 Sébastien A. Brideau , Michael R. Collin [26] ont développé un modèle prédictif d'un collecteur *PV/T* en utilisant des jets empiétant, (un coefficient de transfert de chaleur élevée peut être obtenue entre la plaque absorbante et l'air à l'aide de jets d'impact) et un prototype a été construit et exploité dans une installation extérieure afin de valider et tester les capacités du modèle. Dans l'ensemble, le modèle a été trouvé pour produire des résultats relativement précis. Plus de 8 jours d'essais, les pires prévisions quotidiennes totales du modèle énergétique étaient à moins de 10% et 11% de la valeur expérimentale pour les sorties thermiques et électriques respectivement. L'influence de l'étape de temps et de masse thermique sur la précision du modèle ont été examinés. Un modèle pour un collecteur *PV/T* à jet d'empiètement était développé. Une validation expérimentale a été réalisée et un bon accord a été trouvé entre le modèle et les résultats expérimentaux. La constante de temps de collecteur a été trouvée être d'environ 15 min. Il a été également constaté que la modélisation de la masse thermique du collecteur a peu d'effet sur les résultats et qu'un pas de temps la taille d'une heure peut être appropriée.

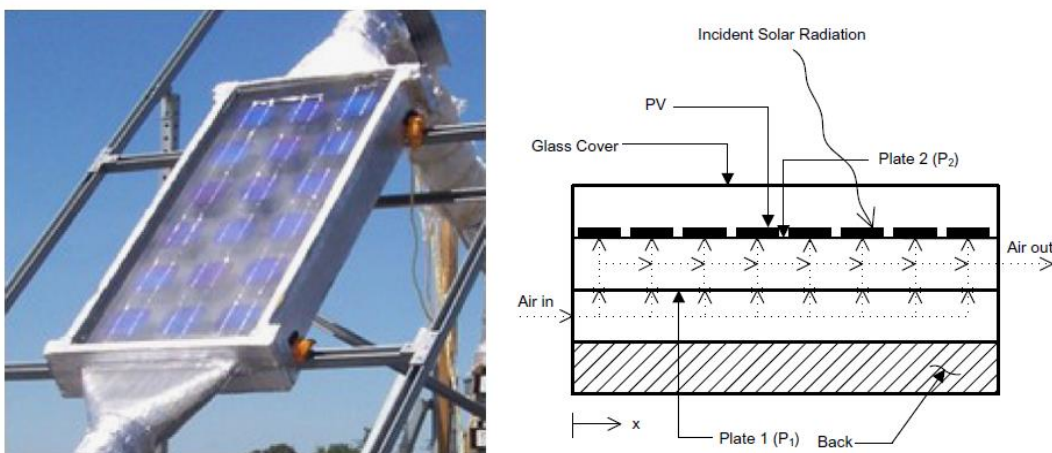


Fig.I 9: Prototype et schéma d'un capteur hybride à jets empiétant.

En 2015 yawovi nougblega et autres [27] ont fait une analyse des performances thermiques et électriques de deux types de capteurs solaires hybrides photovoltaïque-thermiques à air intégrables en toitures des bâtiments. Pour ces capteurs hybrides, les cellules PV sont isolées soit avec une lame d'air confinée ou soit avec un gap vide. La modélisation des transferts de chaleur dans les systèmes est effectuée en 2D et en régime transitoire, suivant l'approche nodale. Le code numérique développé a été validé et a permis d'analyser les comportements thermiques ainsi que les efficacités thermique et électrique des capteurs. L'optimisation des paramètres fonctionnels est ensuite effectuée et présentée.

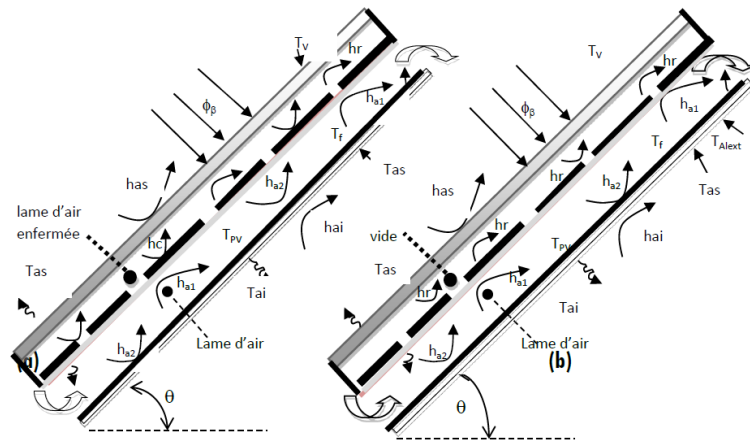


Fig.I 10 : Capteur hybride photovoltaïque-thermique avec lame d'air enfermée (a) et sous vide (b).

Cette étude a montré que les cellules solaires sont les éléments les plus surchauffés dans un capteur donné quelle que soit la position ou l'environnement des cellules photovoltaïques. La boucle d'air confinée isole thermiquement les cellules PV et accroît le rendement électrique des cellules PV. Le capteur hybride photovoltaïque-thermique sous vide est thermiquement plus performant que le capteur hybride photovoltaïque-thermique avec lame d'air confinée. Un débit optimal maintenu par un ventilateur permet aussi de le rendre électriquement performant. Dans les deux types de capteurs, les températures des éléments des capteurs augmentent sensiblement avec la densité du flux de rayonnement solaire incident alors qu'elles diminuent pour des débits d'air plus grands

En 2016 M.Y.Othman , S.A. Hamid , M.A.S. Tabook , K.Sopian , M.H. Roslan , Z. Ibarahim [28] L'objectif de son travail est d'étudier les performances d'un capteur solaire *PVT* construit et testé en laboratoire d'énergie solaire, Faculté des sciences et de la technologie, Université Kebangsaan Malaisie avec double passe d'air et les tubes d'eau en haut et en bas de la plaque absorbante. Le concept de cette combinaison est représenté sur la Fig. I.12. Le collecteur est composé de deux modules photovoltaïques transparents parallèles, plaque absorbant fixé avec un tube d'eau et le cadre de collecteur rempli avec une isolation en fibre de verre. Les valeurs expérimentales sur la température de la cellule solaire, la température de l'eau et de la température de l'air sur les deux canaux ont été mesurées. La performance du système est calculée sur la base équation Hottele-Whilliere-Bliss. Sous environnement intérieur contrôlé au niveau de rayonnement 800 W / m^2 , débit d'air de $0,05 \text{ kg / s}$ et le débit de l'eau à $0,02 \text{ kg / s}$, la température de sortie $27,4 \text{ C}$. Ce sont les meilleurs résultats de l'expérience globale. Le rendement électrique obtenu était de 17% avec une puissance électrique moyenne de 145 W efficacités thermique était de 76%.



Fig.I 11: Banc d'essai du capteur bi-fluide

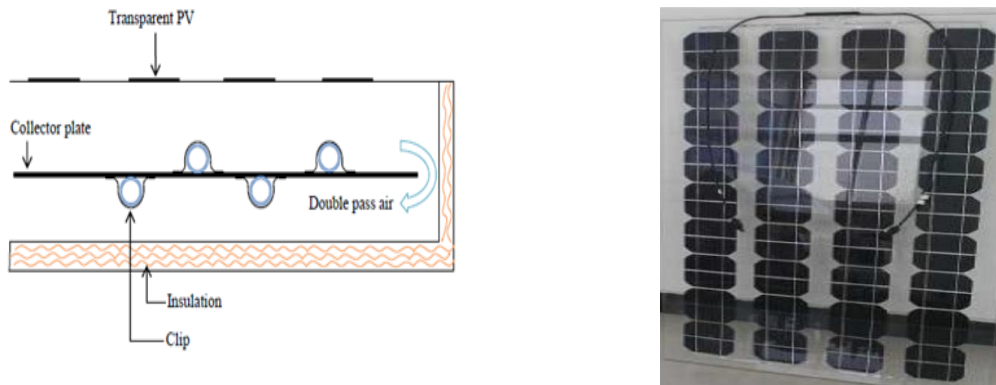


Fig.I. 12: Schéma du capteur bi-fluide et photo du module PV transparent.

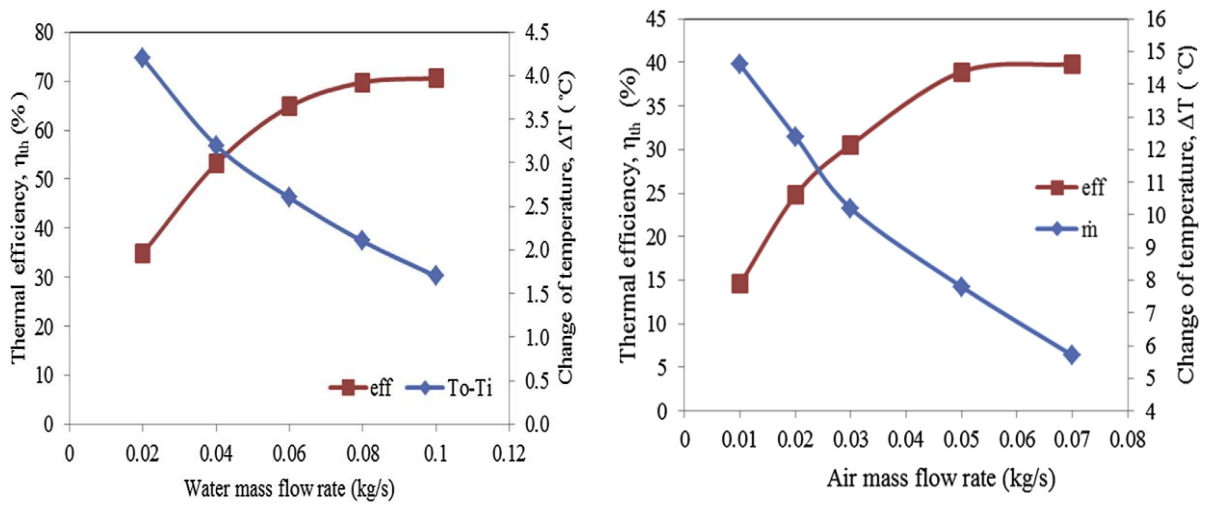


Fig.I. 13: Variation du rendement thermique et la différence de la température en fonction de débit massique de l'air et de l'eau respectivement.

II.1. Introduction :

La nécessité d'énergie solaire donne la chance de naissance de plusieurs technologies des capteurs solaires. Il existe principalement trois types qui utilisent directement l'énergie solaire : les capteurs thermiques, photovoltaïques et les capteurs hybrides.

II.2. Energie solaire thermique :

Le solaire thermique actif permet de transmettre la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre des capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage. [29]

II.2.1 Capteurs thermiques :

Tous les capteurs solaires thermiques visent à convertir le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement élevé et à fournir cette chaleur aux consommateurs aussi efficacement que possible. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques : les capteurs non-vitrés, les capteurs plans, les capteurs sous vide, les capteurs à concentration. Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

A. Capteurs solaires non vitré :

Les capteurs plans sans vitrage sont habituellement fabriqués en un plastique noir qui a été stabilisé afin de résister aux rayons ultraviolets. Comme ces capteurs ne possèdent pas de vitrage, une grande partie de l'énergie solaire est absorbée. Cependant, parce qu'ils ne sont pas isothermes, une grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a du vent et que la température extérieure n'est pas assez chaude.

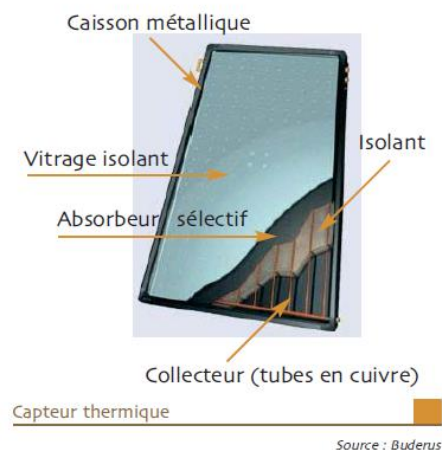


Fig.II. 1: Capteur solaire thermique.

Ils transfèrent si bien la chaleur de l'air (et provenant de l'air) qu'ils peuvent réellement «saisir» la chaleur au cours de la nuit lorsqu'il fait chaud et qu'il y a du vent à l'extérieur. [30]



Fig.II. 2: Capteur solaire moquette.

B. Capteurs vitrés:

Un capteur plan vitré est composé :

- ❖ d'un caisson.
- ❖ d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords.
- ❖ D'un film réfléchissant.
- ❖ d'un faisceau de tubes cylindriques.
- ❖ une surface absorbante placée à l'intérieur du coffre.
- ❖ un vitrage fixé sur le caisson.

Les tubes sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

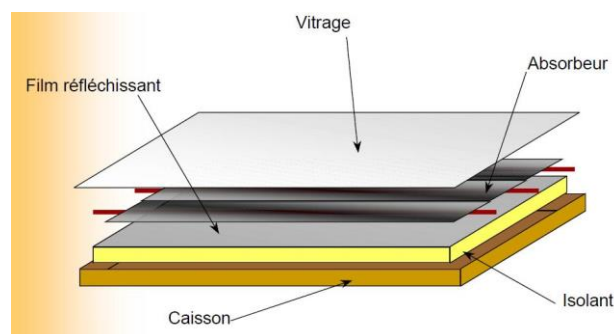


Fig.II. 3: Capteur solaire plan vitré.

C. Capteurs sous vide :

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Un capteur solaire thermique sous vide est composé :

- ❖ d'une série de tubes de verre sous vide (il n'y a pas d'air).
- ❖ d'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre.
- ❖ d'un tube en cuivre à l'intérieur des tubes de verre.

Les tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

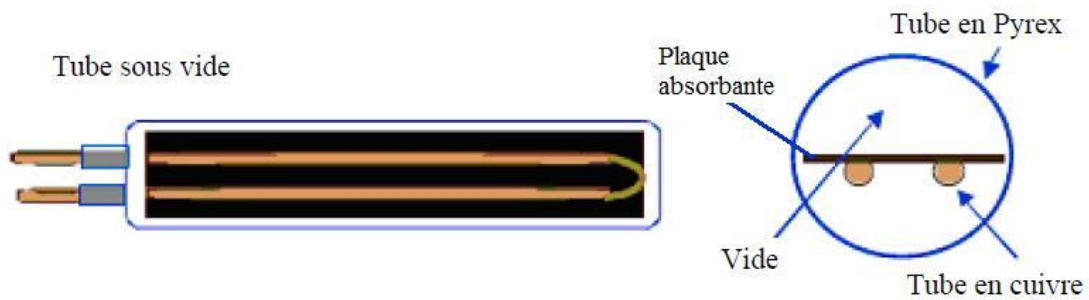


Fig.II. 4: Tube sous vide.



Fig.II. 5: Capteur sous vide.

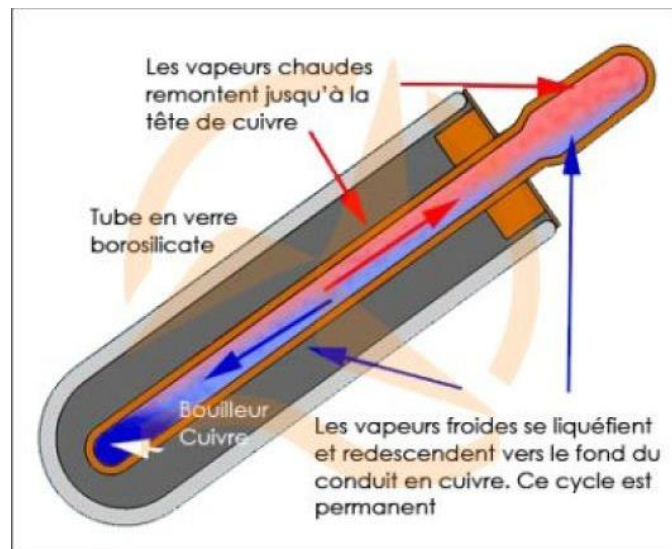


Fig.II. 6: Capteur sous vide a caloduc.

D. Capteurs à concentration :

Un capteur solaire thermique à concentration est composé :

- ❖ d'un châssis, d'un isolant permettant de limiter les fuites thermiques en sous face et sur les bords.
- ❖ d'un système de réflexion de la lumière.
- ❖ d'un absorbeur.
- ❖ d'un réseau de tubes en cuivre.

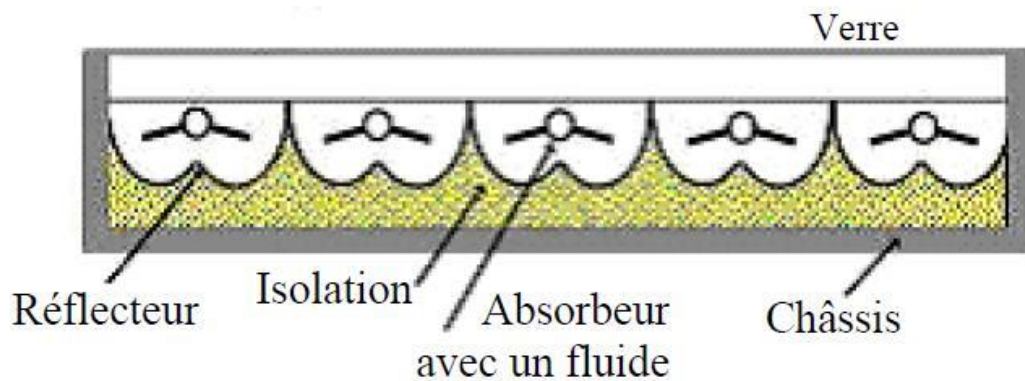


Fig.II. 7: Capteur à concentration.

II.2.2. Avantages et inconvénients des capteurs solaires thermiques :

a) Avantages:

Outre les économies d'énergie déjà énoncées, les capteurs solaires thermiques respectent l'environnement.

L'énergie solaire recueillie par les capteurs solaires thermiques est une énergie propre et renouvelable. Installer ce type de matériel permet de participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

b) Inconvénients:

La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil.

L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes.

Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.

II.3. Energie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. Elle fait partie des énergies renouvelables. Pour exploiter cette énergie, on doit concevoir des cellules photovoltaïques qui convertissent l'énergie lumineuse en électricité. Plusieurs cellules sont reliées entre elles sur un module solaire photovoltaïque. Plusieurs modules sont regroupés pour former une installation solaire.

II.3.1. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque :

Transformer le rayonnement solaire en électricité à l'aide d'une cellule photovoltaïque.

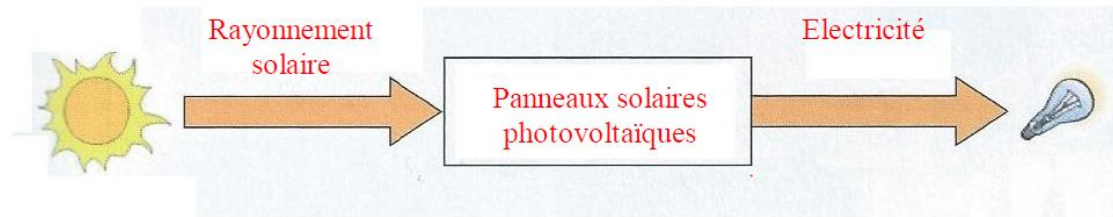


Fig.II. 8 Principe de l'énergie solaire photovoltaïque.

II.3.2.Composition d'une cellule PV :

1. Couche semi-conductrice de type p :

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité inférieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent positif de porteurs de charge (trous d'électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type p.

2. Couche semi-conductrice de type n :

Le matériau semi-conducteur contient des atomes externes qui possèdent une quantité supérieure d'électrons libres. On obtient ainsi un excédent négatif de porteurs de charge (électrons) dans le matériau semi-conducteur. Ces couches sont appelées des couches semi-conductrices à conduction de type n.

3. Doigts de contact et contact métallique de la face arrière :

Avec le contact métallique arrière, les doigts de contact constituent les connexions permettant de brancher par exemple un consommateur.

4. Couche anti réflexion :

La couche anti réflexion a pour but de protéger la cellule PV et de réduire les pertes de réflexion à la surface de la cellule.[31]

II.3.2.Types de cellules photovoltaïques :

Selon la nature des matériaux utilisés on distingue deux grandes classes : les cellules photovoltaïques inorganiques et les cellules photovoltaïques organiques :

A. Cellules photovoltaïques inorganiques :

Les cellules photovoltaïques inorganiques qui dites aussi au silicium, représentent 99% des ventes mondiales de panneaux solaires, on peut citer :

a) Cellules au silicium monocristallin :

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

b) Cellules au silicium polycristallin :

Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux.



c) Silicium en ruban autosupporté :

Les techniques de production de silicium cristallin en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. La plus connue est basée sur l'effet de capillarité entre deux lèvres de carbone. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles.

d) Silicium amorphe :

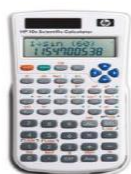
Silicium non cristallisé, c'est-à-dire à l'état amorphe. Ce sont les cellules des calculatrices ou des montres dites « solaires ». Le silicium amorphe présente plusieurs avantages, en particulier son fonctionnement possible en intérieur sous faible éclairage contrairement Au silicium cristallin.

Tableau.II. 4: Caractéristique des trois types des cellules de silicium [32].

| Technologie | Monocristallin | Polychristallin | Amorphe |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Cellule et module |  |  |  |
| Caractéristiques | <ul style="list-style-type: none"> Très bon rendement : 14 à 20 %. Durée de vie : importante (30 ans) Coût de fabrication : élevé. Puissance : 100 à 150 Wc/m². 7 m²/kWc. Rendement faible sous un faible éclairement. perte de rendement avec l'élévation de la température. Fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal Couleur bleue uniforme. | <ul style="list-style-type: none"> Bon rendement : 11 à 15 %. Durée de vie : importante (30 ans) Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins Puissance : 100 Wc/m². 8 m²/kWc. Rendement faible sous un faible éclairement. perte de rendement avec l'élévation de la température. Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux. Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux. | <ul style="list-style-type: none"> Rendement faible : 5 à 9 %. Durée de vie : assez importante (20 ans) Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies Puissance : 50 Wc/m². 16 m²/kWc. Fonctionnement correct avec un éclairement faible. Peu sensible aux températures élevées. Utilisables en panneaux souples. Surface de panneaux plus importante que pour les autres panneaux au silicium. Rendement faible en plein soleil. Performances diminuant avec le temps. Fabrication : couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. |
| Part de marché | 43 % | 47 % | 10 % |

Il ya aussi les cellules couches minces (les chalcogénures) comme les matériaux à base de tellure de cadmium, matériaux à base de séléniure de cuivre indium , Les cellules III-V multi-jonctions et Les cellules nanocristallines à colorant (ou cellules de Grätzel) .

Silicium amorphe



Calculatrice « solaire »
HP

Multijonction III-V



Satellite Artemis
ESA

Fig.II. 9: Exemple d'application des cellules solaires.

B. Cellule photovoltaïque organique :

Si l'effet photovoltaïque a été observé dans les matériaux organiques depuis plus de 30 ans, les premières cellules présentaient des rendements de conversion en énergie.

Cependant, plusieurs raisons justifient les efforts consentis pour développer la filière organique, et qui résident dans les avantages que présentent ces matériaux. En effet, ils peuvent être mis en forme facilement, par voie sèche ou voie humide (tournette, jet d'encre,...) avec des techniques issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, les quantités de matériaux utilisées sont relativement faibles, les films ayant des épaisseurs de 100 nm. L'ingénierie moléculaire permet en outre d'adapter les valeurs de la bande interdite et des niveaux d'énergie.

[33]

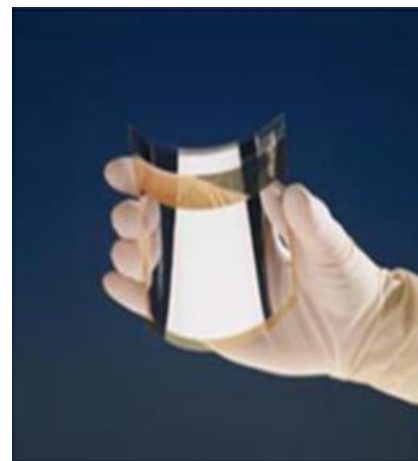


Fig.II. 10: Cellule photovoltaïque organique

II.3.3 Panneaux solaire photovoltaïque:

La conversion de la lumière en électricité, appelée effet photo voltaïque, a été découverte par E. Becquerel en 1839, mais il faudra attendre près d'un siècle pour que les scientifiques approfondissent et exploitent ce phénomène de la physique.

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres.

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot grec ancien « photos » (lumière) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta).

A. Panneau solaire :

Le panneau solaire est constitué de cellules photovoltaïques qui convertissent l'éclairement énergétique du soleil en courant continu. L'assemblage des cellules en série permet d'obtenir une tension compatible avec la charge de la batterie. Le courant produit par le panneau est directement proportionnel à l'ensoleillement reçu : le panneau solaire fonctionne comme un générateur de courant. Les conditions d'installation du panneau solaire permettent la meilleure exposition au soleil tout au long de l'année : orientation sud, inclinaison égale à la latitude.



(e) Assemblage de cellules en panneaux photovoltaïques (panneaux PV). Source : <http://www.rdv-solaire.com>

Fig.II. 11: Panneaux photovoltaïque.

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

B. Technologie des capteurs :

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Il doit être purifié afin d'obtenir un silicium de qualité photovoltaïque.

Il se présente alors sous la forme de barres de section ronde ou carrée appelée lingots. Les lingots sont ensuite découpés en wafers : fines plaques de quelques centaines de microns d'épaisseur.



Fig.II. 12 : Différent processus appliqué sur le silicium

Ils sont ensuite enrichis en éléments dopants pour obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N. Des rubans de métal sont alors incrustés en surface et raccordés à des contacts pour constituer des cellules photovoltaïques.

Les cellules les plus utilisées pour la production d'électricité sont les cellules silicium polycristallin grâce à leur bon rapport qualité-prix.

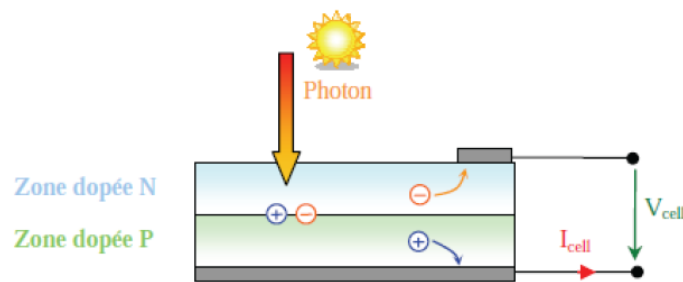


Fig.II. 13: Effet photovoltaïque.

II.3.4 Avantages et inconvénients des modules photovoltaïques :

a) Avantage:

La production d'électricité à partir de l'énergie radiative du soleil par l'intermédiaire de modules photovoltaïques présente des avantages importants :

- La ressource d'énergie utilisée est renouvelable et gratuite, aucune pénurie ou fluctuation des prix n'est à craindre.
- Le processus de production d'électricité n'a aucun impact sur l'environnement (ni rejet polluant, ni déchet, ni bruit, etc.).
- Ce qui est produit est généralement consommé sur place ce qui présente un intérêt du point de vue électrique puisque les pertes dans les câbles sont très faibles (contrairement au mode de production décentralisé, ex : centrale nucléaire).
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.

b) Inconvénients :

- Bien que le photovoltaïque produit de l'électricité d'une manière renouvelable et écologique, il ne faut pas oublier que dans le processus de fabrication on utilise des produits polluants et on consomme beaucoup d'énergie, spécialement pour le mono cristallin. L'énergie consommée pour la fabrication peut surpasser celle que les modules vont produire pendant leur vie utile.
- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques est élevé .
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente.

-l'augmentation de la température de cellule photovoltaïque réduit sensiblement les performances électriques du module.

II.4 Capteurs solaires hybrides :

Un capteur photovoltaïque thermique (PV-T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, en chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et selon le type d'absorbeur (plan, concentrateur ...).

II.4.1 Concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique :

Le concept de capteur hybride photovoltaïque / thermique consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Il est caractérisé par une combinaison sandwich séparant air et eau. Le fluide caloporteur est canalisé, ce qui permet une circulation forcée. La face inférieure est isolée et ne comporte pas d'absorbeur.

Tableau.II. 5: Caractéristique physique du composant du capteur *PVT*. [34]

| Composant | Caractéristiques | Valeur |
|-------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| Vitre | Masse volumique | 2530 kg/m ³ |
| | Chaleur spécifique | 836 J/kgK |
| | Conductivité thermique | 0.93 W/mK |
| | Emissivité du vitrage | 0.88 |
| Cellule au Silicium monocristallin | Masse volumique | 2330 kg/m ³ |
| | Chaleur spécifique | 836 J/kgK |
| | Conductivité thermique | 0.036 W/mK |
| | Epaisseur | 0.0003 m |
| | Coefficient d'absorption | 0.85 |
| | Emissivité de la cellule | 0.95 |
| | Facteur de remplissage | 0.83 |
| | Rendement de référence | 0.12 |
| Couche de Tedlar | Masse volumique | 1390 kg/m ³ |
| | Chaleur spécifique | 1400 J/kgK |
| | Conductivité thermique | 0.033 W/mK |
| | Epaisseur | 0.0005 m |
| | Coefficient d'absorption | 0.5 |
| | Emissivité | 0.88 |
| Absorbeur | Masse volumique | 8000 kg/m ³ |
| | Chaleur spécifique | 36 J/kgK |
| | Conductivité thermique | 389 W/mK |
| | Epaisseur | 0.002 m |
| | Coefficient d'absorption | 0.75 |
| | Emissivité | 0.04 |
| Isolant (Laine de verre) | Masse volumique | 24 kg/m ³ |
| | Chaleur spécifique | 919 J/kgK |
| | Conductivité thermique | 0.039 W/mK |
| | Conductivité d'absorption | 0.11 |
| | Epaisseur | 0.04 m |

II.4.2 Classification des capteurs hybride *PVT* :

1. Capteur hybride *PVT* à eau :

le module photovoltaïque, qui a pour rôle la conversion des rayons solaires en une énergie électrique et se compose de trois couches: la première est une couche de verre, dont la face avant est exposée au rayonnement, la seconde couche qui contient les cellules photovoltaïques et la troisième couche représente la face arrière du module, réalisé en tedlar. une plaque en acier galvanisé qui a pour rôle d'absorber la chaleur, une tuyauterie sous forme de radiateur ou de serpentin, soudé à la plaque absorbante garantissant un bon contact thermique entre les deux éléments, et où circule un fluide caloporteur qui a pour rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la plaque

absorbante. Enfin, pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolation.

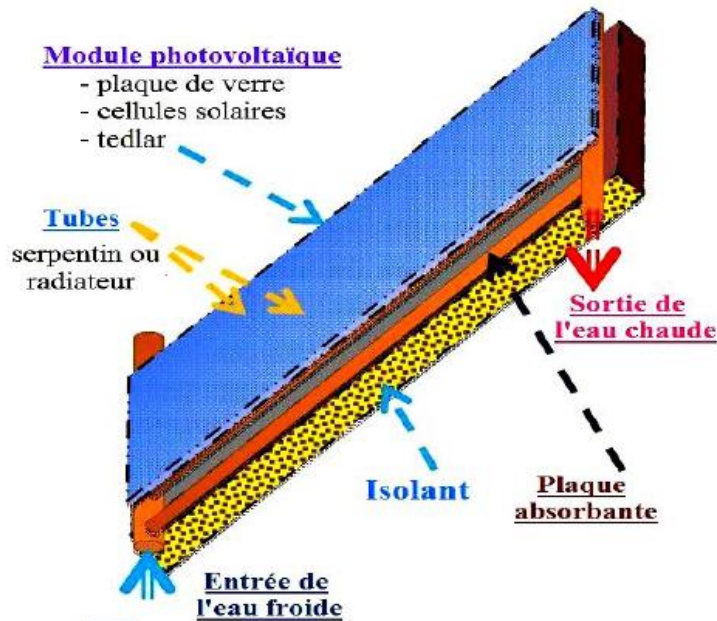


Fig.II. 14: Capteurs solaires hybride Pv/T à eau.

2. Etude d'un capteur hybride PV/T à air :

Le système hybride photovoltaïque/thermique à air regroupe un module photovoltaïque, qui produit de l'électricité, à un capteur thermique, disposé derrière ce panneau. La chaleur résiduelle qui vient du capteur photovoltaïque, se transfère par conduction et convection à l'intérieur du canal du capteur thermique, si bien, qu'une ventilation du capteur photovoltaïque permet d'améliorer sa productivité électrique. L'utilisation de ces capteurs hybrides ne se limite pas à l'usage comme chauffage, mais ils peuvent être utilisés comme moyen de ventilation. Il faut noter aussi, la grande adaptabilité de ces systèmes aux différentes configurations dans les bâtiments.

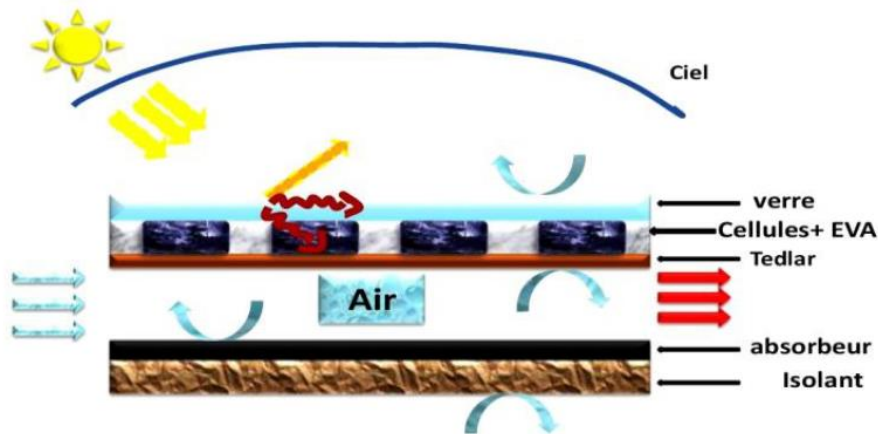


Fig.II. 15: Coupe transversale dans un capteur hybride PV/T à air.

3. Capteur solaire hybride de concentration.

Les systèmes à concentration photovoltaïque (CPV) peuvent opérer aux températures plus élevées que ceux des capteurs plan, le rassemblement de la chaleur rejetée par le système CPV mène à un système CPV/Thermique (CPV/T), fournissant tant l'électricité que la chaleur aux températures moyennes. L'utilisation de CPV/T en combinaison avec des réflecteurs se concentrant à un potentiel significatif pour augmenter la production d'énergie d'une surface de cellule solaire donnée. Actuellement, la recherche va développer le capteur solaire CPV/T pour générer plus d'électricité aussi bien que la production de la chaleur. Peu de chercheurs ont travaillé dans cette direction permettant les systèmes hybrides polyvalents d'accomplir la demande croissante d'énergie tant électrique que thermique, en protégeant l'environnement.[35]

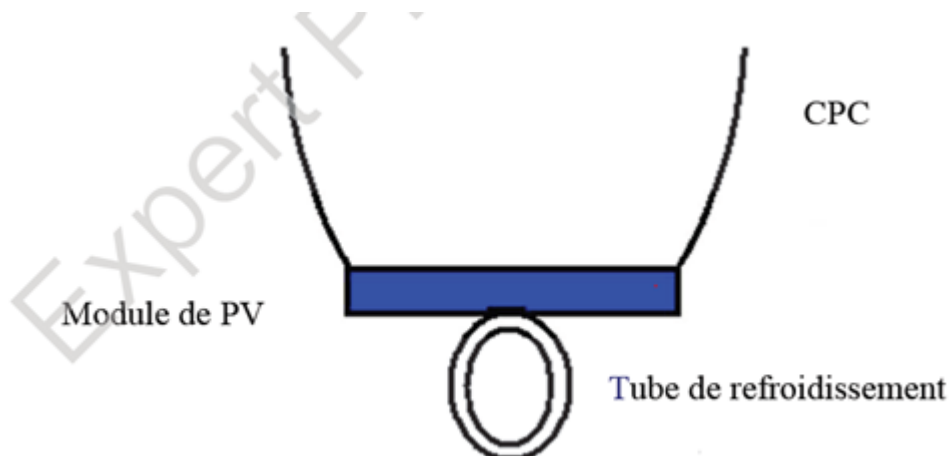
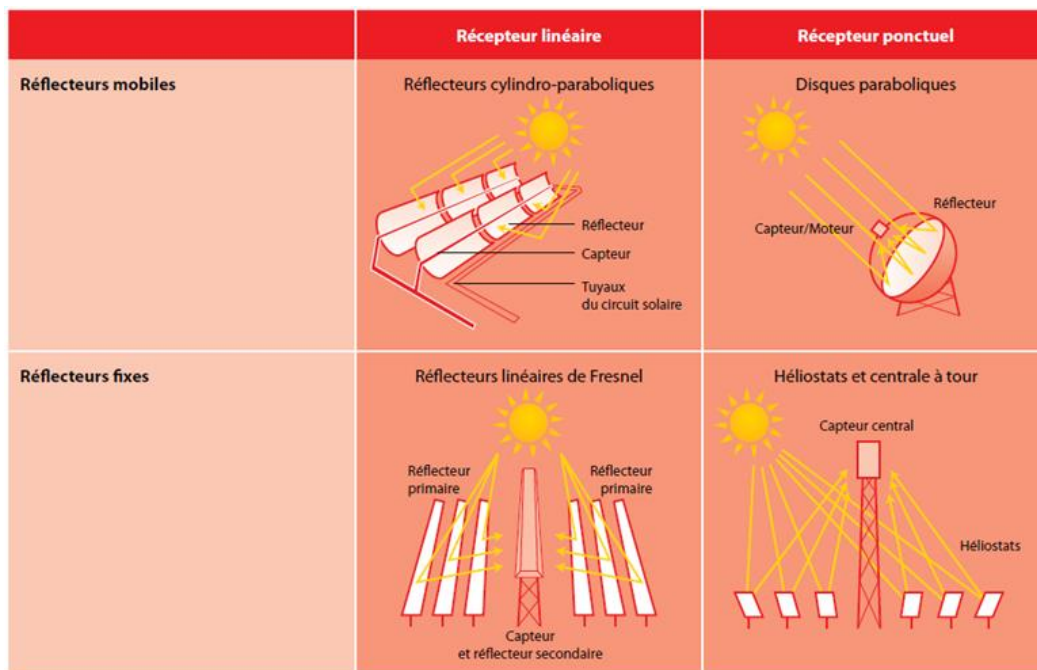


Fig.II. 16: Capteur de concentration.

Il existe d'autres technologies des capteurs solaires fournissant tant électricité que la chaleur. Les réflecteurs on peut citer cylindro-paraboliques, Les héliostats, Les réflecteurs linéaires de Fresnel. Les réflecteurs linéaires de Fresnel.

Tableau.II. 6: Quatre principales technologies de production de la chaleur et/ou électricité par voie thermodynamique. [36]



II.5 Paramètres régissant le fonctionnement d'un capteur solaire plan:

On peut les classer en deux catégories :

1) paramètres externes :

- ✓ Paramètres d'ensoleillement: éclairement, position du soleil, durée d'insolation.
- ✓ Température extérieure sèche.
- ✓ Vitesse du vent sur le capteur.

2) paramètres internes :

On distingue :

- a) paramètres géométriques :
 - ✓ paramètres de position : inclinaison, orientation du capteur.
 - ✓ La surface du capteur.
- b) paramètres de fonctionnement :
 - ✓ Température d'entrée du fluide caloporteur.
 - ✓ le débit du fluide caloporteur.
 - ✓ la température des différentes parties du capteur [37]

II.6 Modèles mathématiques pour calculer les performances d'un capteur solaire hybride:

1. Calcul du débit massique de l'air :

$$\dot{m} = \rho * S * V \dots\dots\dots(1)$$

- \dot{m} : Le débit massique [Kg/s].
- ρ : La masse volumique de l'air $\rho=1.293\text{Kg/m}^3$.
- S : La section de passage de fluide caloporteur.

2. Calcul de la puissance utile :

L'énergie utile dérivée par les équations de Hottel Whilliere Bliss est donné par l'équation suivante : [38]

$$Q_u = \dot{m}C_p (T_s - T_e) \dots\dots\dots(2)$$

- Q_u : La puissance utile [W].
- \dot{m} : Le débit massique [Kg/s].
- C_p : Capacité calorifique pour l'air $C_p=1005\text{[J/Kgk]}$.
- T_s : La température de sortie d'air [K].
- T_e : La température d'entré d'air [K].

3. Calcule du rendement thermique: [49]

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{I * A} \dots\dots\dots(3)$$

I : Le rayonnement solaire [W/m²].

A : La surface du cellule/panneau solaire [m²].

4. Puissance électrique :

La puissance d'une cellule photovoltaïque dépend du courant débité :

$$P = U * I_c \dots \dots \dots (4)$$

U : La tension en volt [V].

I_c : l'intensité du courant en ampère [A].

P : La puissance en watt [W].

5. Calcul du rendement électrique :

$$\eta_{\text{éle}} = \frac{I_c * U}{I * A} \dots \dots \dots (5)$$

I : Le rayonnement solaire [W/m²].

A : La surface du cellule solaire [m²].

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre, on va décrire tous d'abord les matériels utilisés dans nos manipulations réalisées au sein du laboratoire pédagogique « transfert de chaleur » à l'université de Tlemcen, faculté de technologie.

III.2 Matériels utilisés :

III.2.1 Cellules solaires photovoltaïques :

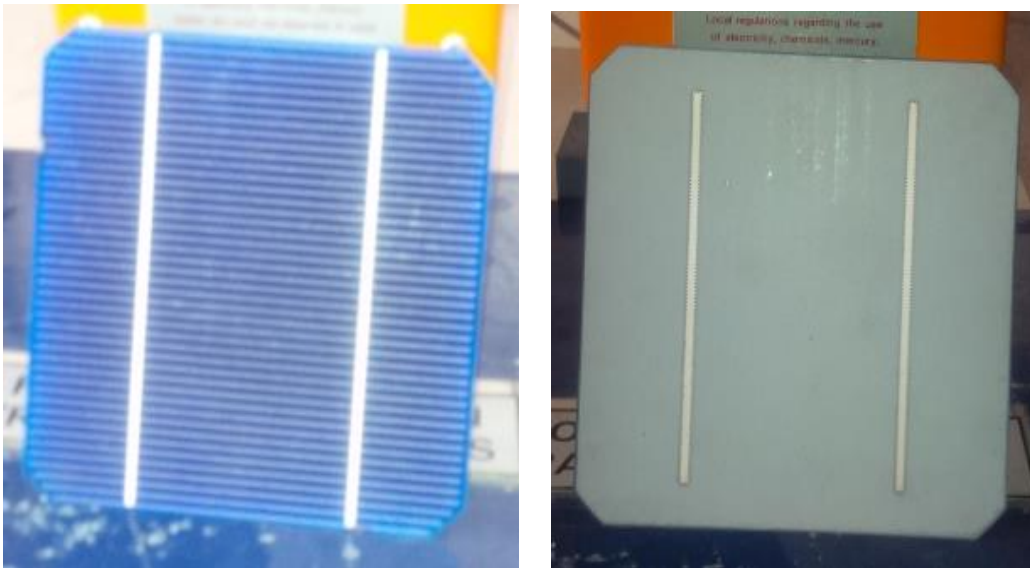


Fig.III. 1: Cellule photovoltaïque monocristallin (face avant et arrière).

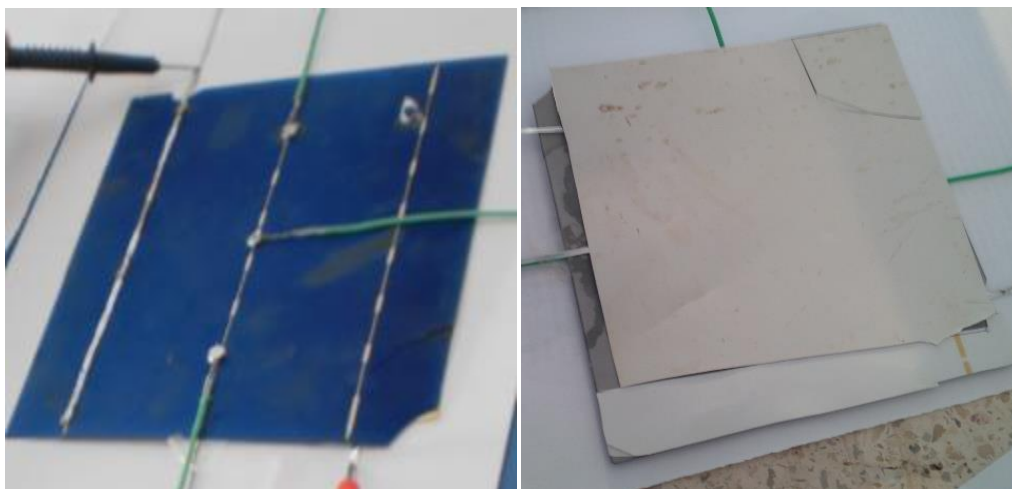


Fig.III. 2: Cellule photovoltaïque polycristallin d'une tension 0.6V.

III.2.2 Panneau solaire photovoltaïque :

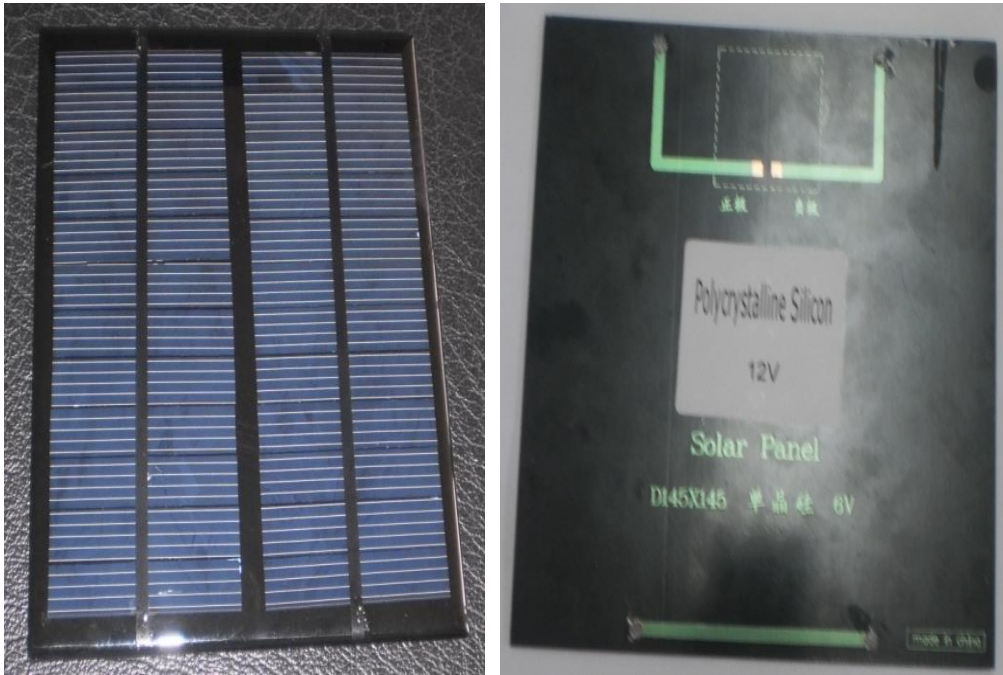


Fig.III. 3 : Panneau solaire photovoltaïque.

Tableau.III. 1: caractéristique du panneau photovoltaïque.

| |
|-----------------------------------------------------------|
| Spécifications |
| Max puissance: 3 W |
| Tension de fonctionnement: 12 V |
| Max de travail actuel: 250mA |
| Taille: 3 W 145x145x2.5mm/5.7x5.7x0.10 pouces (l x P x h) |

II.2.3 : Unité de transfert thermique convective :

L'unité de transfert thermique convective consiste en une cheminer rectangulaire disposée horizontalement et utiliser comme un collecteur thermique pour l'extraction de la chaleur de la cellule à l'aide d'une circulation forcée d'air.



Fig.III. 4 : Unité de transfert thermique convective.

III.2.4 Ventilateur :

Un ventilateur à vitesse variable est monté à l'extrémité droite de la cheminier. Il aspire l'air ambiant du gauche vers la droite.



Fig.III. 5 : Ventilateur.

III.2.5 L'anémomètre à thermistor :

La vitesse de l'air dans la cheminier est indiquée par un l'anémomètre à thermistor disposé dans le support et relié à la cheminier.



Fig.III. 6: Anémomètre à thermistor.

III.2.6 Unité de transfert thermique radiatif H110C :

Cette unité se compose d'un chariot utilisé pour varier la distance entre le radiomètre et la source lumineuse. Elle comporte aussi d'un afficheur qui permette de lire l'intensité de rayonnement et d'autre paramètres comme la température.....



Fig.III. 7 : Unité de transfert thermique radiatif H110C .



Fig.III. 8: Unité de transfert thermique H110C.

III.2.7 Radiomètre :

Un radiomètre est un instrument qui permet de mesurer l'intensité du flux de rayonnement transmis par le projecteur .Il est lié directement à l'unité de transfert de chaleur H110C.



Fig.III. 9: Radiomètre.

III.2.8 Projecteurs utilisés :

Les projecteurs sont utilisés comme une source lumineuse thermique radiative. les deux premiers projecteurs utilisée ne sont pas fiables à nos expériences.

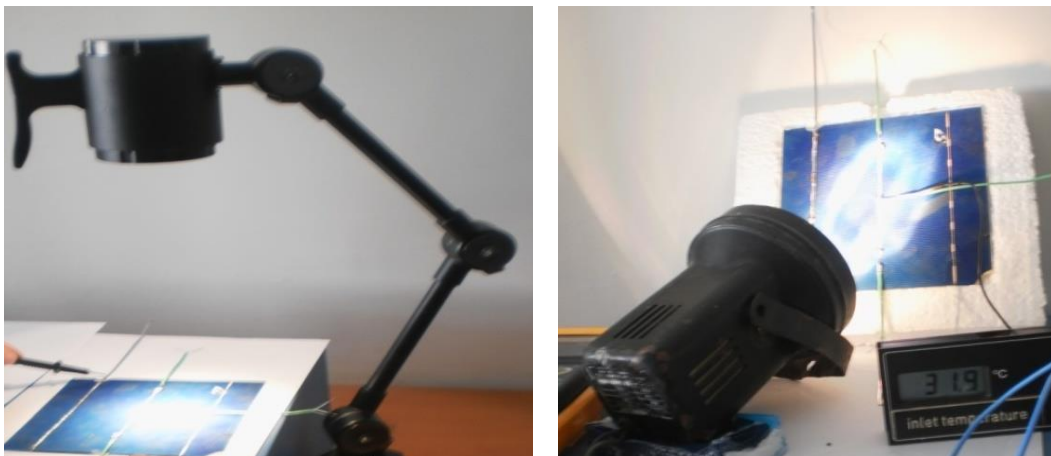


Fig.III. 10 : Projecteurs utilisés au début d'expérience.

Nous avons utilisé un projecteur a une puissance de $1000\text{W}/\text{m}^2$ (voir Fig.III.11) à cause de sa puissance thermique importante qui nous permet d'étudier l'influence de l'augmentation de la température sur les performances du panneau et aussi à cause de sa grande dimension pour bien embraser toute la surface de la cellule et du panneau.



Fig.III. 11 : Projecteur utilisé dans les expériences.

III.2.9 Multimètres :

Deux multimètre sont utiliser pour mesurer la tension et l'intensité générer par la cellule et le panneau solaire.



Fig.III. 12: Multimètres.

III.2.10 Thermocouples :

L'étude de la variation de température au cour des expériences exige des thermocouples placés dans des différents position.



Fig.III. 13: Thermocouples.

III.2.11 Potentiomètre :

Un potentiomètre est un type de résistance variable à trois bornes, dont une est reliée à un curseur se déplaçant sur une piste résistante terminée par les deux autres bornes. Ce système permet de recueillir, entre la borne reliée au curseur et une des deux autres bornes, une tension qui dépend de la position du curseur et de la tension à

laquelle est soumise la résistance. Nous avons utilisé pour notre expériences deux potentiomètres.



(a)

(b)

Fig.III. 14: (a) potentiomètre 1k Ω .(b) potentiomètre 2k Ω .

On a utilisé aussi, un fer a soudé un Scotch, des Fils, un quêteur, bobine

IV.1 Introduction :

L'expérimentation est une étape importante dans toute étude ayant pour but de mieux appréhender les phénomènes physiques. Elle permet de mieux comprendre les phénomènes ayant lieu dans la nature, mais aussi confirmer ou infirmer des hypothèses en observant plusieurs fois le même phénomène dans un milieu contrôlé ou dans un environnement naturel. Les cellules photovoltaïques sont les constituants des panneaux solaires. C'est une énergie nouvelle et propre et un bon moyen contre la pollution qui est souvent la conséquence d'une production d'énergie. Nous sommes donc intéressés au fonctionnement de ces cellules ainsi qu'à leur rendement afin de découvrir l'efficacité de ce système.

IV.2 Préparation du panneau photovoltaïque :

Au début de nos expériences, on dispose de deux cellules photovoltaïques, la première est monocristallin et la deuxième est polycristallin. La difficulté dans l'utilisation des cellules est leur fragilité, la première a été cassée en essayant de souder les fils de contact prévus pour les différentes mesures

Pour cela nous sommes passé par les étapes suivantes :

IV.2.1 Etapes suivies :

Puisque la cellule photovoltaïque constitue l'élément de base des panneaux solaires photovoltaïques et qu'il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V. Alors il faut souder à notre cellule deux fils pour pouvoir mesurer la tension et l'intensité générée (comme montre la Fig. IV.2)

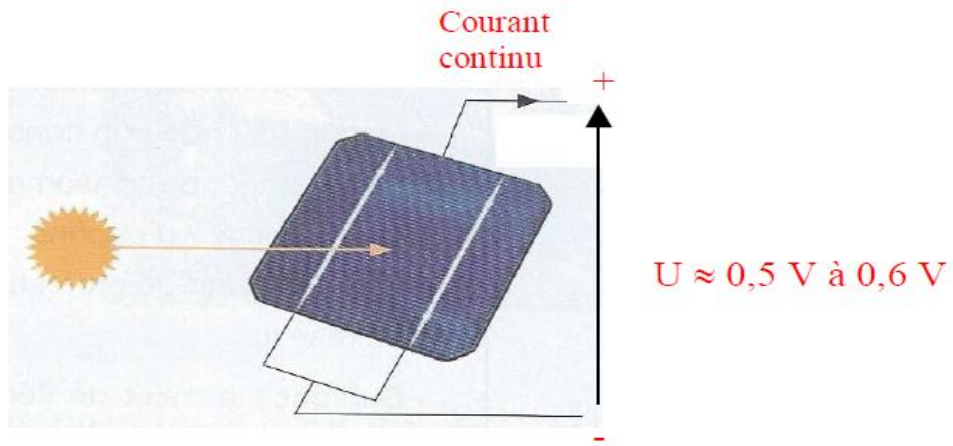


Fig. IV. 1 : Cellule photovoltaïque



Fig. IV. 2: Soudage des fils (positive et négative) sur la cellule photovoltaïque polycristallin.

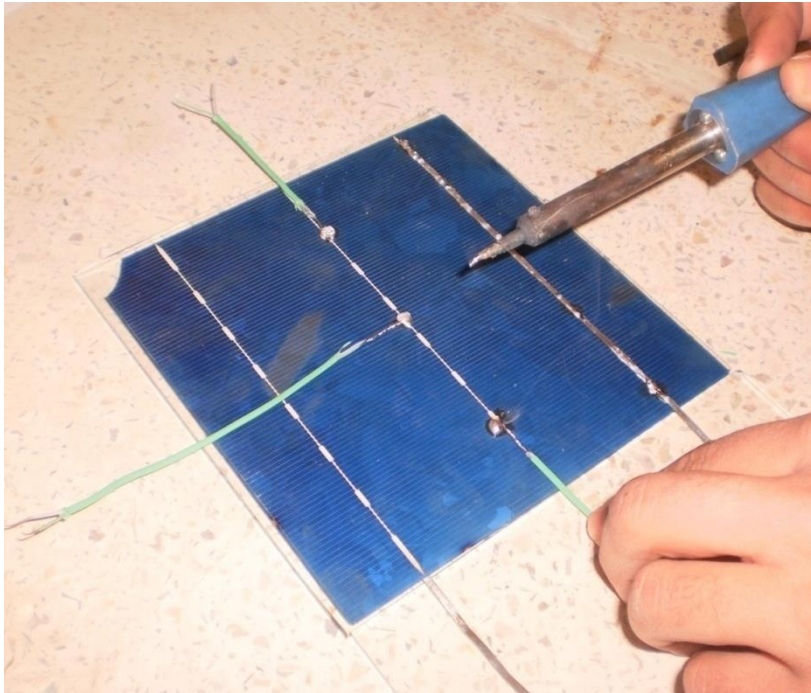


Fig. IV. 3: Soudage des thermocouples sur la cellule photovoltaïque polycristallin.

Afin de mesurer la température de la cellule pendant l'étape d'échauffement et de refroidissement, nous avons soudé trois thermocouples sur la cellule dans différentes positions (Fig IV.3).



Fig. IV. 4 : Vue au dessous de la cellule PV.

Nous avons collé une couche de tedlar avec une colle de type 'super glue' à la face inférieure de la cellule pour renforcer sa structure.

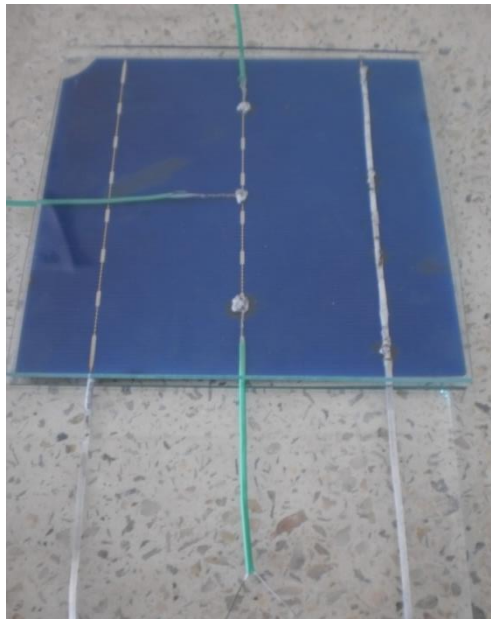


Fig. IV. 5 : Cellule PV avec vitrage.

Le vitrage disposé au dessus de la cellule est utilisé pour l'expérience de l'effet de vitrage.

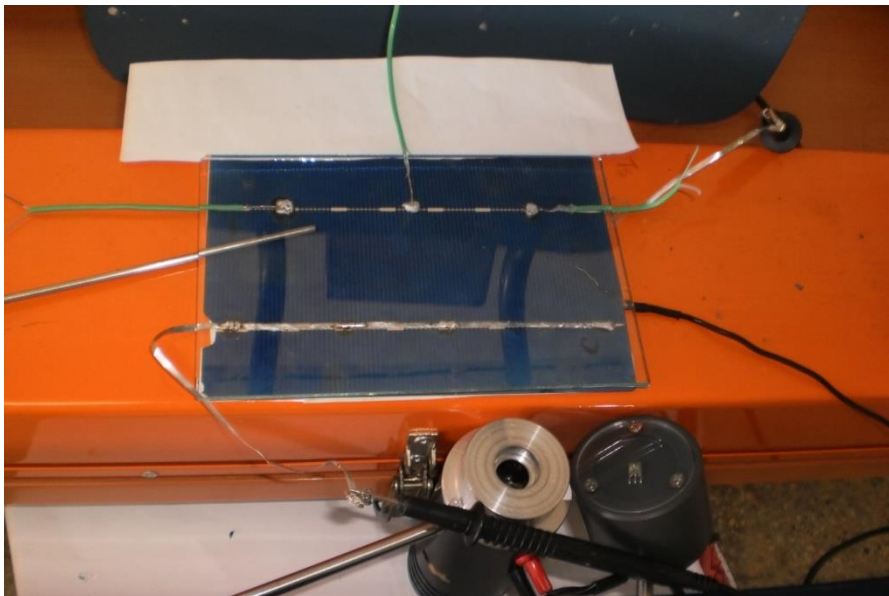


Fig. IV. 6: cellule PV avec vitrage poser sur le cheminier.

Maintenant nous avons un panneau photovoltaïque constitué d'une seule cellule photovoltaïque qu'on va étudier ces performances électriques et thermique dans la première partie. En deuxième partie, nous avons utilisé un petit panneau photovoltaïque polycristallin commercial (Fig .IV.7).



Fig. IV. 7 : Panneau photovoltaïque polycristallin.

IV.2.2 Montage électrique réalisé:

Afin d'étudier les performances électrique des panneaux photovoltaïques, on utilise des potentiomètres pour relever les tensions et les intensités générés. Le volt-mètre est monté en parallèle avec le panneau et l'ampèremètre en série (voir figure IV.)

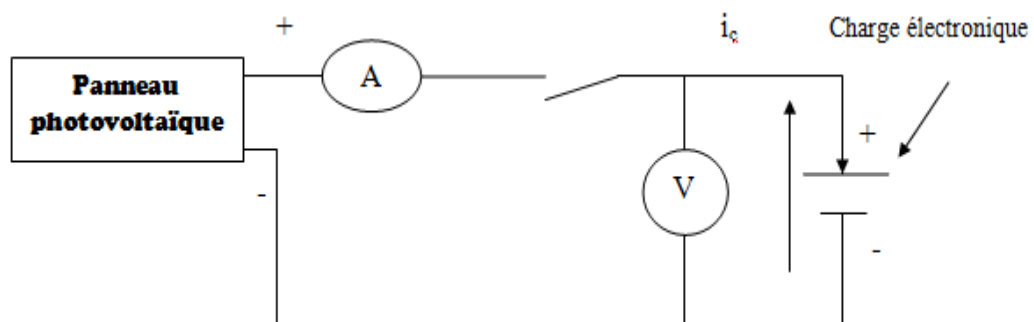


Fig. IV. 8 : Montage électrique réalisé.



Fig. IV. 9 : Montage électrique réalisé dont le multimètre de couleur noir est utilisé comme une charge.



Fig. IV. 10 : Montage électrique réalisé dont le potentiomètre est la charge électrique.

IV.3 Description de l'installation :

Pour étudier le refroidissement du panneau nous avons placé nos panneaux photovoltaïques sur la cheminée de l'unité de transfert thermique convectif. Les températures sont mesurées à l'aide des thermocouples et le rayonnement par un radiomètre. La vitesse de l'air dans la cheminée est indiquée par l'anémomètre à thermistor disposé dans le support est relié à la cheminée.

1) Cas du panneau photovoltaïque réalisé.

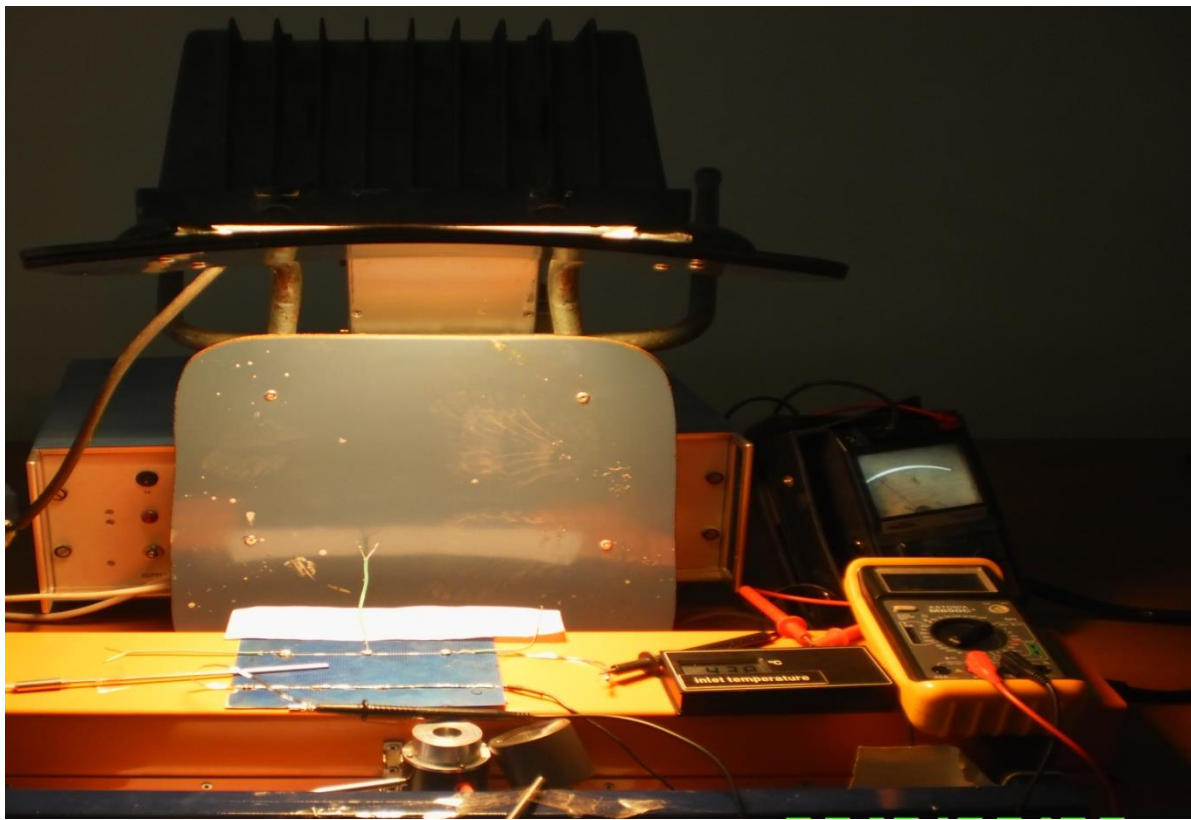


Fig. IV. 11: Refroidissement de la cellule sous un rayonnement de 800W/m^2 .

2) Cas du panneau photovoltaïque commercial :

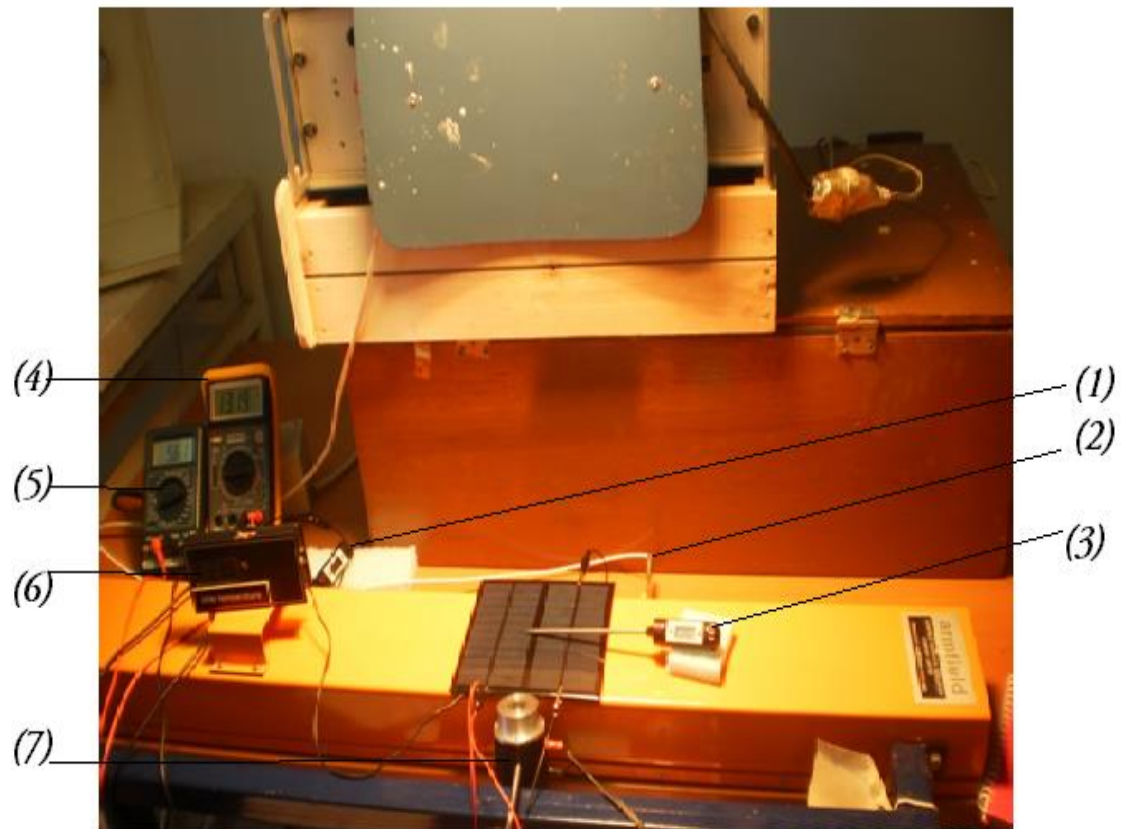


Fig.IV. 12: Refroidissement du panneau photovoltaïque sous un rayonnement de $300\text{W}/\text{m}^2$.

(1) thermocouple pour la mesure T_e , (2) thermocouple pour la mesure de T_s , (3) thermocouple pour la mesure de T_h , (4) et (5) multimètres, (6) thermocouple pour la mesure de T_b , (7) radiomètre.

IV.4 : variation de l'intensité du rayonnement

Pour varier l'intensité du rayonnement, nous avons joué sur la distance entre le projecteur et le panneau pour trois différentes positions suivantes :

Position 1 : Pour $I=800W/m^2$

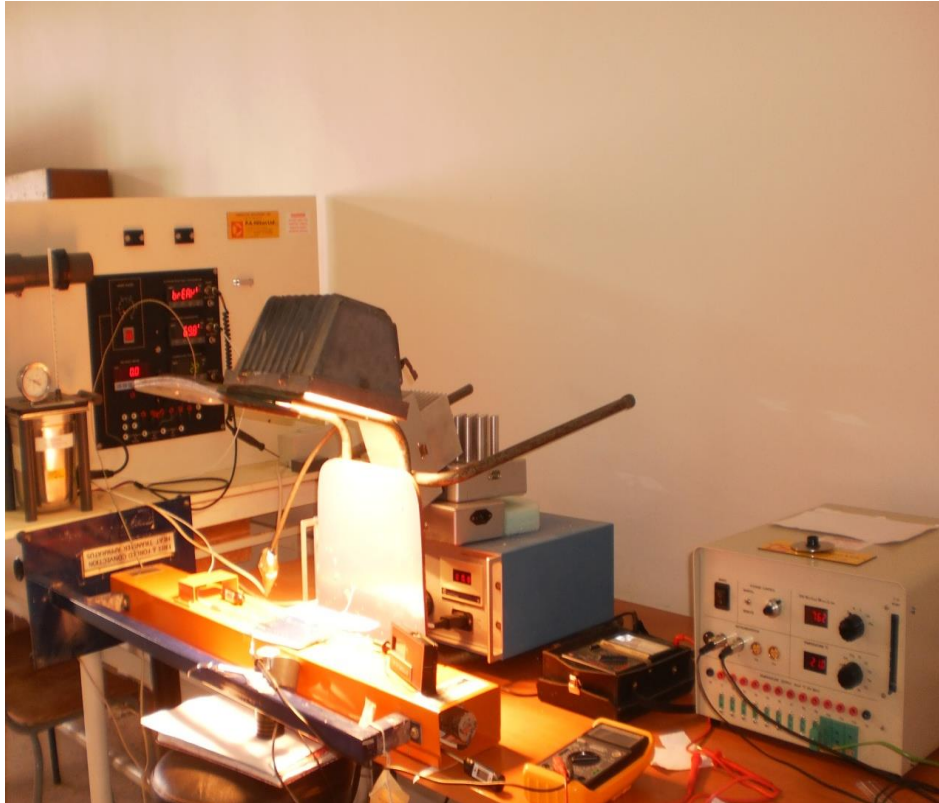


Fig.IV. 13 : Position de projecteur pour $I=800W/m^2$.

Position 2 : Pour $I=450W/m^2$



Fig. IV. 14: Position de projecteur pour $I=450W/m^2$.

Position 3 : pour $I=300\text{W/m}^2$.



Fig.IV. 15: Position de projecteur pour $I=300\text{W/m}^2$.

IV.5 difficulté de travail:

- ✓ le manque des cellules solaire photovoltaïque sur le marché algérien.
- ✓ Fragilité des cellules solaires photovoltaïques.
- ✓ Manque de matériels.
- ✓ Le choix d'un projecteur adéquat.

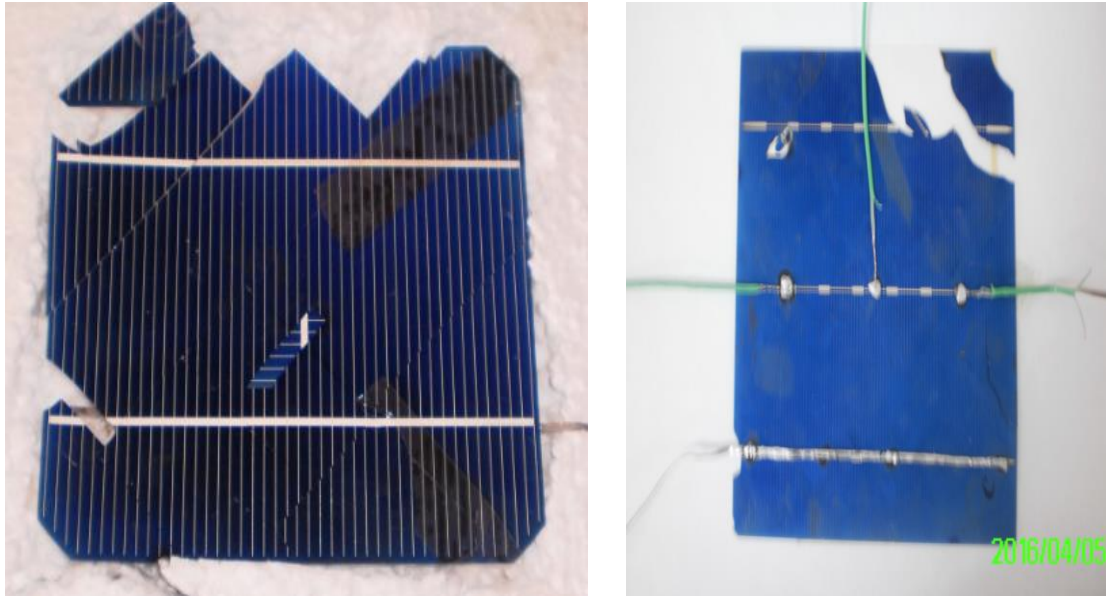


Fig. IV. 16: Cellules brisées.



Fig.IV. 17 : Influence de la température sur les caractéristiques électrique du panneau sous une intensité de 800W/m^2 .

V.1 Introduction :

Puisque nos expériences se déroulent toutes au sein d'un laboratoire, il faut créer des conditions intérieures favorables. Pour cela, nous avons utilisé un projecteur commercial comme une source radiative.

Pour déterminer son intensité de rayonnement en fonction de la distance et la température générée, nous avons utilisé le banc d'essai du transfert radiatif disponible au laboratoire du transfert thermique.

V.2 Variation de l'intensité du rayonnement en fonction de distance :



Fig. V. 1: Unité de transfert radiative.

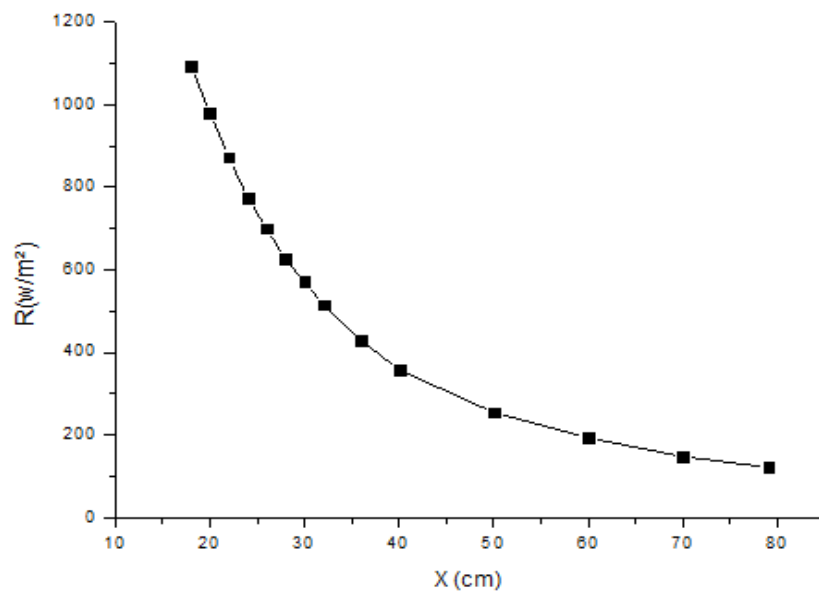


Fig. V. 2 : Variation de l'intensité du rayonnement en fonction de la distance.

La Fig IV.2 montre la variation de l'intensité du rayonnement du projecteur en fonction de la distance. On remarque que l'intensité du rayonnement est inversement proportionnelle au carré de la distance (La loi de l'inverse du carré de Lambert).

V.3 : Variation de la température générés par le projecteur en fonction l'intensité du rayonnement.

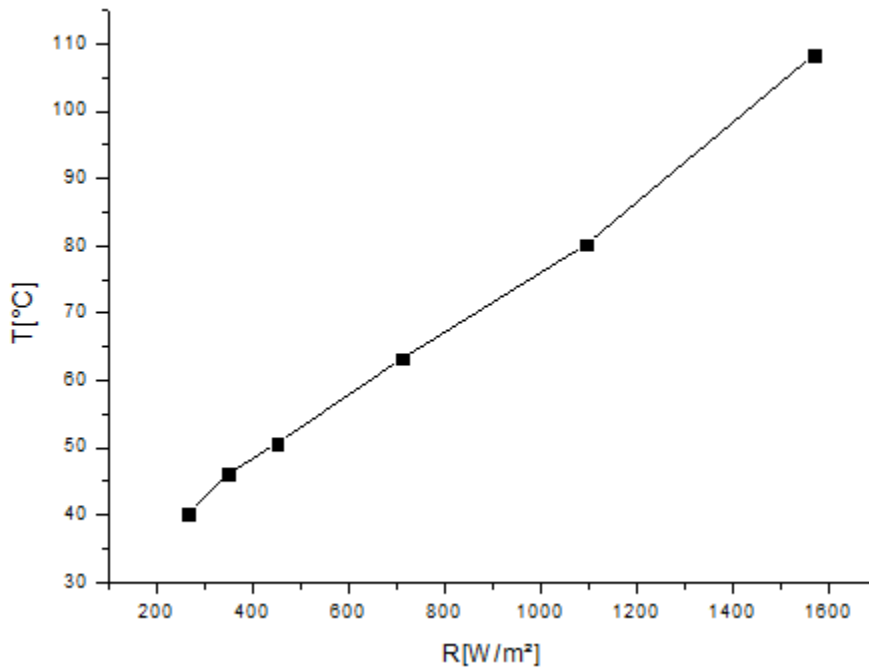


Fig. V. 3: Variation de la température au niveau de la cellule en fonction d'intensité du rayonnement.

La Fig V.3 montre l'évolution de la température au niveau de la cellule en fonction de l'intensité du rayonnement générée par le projecteur.

On remarque que la température augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement.

V.4 Partie A : Panneau photovoltaïque réalisé.

V.4.1 Détermination des caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque polycristallin:

L'intensité du rayonnement appliquée est de 800W/m² à une température ambiante de 19°C.

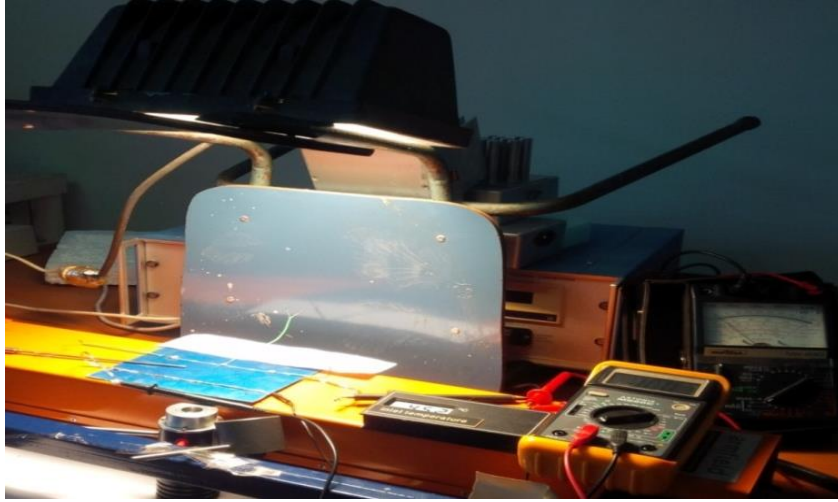


Fig. V. 4: Cellule photovoltaïque sans vitrage..

Afin d'examiner le fonctionnement de la cellule solaire photovoltaïque, nous l'avons chauffé à partir d'une intensité de rayonnement égale à 800W/m^2 pendant 30min jusqu'à où la température de la cellule commence à se stabiliser, puis la laisser refroidir à l'air libre en éteignant le projecteur.

Etape I : Echauffement de la cellule.

Evolution de la température :

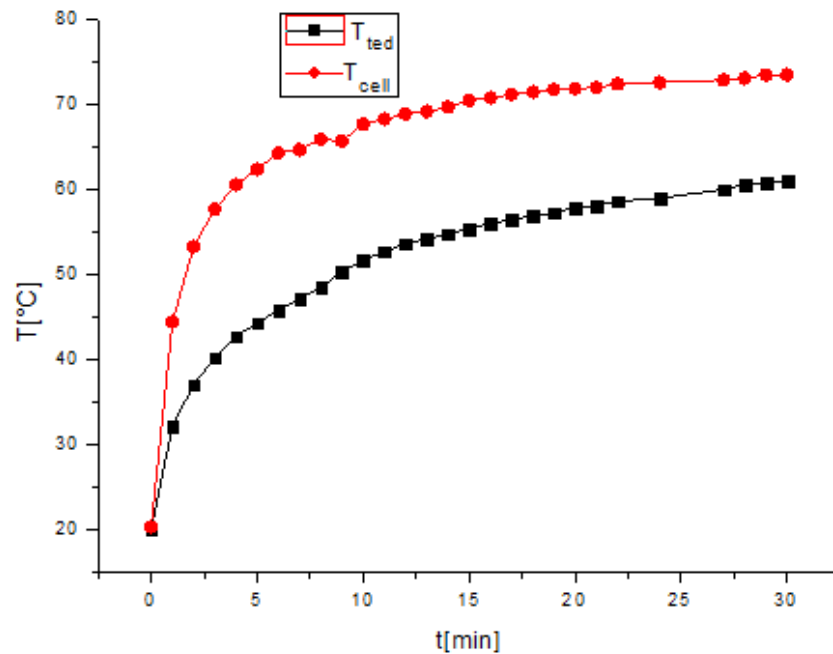


Fig. V. 5: Evolution de la température en fonction du temps

(T_{cell} température de la cellule en haut; T_{ted} température de la cellule en bas).

La figure V.5 montre l'évolution de température de la cellule et du tedlar en fonction du temps avec un rayonnement de 800 W/m².

Au cours de 8min on remarque que la température de la cellule T_{cell} augmente de façon remarquable jusqu'à une valeur de T_{cell} =64.3°C ainsi que le tedlar où sa température augmente jusqu'à T_{ted} =47.2°C. La différence entre les deux températures atteint une valeur maximale de 33.6°C à t=13min.

Après t = 25min, les deux températures commencent à se stabiliser pour atteindre des valeurs maximales de T_{cell} =73.5°C et T_{ted} =61°C à cause d'une intensité de rayonnement fixe.

Nous avons remarqué aussi que la vitesse d'échauffement de la cellule est plus importante que la vitesse d'échauffement de tedlar, puisqu'elle joue le rôle d'un absorbeur et transfère la chaleur au tedlar par conduction.

Étape II : Refroidissement de la cellule à l'air libre.

A la fin de la 1^{ère} étape : I=800 w/m² et T_{amb}=19°C; T_{cell} =74°C ;

T_{ted}=61°C ; I_c= 0.67mA et U= 0.496V.

Afin d'examiner le bon fonctionnement de la cellule, nous avons éteint le projecteur et utilisé seulement l'éclairage du laboratoire comme une source radiative pour laisser la cellule refroidir.

Au début de la 2^{ème} étape : à t=0s T_{cell} = 67.3°C , I_c= 0.2 mA, U=0.139V .

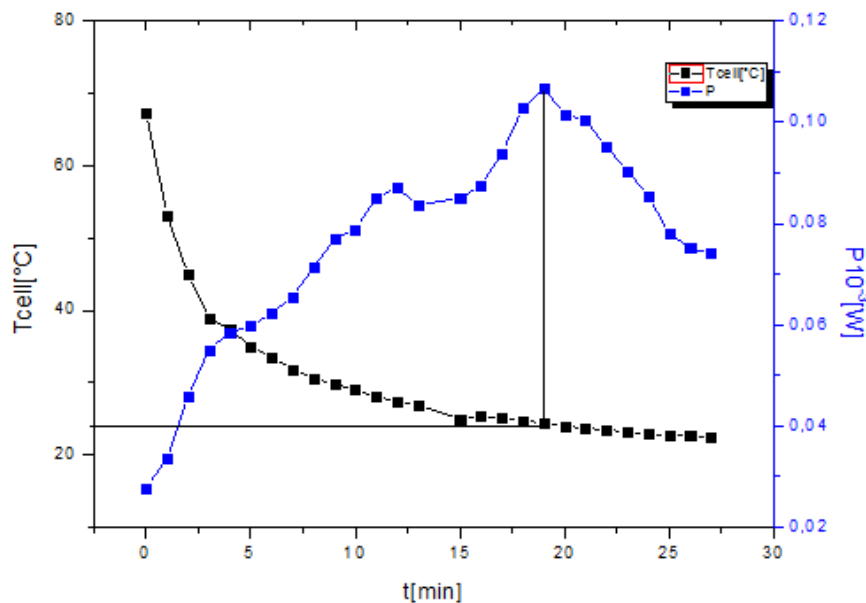


Fig. V. 7: Variation de la température de cellule et la puissance électrique en fonction du temps.

La figure V.6 présente la variation de la température de la cellule et la puissance électrique en fonction du temps, On remarque que la température de la cellule commence à diminuer jusqu'à atteindre une valeur équivalente à la température ambiante, la diminution de la température provoque une augmentation de la puissance électrique jusqu'à une valeur maximale $P = 0,1068 \cdot 10^{-3} \text{ W}$ à $T_{\text{cell}} = 24.4^\circ\text{C}$ après un $t = 19 \text{ min}$, puis elle commence à diminuer avec la diminution de la température.

On conclut que $T_{\text{cell}} = 24.4^\circ\text{C}$ est la température optimale du fonctionnement de la cellule pour ces conditions.

Une seule cellule génère moins de 0.6V avec un ampérage faible, c'est pour ça la puissance ($V \cdot I$) a des faibles valeurs pour l'augmenter il faut utiliser plusieurs cellules en série.

V.4.2 Effet du vitrage :

On pose un vitrage d'épaisseur $e = 3\text{mm}$ sur la cellule avec un rayonnement de 800W/m^2 .

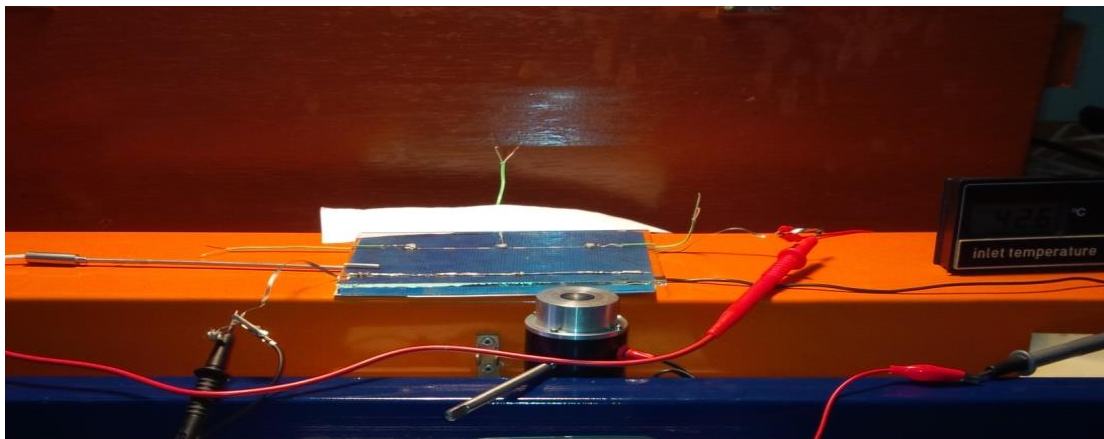


Fig. V. 7: Cellule photovoltaïque polycristallin avec vitrage.

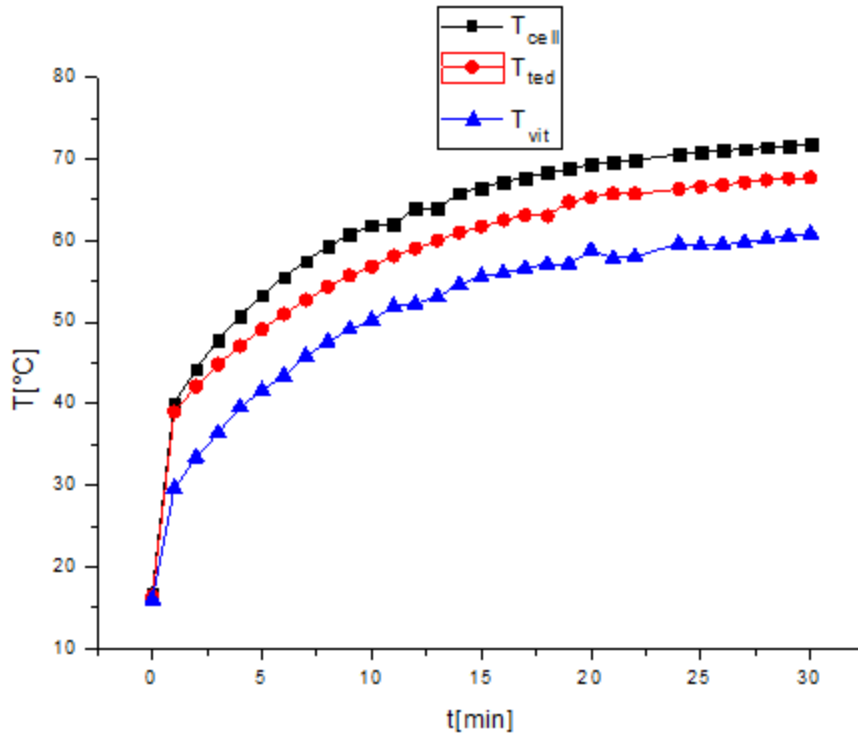


Fig.V. 8: Evolution de la température de la cellule, le tedlar et le vitrage en fonction de temps.

La figure V.8 montre la variation des températures de la cellule, du Tedlar et du vitrage en fonction du temps avec un rayonnement de 800 W/m^2 .

On remarque que la température du vitrage est la moins importante par rapport aux températures de la cellule et du tedlar puisque le vitrage va transmettre presque la totalité du rayonnement incident à la cellule. Cette dernière va l'absorber ce qui provoque l'augmentation de sa température.

La température de tedlar augmente aussi par l'effet de chaleur transféré par la cellule par conduction.

L'augmentation de la température de la cellule est plus considérable si on la compare avec celles du tedlar et du vitrage.

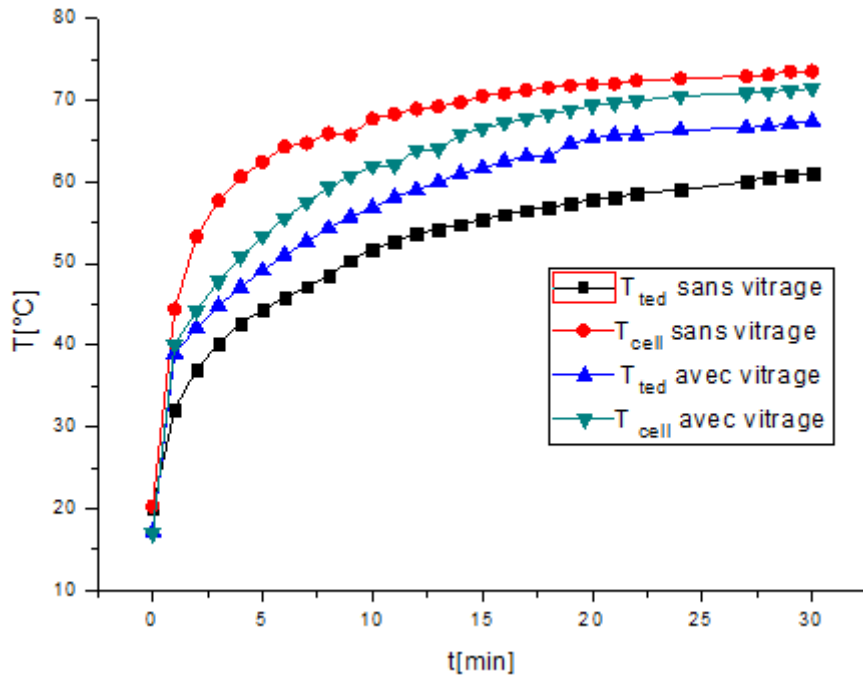


Fig. V.9: Evolution de la température de la cellule et le tedlar en fonction de temps avec et sans vitrage.

La figure V.9 Montre l'effet du vitrage sur la variation des températures de la cellule et du Tedlar en fonction du temps avec un rayonnement de 800 W/m^2 .

On remarque que la température maximale de la cellule T_{cell} non vitré atteint 73.5°C , alors qu'avec l'ajout d'un vitrage, elle a diminué pour atteindre 71.8°C , parce que une petite partie du rayonnement a été absorbé par le vitrage.

Par contre la température maximale de tedlar dans le cas sans vitrage atteint 60.6°C , alors qu'avec le vitrage elle est plus importante atteindre 67.7°C .

Donc l'ajout du vitrage à minimiser l'écart entre les températures de la cellule et tedlar à une valeur de 6.1°C au lieu de 33.6°C sans vitrage, parce que la convection entre la cellule et l'air ambiant a été négligée par la vitre. Par conséquent le mode de transfert de chaleur qui domine dans la cellule est la conduction.

V.4.3 Influence de la température de la cellule :

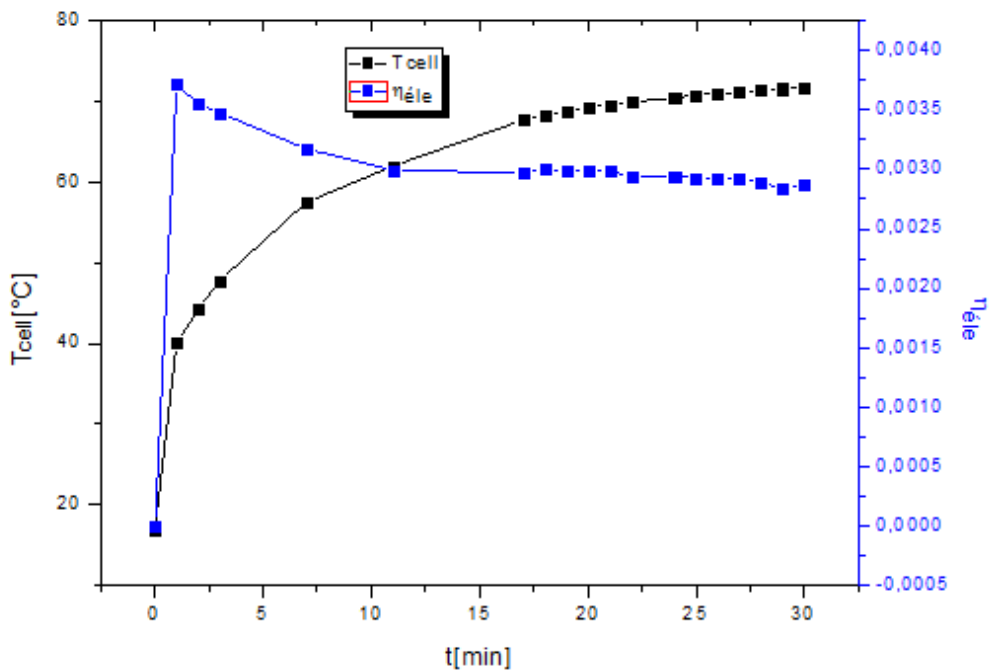


Fig. V.10: Variation de la température de la cellule T_{cell} et le rendement électrique en fonction du temps.

La Fig V. 10 montre l'allure du rendement électrique et la température de la cellule en fonction du temps, nous constatons que la valeur maximum du rendement électrique est remarquable seulement dans le premier temps puis il diminue au fur et à mesure avec l'augmentation de la température.

V.4.4 Effet du débit d'air :

On va abaisser la température de la cellule photovoltaïque par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation forcée d'air à travers la cheminée. Pour mesurer les températures à l'entrée et à la sortie d'air, deux thermocouples sont placés aux extrémités gauche et droite de la cheminée, dont la distance entre eux est égale toute sa longueur.

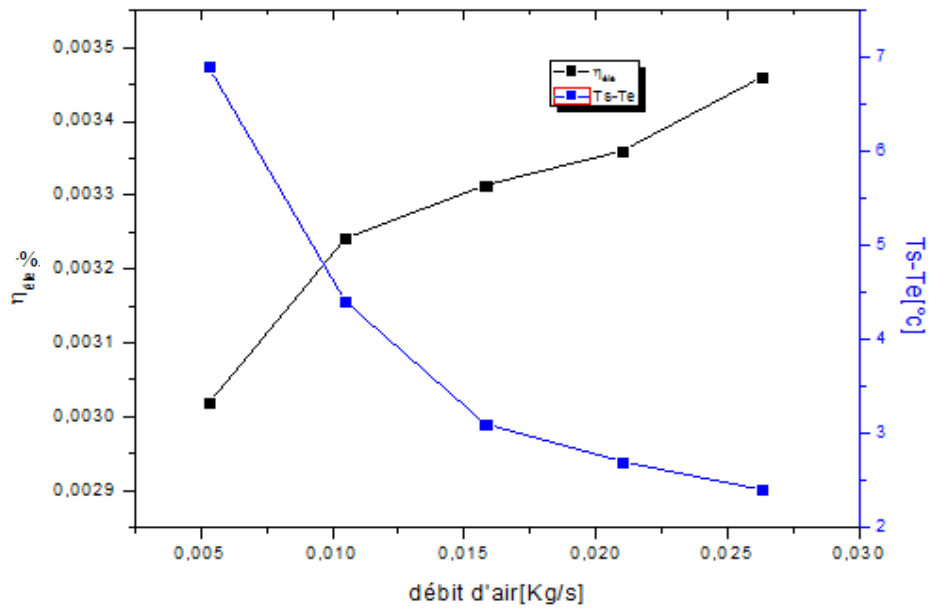


Fig. V.11: Variation du rendement électrique et la différence de température de sortie et d'entrée d'air en fonction de débit massique.

La Fig. V.11 montre l'effet de refroidissement sur le rendement électrique. On remarque que l'augmentation du débit massique à travers la cheminée provoque une diminution de la différence température sortie et d'entrée d'air d'une valeur de $\Delta T = 7^\circ\text{C}$ pour $\dot{m} = 0.005 \text{ Kg/s}$ à une valeur de $\Delta T = 2.4^\circ\text{C}$ pour $\dot{m} = 0.026 \text{ Kg/s}$. Cette extraction de chaleur permet une augmentation du rendement électrique avec un gain de 0.0005%.

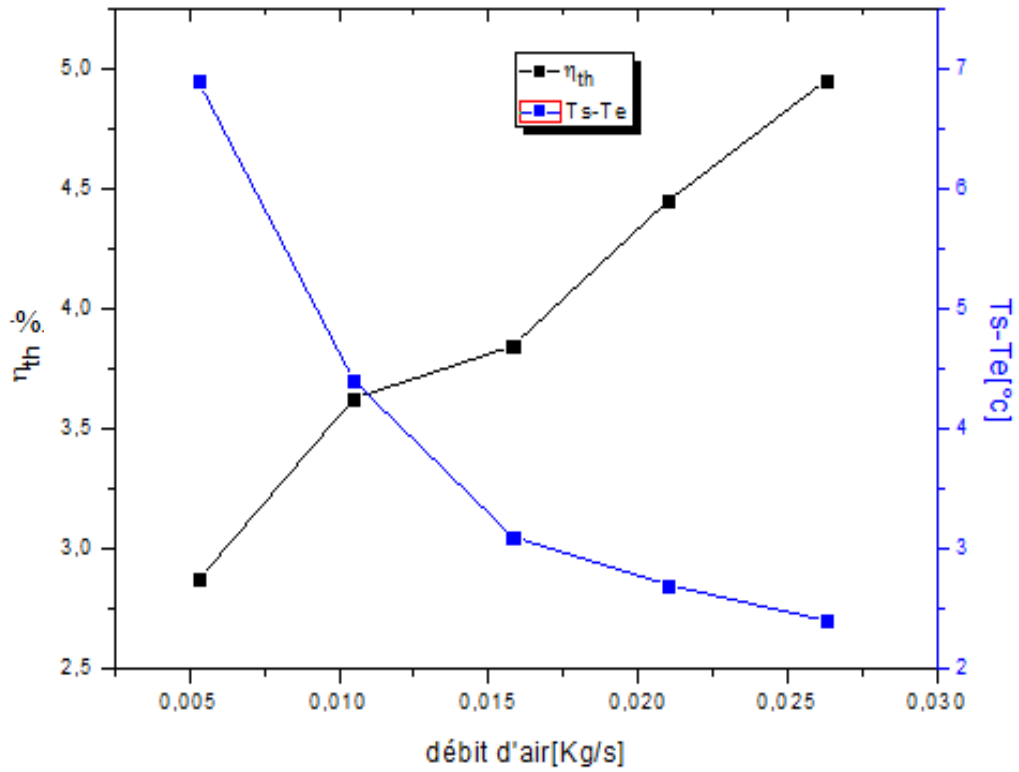


Fig. V.12: Variation du rendement thermique et la différence de température de sortie et d'entrée d'air en fonction de débit massique.

La Fig. V. 12 Présente la variation du rendement thermique et la différence de température de sortie et d'entrée d'air en fonction de débit massique.

On remarque qu'une augmentation du débit massique à travers la cheminier fait augmenter aussi le rendement thermique. On sait que plus d'air passe à travers le conduit d'air plus il ya un extrait d'énergie thermique.

V.5 Partie B : Panneau photovoltaïque polycristallin commercial.

V.5.1 Effet de l'intensité du rayonnement :

a) Evolution de la température du panneau en fonction du temps :

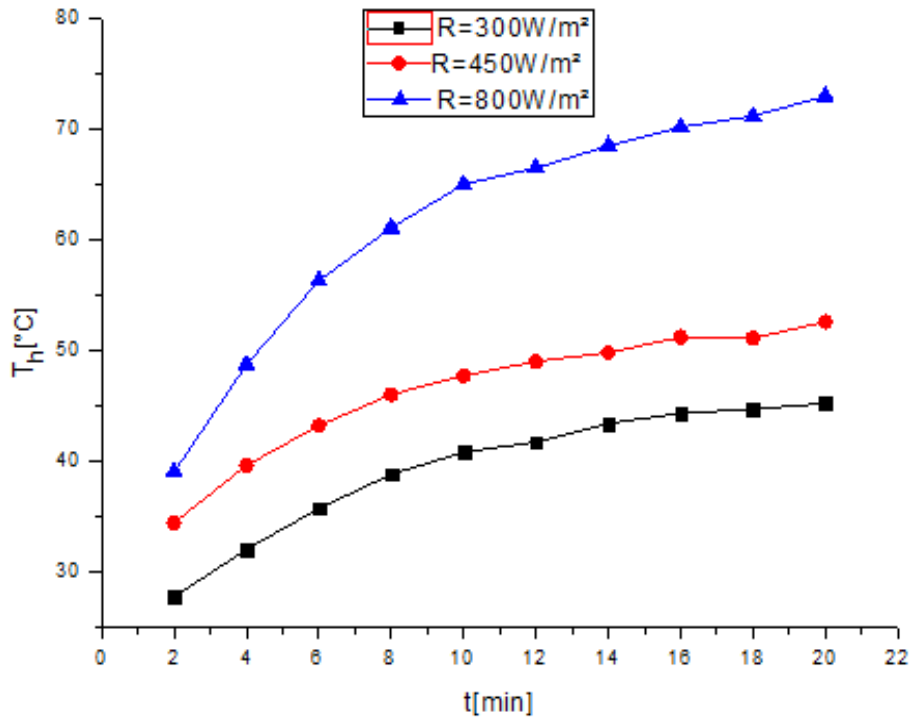


Fig. V.13: Influence de l'intensité de rayonnement sur la température de haut du panneau photovoltaïque.

La Fig. V.13 montre l'influence de l'intensité de rayonnement sur la température du panneau photovoltaïque.

Pour une intensité de 800 W/m^2 la température maximale atteinte par le panneau est

$T_h = 73^\circ\text{C}$, pour 450 W/m^2 $T_h = 52.6^\circ\text{C}$ et pour 300 W/m^2 $T_h = 45.2^\circ\text{C}$.

Alors l'augmentation de l'intensité entraîne une élévation importante de la température du panneau.

b) Evolution de la puissance électrique :

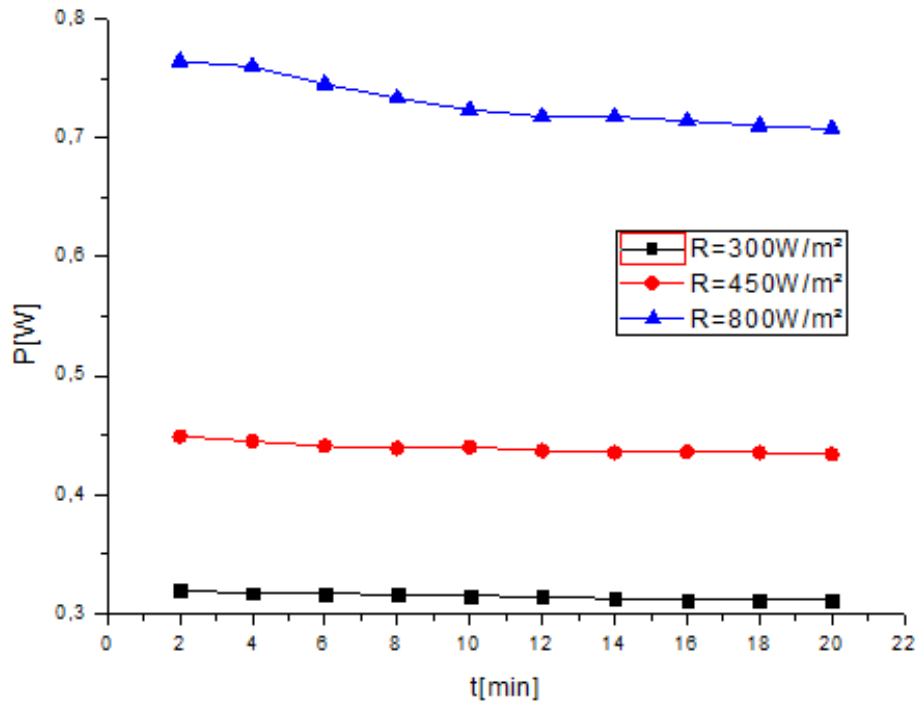


Fig. V.14: Influence de l'intensité de rayonnement sur la puissance électrique.

La Fig. V.14 Montre l'influence de l'intensité de rayonnement sur la puissance électrique généré par le panneau photovoltaïque au cours du temps.

On remarque que l'augmentation de l'intensité solaire a causé une augmentation remarquable de la puissance électrique du panneau photovoltaïque. Alors on constate que la puissance délivrée est proportionnelle à celle du rayonnement reçue.

Lorsque l'intensité solaire est élevée, elle conduit à augmenter à la fois de la production d'énergie électrique et de chaleur.

c) Evolution du rendement électrique :

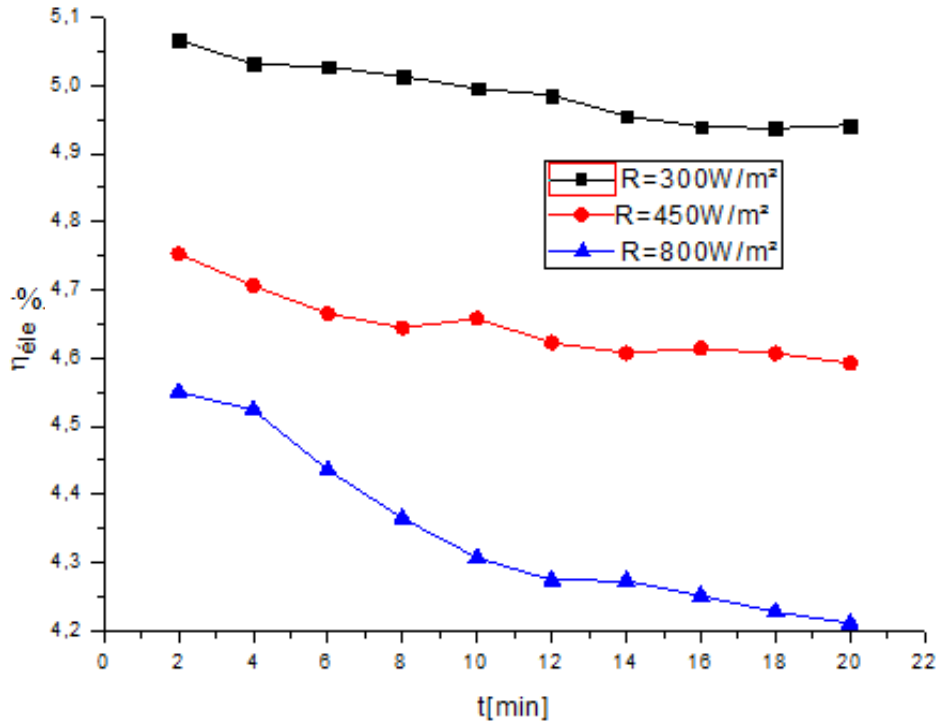


Fig.V.15: Influence de l'intensité de rayonnement sur le rendement électrique.

La Fig. V.15 présente l'influence de l'intensité de rayonnement sur le rendement électrique.

Pour une faible intensité de 300 W/m^2 nous avons obtenu un bon rendement électrique de 4,94%, 4,59% pour une intensité de 450 W/m^2 et 4,21% pour 800 W/m^2 .

On remarque bien que le rendement chute lorsque l'intensité du rayonnement augmente et cela est dû au réchauffement par rayonnement incident. Donc le rendement électrique à diminuer avec l'augmentation de l'intensité parce que les températures sont augmentées en parallèle.

V.5.2 Effet de refroidissement du panneau photovoltaïque par la circulation d'air à travers la cheminée.

Pour améliorer le rendement électrique du panneau photovoltaïque, il faut abaisser la température de ces cellules en faisant extraire sa chaleur à l'aide d'une circulation d'air forcé à travers la cheminée, où le panneau est posé au-dessus. Pour mesurer les températures d'air, les thermocouples sont placés juste avant et après le panneau.

On fixe un débit d'air égal à 0.005Kg/s pour deux valeurs d'intensité 450w/m² et 800w/m².

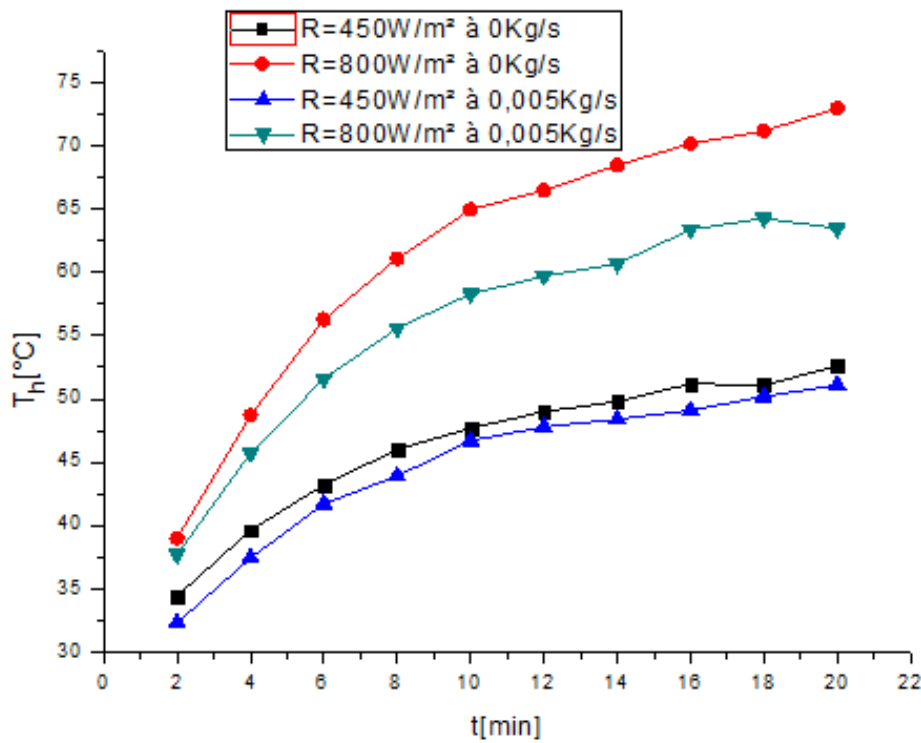


Fig.V.16: Effet du refroidissement sur la température du panneau pour $I=450w/m^2$ et $I=800w/m^2$.

Pour les deux intensités de rayonnement, on remarque que la température du panneau PV (à 0Kg/s) est plus élevée ($T_h=52.6^{\circ}C$ pour 450W/m² et 73°C pour 800W/m²) que celle d'un panneau PV-T(à 0.005Kg/s)

$T_h=51.1^{\circ}C$ pour 450W/m² et $T_h=63.5^{\circ}C$ pour 800W/m² qui assure son refroidissement.

Nous avons appliqué le même débit de 0.005Kg/s pour refroidir le panneau à deux différents rayonnements 800w/m² et 450w/m² où la température du PV à 800w/m² est beaucoup plus élevée a celle de 450w/m², ce qui explique que la différence importante des températures entre un PV et un PV-T pour un rayonnement 800w/m² que 450w/m² (équilibre thermique).

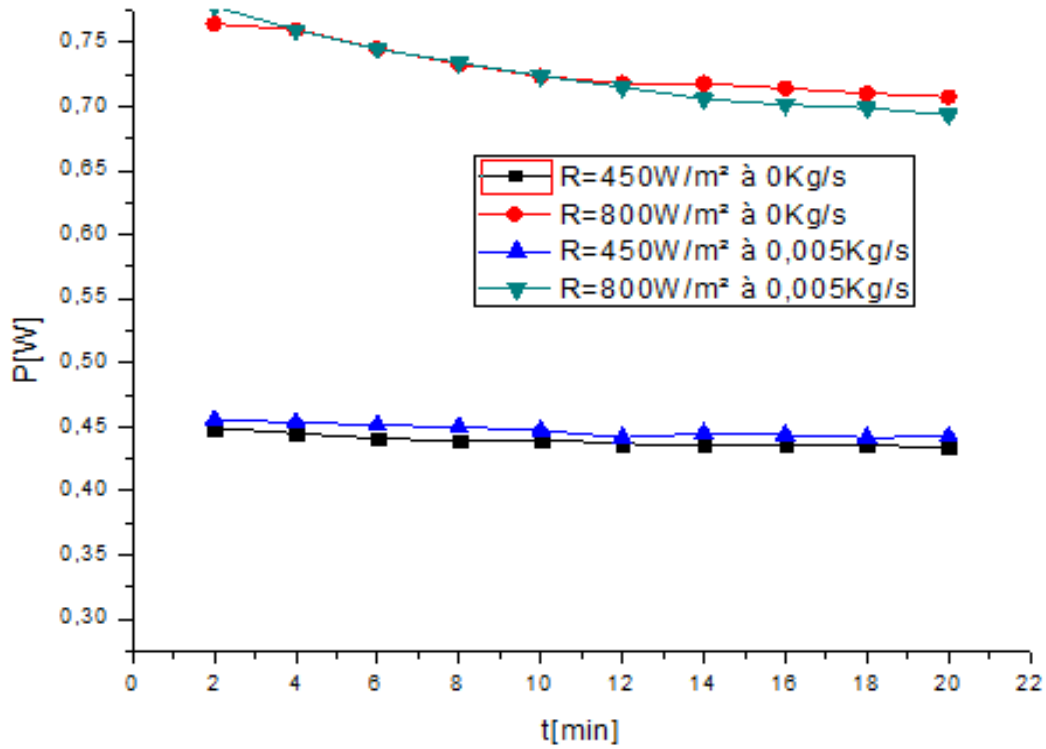


Fig.V.17 : Influence de débit et l'intensité du rayonnement sur la puissance électrique

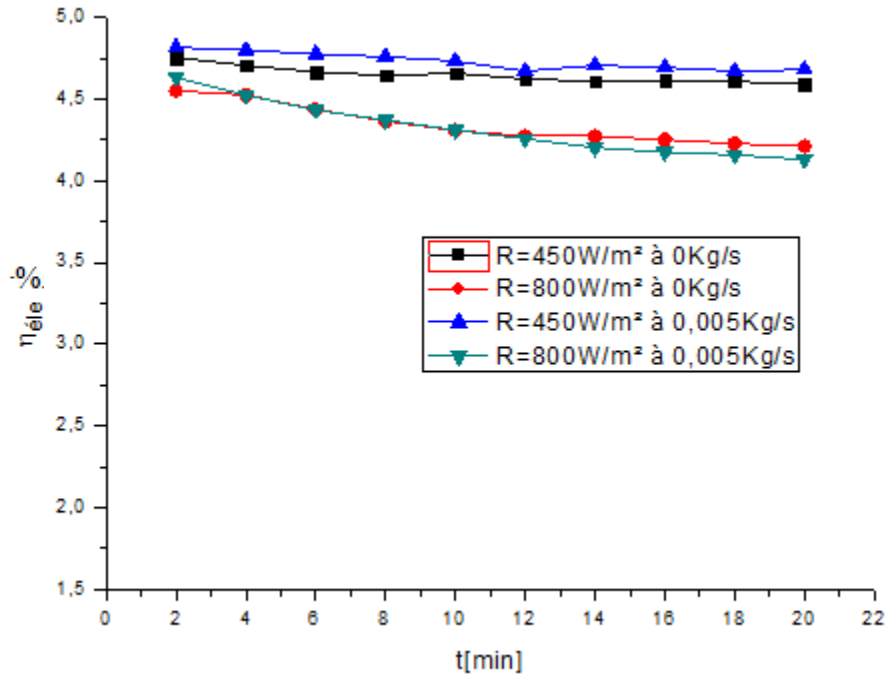


Fig.V. 18 Influence de débit et l'intensité du rayonnement sur la puissance électrique.

Les Figs V.17 et V.18 montrent l'effet du refroidissement du panneau PV sur sa puissance et son rendement électrique pour $I=450\text{w/m}^2$ et $I=800\text{w/m}^2$.

On remarque une petite augmentation de puissance qui entraîne une faible amélioration du rendement qui est due au choix d'un faible débit d'air, où la chaleur extraite du panneau par l'air circulant est faible surtout pour la plus grande intensité du rayonnement $I=800\text{w/m}^2$ où la température du panneau PV est très élevée, au début une légère augmentation de puissance et de rendement puis une égalité et par le temps une diminution.

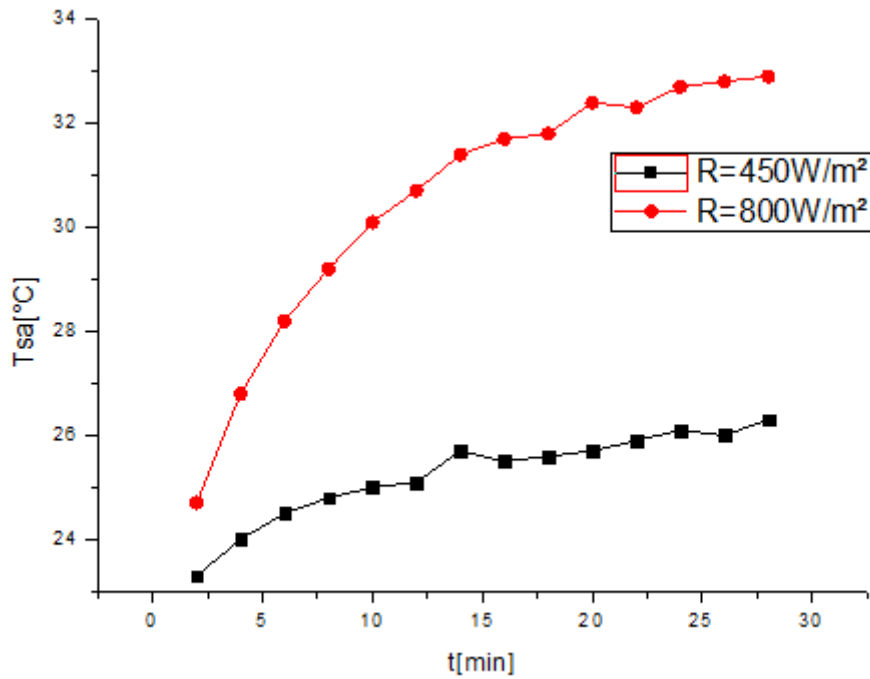


Fig.V.19: Evolution de la température de sortie d'air pour $I=800\text{w/m}^2$ et $I=450\text{w/m}^2$.

La Fig.V.19 montre une comparaison entre les températures de sortie d'air sous deux intensités de rayonnement 450 et 800W/m²

On remarque que la température d'air à la sortie augmente d'une façon remarquable d'une valeur $T_s=24.7^\circ\text{C}$ à $T_s= 32.9^\circ\text{C}$ pour une intensité de 800w/m² et d'une valeur de $T_s=23.3^\circ\text{C}$ à $T_s=26.3^\circ\text{C}$ pour $I= 450\text{w/m}^2$ pendant 28min.

On constate qu'un rayonnement important provoque une température de PV/T élevée donc plus de chaleur extraire qui est récupérée par l'air circulant dans la cheminer ce qui fait augmenter sa température T_s .

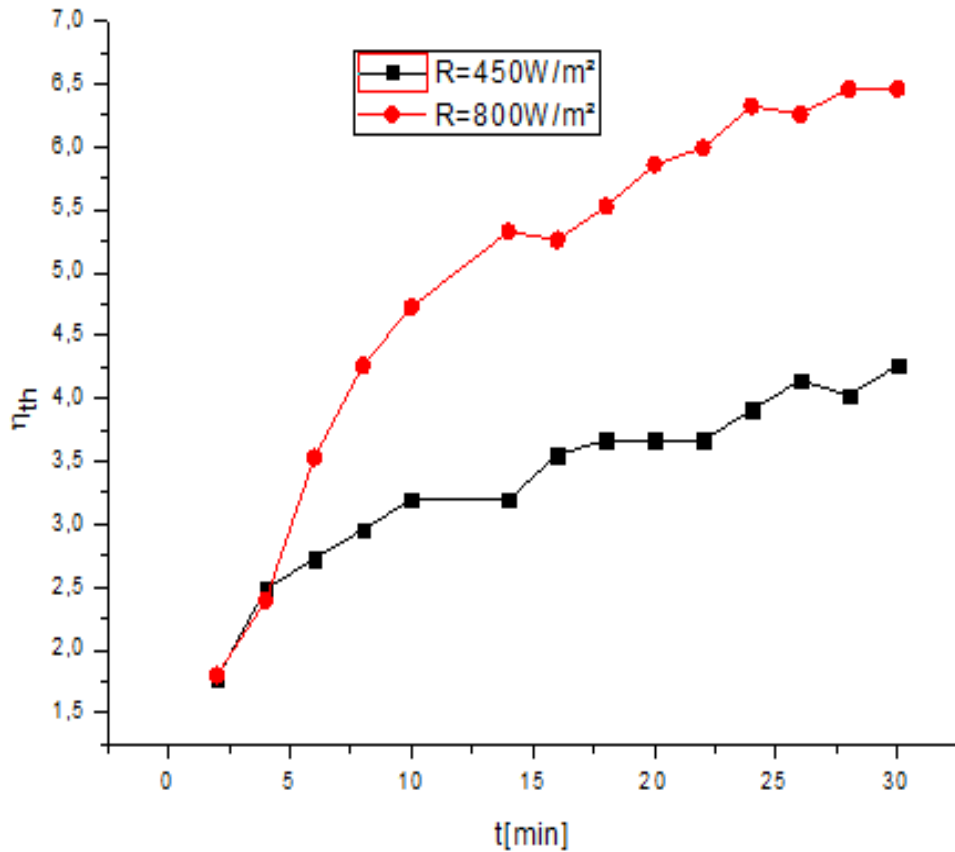


Fig.V.20 : Influence de l'intensité du rayonnement sur le rendement thermique.

La Fig .V.20 présente une comparaison entre les rendements thermique a deux intensités différentes.

On remarque que le rendement thermique augment avec l'élévation de l'intensité du rayonnement. Pour de 450 w/m^2 le rendement thermique peut atteindre une valeur de 4.26% et une valeur de 6.45% est atteinte pour $I=800 \text{ w/m}^2$. Cette élévation de rendement est due au quantité de chaleur extraire de la cellule qui est exposé à un rayonnement important $I=800\text{w/m}^2$ (température très élevée) et transférer par convection à l'air qui traverse la cheminée.

V.5.3 Effet de variation de débit d'air

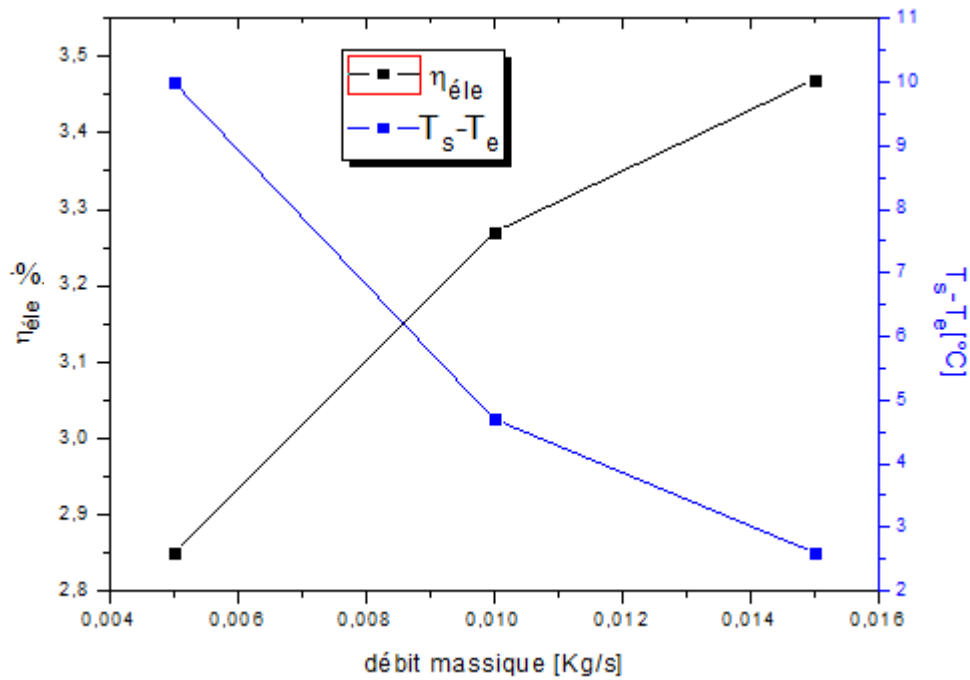


Fig.V. 21 : Effet du refroidissement sur le rendement électrique et la différence de la température.

La Fig. V.21 montre l'effet de la variation de débit massique sur le rendement électrique et ΔT d'air.

On remarque que l'augmentation du débit massique à travers la cheminier provoque une diminution de la différence température sortie et d'entrée d'air d'une valeur de $\Delta T=10^{\circ}\text{C}$ pour $\dot{m}=0.005\text{ Kg/s}$ à une valeur de $\Delta T=2.6^{\circ}\text{C}$ pour $\dot{m}=0.015\text{Kg/s}$. Cette extraction de chaleur assure le refroidissement du PV entrainant une diminution de la température des ces cellule ce qui permet une augmentation du rendement électrique avec un gain de 0.62 %.

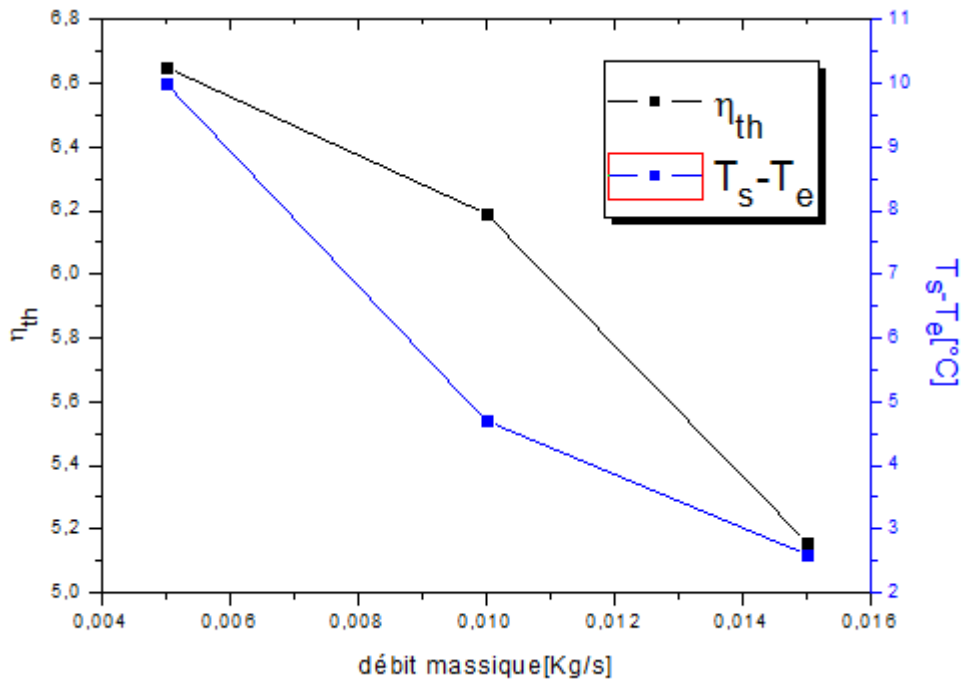


Fig.V. 22 : Influence du débit sur le rendement thermique et différence de la température.

Le Fig V.22 montre l'influence de la variation de débit massique sur le rendement thermique du panneau PV/T.

On remarque que l'augmentation du débit massique à travers la cheminée provoque une diminution de rendement thermique, pour $\dot{m}=0.005$ Kg/s la valeur est maximale 6.65% puis elle diminue jusqu'à une valeur de 5.16% pour $\dot{m}=0.015$ Kg/s. Donc une perte de 1.49%.

On constate que cette diminution du rendement thermique est due à l'abaissement de la température sortie d'air donc la différence de la température ($T_s - T_e$) diminue aussi. Par conséquent la durée de contact (temps de séjour de l'air dans la cheminée) de l'air avec la cellule est réduite provoquant moins de dissipation de la chaleur à partir de tedlar.[23]

Conclusion :

Au cours de la conversion photovoltaïque dans le capteur solaire, une chaleur est générée, augmentant ainsi la température au niveau de la cellule photovoltaïque et causant une chute de son rendement. L'objectif de ce travail est d'augmenter l'efficacité électrique du capteur, c'est-à-dire son rendement électrique en diminuant la température en utilisant un refroidissement par air.

En première partie nos expériences sont faites sur le capteur réalisé et qui contient une seule cellule (dans les conditions standards). Nous avons validé en premier lieu La loi de l'inverse du carré de Lambert, l'intensité du rayonnement est inversement proportionnelle au carré de la distance ainsi que l'évolution de la température générés par le projecteur en fonction de l'intensité du rayonnement qui sont proportionnelles.

Nous avons conclu que la température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires photovoltaïques la température optimale du fonctionnement est 24.4°C ainsi que les panneaux *PV*; car les performances électriques d'une cellule solaire sont très sensibles à celle-ci. Donc un refroidissement du panneau *PV* était obligé dans ce cas.

Nos expériences sont menées dans la deuxième partie sur un mini panneau solaire polycristallin. Afin de déterminer ses performances thermiques et électriques, comme température des cellules et la température de sortie d'air, le rendement électrique et thermique, pour différents valeurs d'intensité de rayonnement et différents valeurs de débit massique.

L'augmentation de l'intensité solaire a causé une augmentation remarquable de la puissance électrique du panneau photovoltaïque et elle conduit à augmenter à la fois de la production d'énergie électrique et de chaleur, provoquant un échauffement im

portante des cellules du panneau. Par contre le rendement électrique à diminuer avec l'augmentation de l'intensité parce que les températures sont augmentées en parallèle.

L'application d'un refroidissement au panneau par la circulation d'air avec un débit constant égal à 0.005Kg/s provoque une diminution de la température du panneau avec une faible amélioration du rendement électrique d'environ 0.02%. En parallèle la température de sortie d'air a augmenté à cause de la chaleur extraire du panneau et qui à été récupérée par l'air en résultant un gain thermique de 6.5%.

L'augmentation du débit massique d'air joue le rôle d'un élément important sur le refroidissement des cellules solaires photovoltaïques en augmentant ses performances électriques et qui permet une augmentation du rendement électrique avec un gain de 0.62 %. Par contre la température de sortie d'air à baisser ce qui conduit à une réduction de rendement thermique.

On note vers la fin, que les résultats de ce travail sont obtenus pour un cas particulier; la cellule solaire/panneau au silicium poly cristallin sous un éclairage constant (rayonnement verticale). En effet, le développement d'autres travaux dans le même contexte est envisagé concernant l'étude des MCP dans le refroidissement des capteurs *PV*.

Référence :

[1] M. El-A. Slimani , M. Amirat , S. Bahria « Modélisation et étude d'un capteur hybride PV/T à air, application au séchage solaire ». Premier Colloque International sur les hydrocarbures, les Energies et l'Environnement (HCEE 2014).

[2] A. Khelifa , H. Ben Moussa , K.Touafek , M.Adouane et I. Tabet « Etude du chauffage de l'eau par le capteur solaire hybride ». Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa 285 – 291. 2014

[3] M. Wolf « Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences». Energy Conversion, vol. 16, n° 1-2, pp. 79-90. 1976

[4] JR. E.C Kern & M. C. Russell « Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems», In Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, 1153 - 1157. 1978

[5] Hendrie S.D « Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors», In Proc. ISES Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, 1865-1869. 1979

[6] P. Raghuraman «Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance». Journal Solar Energy Engineering, vol.103, n° 2, pp. 291-298. 1981

[7] C. H. Cox & P. Raghuraman «Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collector». Solar Energy, vol. 35, n° 3, 227-241. 1985

[8] B. Lalovic & al, « A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector». Solar Cells, vol. 19, n° 2, pp. 131-138. 1986

[9] A. K. Bhargava & al « Study of a hybrid solar system-solar air heater combined with solar cells», Energy Convers. Mgmt 31, 471-479. 1991

[10] J. PRAKASH « Transient analysis of a photovoltaic / thermal solar collector for co-generation of electricity and hot air / water», Energy Convers. Mgmt 35, 967 – 972. 1994

[11] K. Sopian & al «An investigation into the performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector», In Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, USA, AES Vol. 35, 89-94. , 1995

- [12] T. Bergene & O.M Lovvik «Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells», *Solar Energy*, Vol. 55, 453-462. 1995
- [13] H. P. Garg & R. S. Adhikari «Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs». *Int. J. Energy Res.*23, 1295-1304. 1999
- [14] T. Hauser & H. Rogash «Latent heat storage on photovoltaics», In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol III, 2265-2267. 2000
- [15] Huang B.J & al « Performance evaluation of solar photovoltaic / thermal systems», *Solar Energy*, 70, 443 – 448. 2001
- [16] Zondag H. A. & al, «The thermal and electrical yield of a *PV*-Thermal collector», *Solar Energy* Vol. 72, N°2, 113-128. 2002
- [17] H. A. Zondag & al «The yield of different combined *PV*-thermal collector designs», *Solar Energy*, 74, 235 269. 2003
- [18] H. A. Zondag «Flat-plate *PV*-Thermal collectors and systems». A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Accepted pour publication. 2005
- [19] Zondag H. A. & al «Eds. *PV/T* Roadmap-a European guide for the development and market introduction of *PV*-Thermal technology». Rapport EU-Project *PV-Catapult.*, p 87. 2005
- [20] K. Touafek , A. Malek et M. Haddadi « Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique » *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 9 N°3 143 – 154.2006
- [21] Ya Brigitte ASSOA « Performances de capteurs solaires PV/T hybrides bifluïdes intégrables a l'enveloppe des bâtiments. Etude expérimentale et modélisation adaptée ».thèse de doctorat.2008
- [22] Sana Ben KILANI Sihem DRYSSI Slah Ben MABROUK « Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique » conference paper · november. 2014
- [23] A.S. Joshi, A. Tiwari, G.N. Tiwari, I. Dincer , B.V. Reddy « Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (*PV/T*) (glass-to-glass) system» *International Journal of Thermal Sciences* 48 154–164.2009
- [24] K. Touafek , A. Ouled Sidi Abdennacer et N. Mezzi « Etude et réalisation d'un capteur solaire hybride *PV/T* en feuille et tube » *Revue des Energies Renouvelables ICESD'11 Adrar* 153 – 158.2011

- [25] A. Khelifa , H. Ben Moussa , K. Touafek , M. Adouane et I. Tabet « Etude du chauffage de l'eau par le capteur solaire hybride ». Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa 285 – 291. 2014
- [26] Sebastien A.Brideau,Michael R. Collins «Development and validation of a hybrid PV/Thermal air based collector model with impinging jets ». Solar Energy 102 234–246. 2014
- [27] Yawovi NOUGBLEGA , Jean Christophe DUPRE , Kossi ATCHONOUGLO , Arnaud GERMANEAU , Fanck HESSER , Magolmèèna BANNA , Kossi NAPO 3, Jamal CHAOUFI , Claude VALLEE et Alain STRABONI « Conception et réalisation des capteurs hybrides photovoltaïque-thermiques sous vide ou avec lame d'air confinée » Afrique SCIENCE 11(2) 12 - 23 12 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>. 2015
- [28] M.Y. Othman , S.A. Hamid , M.A.S. Tabook, K. Sopian, M.H. Roslan, Z. Ibarahim «Performance analysis of *PV/T* Combi with water and air heating system: An experimental study» Renewable Energy 86 716e722. 2016
- [29]. [31] : Kalla fayçal « Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire ». Mémoire magistère. 2015
- [30] AKERM Mustapha « Etude et modélisation d'un capteur solaire » mémoire de magistère .
- [31] H. Ben Cheikh El Hocine and M. Marir-Benabba « Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT » Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°2 257 – 268. 2013
- [32] JEAN Gaillaud cour lycée des métiers de l'énergie, de la métallurgie et de la vente (ruelle sur touvre).
- [33] YACINE Fouad « Etude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques » mémoire de magister.
- [34] A. Ghellab , A. Kaabi, S. Annane et C. Brieche « Les retombées technico-économiques d'un capteur hybride photovoltaïque / thermique à air ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 425 – 440. 2013
- [35] RETERI Ahmed « étude du refroidissement des capteurs hybrides photovoltaïque-thermique (PV/T) à l'aide des MCP » . Mémoire de master . 2013
- [36] Feuille de route solaire thermodynamique. <http://www.ademe.fr/feuille-route-solaire-thermodynamique>

- [37] BENBOUZA Chaouki «Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie » mémoire de magistère. 2014
- [38] M.Y. Othman , S.A. Hamid, M.A.S. Tabook , K. Sopian , M.H. Roslan , Z. Ibarahim « Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study » Renewable Energy 86 716e722. 2016
- [39] A. Khelifa , H. Ben Moussa , K. Touafek , M. Adouane et I. Tabet « Etude du chauffage de l'eau par le capteur solaire hybride». Revue des Energies Renouvelables SIENR'14 Ghardaïa 285 – 291. 2014

ملخص :

تعتبر الألواح الشمسية الهجينة من أهم أنظمة التوليد المشترك للطاقة والتي تسمح بالإنتاج المتزامن للطاقة الكهربائية والحرارية الطاقة. ينتج عن عملية التحويل الكهروضوئية في الألواح الشمسية ارتفاع في درجة حرارة الخلية الضوئية مما يسبب انخفاض في الأداء. هذه الظاهرة هي نتيجة لجزء من الإشعاع الشمسي غير الممتص من طرف الخلايا والذي سيكون مسؤول عن تدفئتها. من ناحية أخرى، يتم فقدان هذا الجزء من الإشعاع الممتص كحرارة. هذا العمل يتركز حول دراسة تجريبية في مخبر التبادل الحراري لمعرفة تأثير شدة الإشعاع على درجة حرارة الخلية، والقدرة الكهربائية، الأداء الكهربائي والحرارة كذلك تأثير تبريد اللوحة.

الكلمات المفتاحية: الألواح، الشمسية، الهجينة، التحويل، الكهروضوئية، أداء، الكهربائي، الحراري.

Résumé :

Les capteurs solaires hybrides sont des véritables systèmes de cogénération permettant ainsi la production simultanée de l'énergie électrique et de l'énergie calorifique. Au cours de la conversion photovoltaïque dans le capteur solaire, une chaleur est générée, augmentant ainsi la température au niveau de la cellule photovoltaïque et causant une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement. D'autre part, cette partie du rayonnement absorbé est perdue sous forme de chaleur. Dans ce travail une étude expérimentale est effectuée au sein de laboratoire de transfert de chaleur porte sur l'effet de l'intensité de rayonnement sur la température des cellules, la puissance électrique, le rendement électrique et thermique ainsi que l'effet du refroidissement du panneau.

Mots clés : Capteurs, solaires, hybrides, conversion, photovoltaïque, rendement, électrique, thermique.

Abstract:

The solar hybrid collectors are true cogeneration systems allowing the simultaneous production of electrical energy and heat energy during the photovoltaic conversion in the solar collector, a heat is generated, thereby increasing the temperature at the photovoltaic cell and causing a drop in his performance. This phenomenon is due to the part of the solar radiation not absorbed by the cells and which will be responsible for its heating. On the other hand, this part of the absorbed radiation is lost as heat.

In this work an experimental study is carried out in heat transfer laboratory examines the effect of the radiation intensity on the cell temperature, electrical power; electrical and thermal performance as well as the effect of the cool panel.

Keywords: Solar, hybrid, collectors, cogeneration, photovoltaic, conversion, electrical, thermal, performance.