



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

N° :...

Université 20 août 1955-Skikda

Faculté des Sciences

Département de Physique

Mémoire de Master

Filière : Physique

Spécialité : Physique énergétique et énergies renouvelables

Thème

Conception et étude expérimentale d'un capteur solaire hybride PVT

Présenté par :
Zerradi Islem

Soutenu le : 30/06/2024 devant le jury composé de :

S. LABIOD	MCB	Université de Skikda	Président
I.TABET	MCA	Université de Skikda	Rapporteur
K. KHLIFA	MRA	URAER Ghardaïa	Rapporteur
A.CHELIGHEM	MAB	Université de Skikda	Examinatrice

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Avant tout, Louange à Allah le Tout Puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la force qui m'ont permis d'accomplir ce petit modeste travail.

*Je remercie sincèrement tous les membres de ma famille en particulier ma très chère mère, S. A mon très cher père, **zerradi saleh**. Qui ont toujours été là pour moi, et qui ont trop sacrifié pour moi. Merci pour vos prières, vos encouragements et votre soutien m'ont toujours été d'un grand secours. Puisse Dieu, le tout puissant vous préserver du mal, vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.*

*Je tiens à exprimer mes respectueuses gratitudees à Monsieur. Pr : **Khelifa Abdelkrim** (MRA URAER Ghardaïa) qui a tout d'abord accepté de m'encadrer et qui a suivi avec attention l'avancement de mes travaux je le remercie pour son soutien, son aide, sa générosité et sa patience avec moi afin de finir ce mémoire. Sans oublier lrs contributions de monsieur **Tabet Ismaïl** (MCA université de skikda) pour son encadrement dans ce travail*

*Je remercie Monsieur. **Labioud samir** (MCB à l'université de skikda) d'avoir accepté de présider ma soutenance de master, et Monsieur. **chelighem** (MAB à l'université de skikda) Pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

Gratitude à nos professeurs scolaires et universitaires qui nous ont apportés leurs précieux conseils et qui nous ont orientés, assistés et aidés pour y arriver.

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : État de l'art sur les capteurs solaires

I.1. introduction	3
I.2. L'énergie solaire.....	3
I.2.1. Définition.....	3
I.3. les capteurs solaires.....	4
I.3.1. Définition.....	4
I.3.2. Différents types des capteurs.....	4
I.3.2.1. Capteurs solaire thermiques.....	4
I.3.2.2. Classification des capteurs solaires thermiques.....	5
I.3.2.3. Les capteurs solaires Photovoltaïque.....	8
I.3.2.3.1. Principe de fonctionnement.....	8
I.3.2.3.2. Différents types de cellules photovoltaïques	8
I.3.2.3.3. Effet de quelques paramètres sur la performance de la cellule solaire ...	9
I.3.2.4. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques PV/T.....	10
I.3.2.4.1. Définition.....	10
I.3.2.4.2. Différents types des capteurs hybrides photovoltaïque thermique.....	11
I.4. conclusion.....	14

Chapitre II : étude expérimentale

II.1. Introduction.....	16
II.2. Présentation de la nouvelle conception EPVT.....	16
II.3. Les appareils des mesures	22
II.4. Le processus de mesure.....	25
II.5. Conclusion.....	26

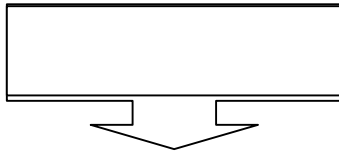
Chapitre III : Résultats et discussion

III.1. Introduction.....	27
III.2. Les conditions météorologiques du site (URAER – Ghardaïa).....	27
III.2.1. Le rayonnement solaire G les deux jours sélectionnés.....	27
III.2.2. La température ambiante les deux jours sélectionnés.....	28
III.3. Comportement électrique des systèmes.....	29
III.3.1. La variation des Températures journalières des systèmes.....	29
III.3.2. La puissance électrique des systèmes	30
III.3.3. Le rendement électrique des systèmes.....	32
III.4 Comportement thermique des systèmes (PVT – Capteur solaire	33
III.4.1. La variation des Température journalière des systèmes.....	33
III.4.2. La puissance thermique des systèmes.....	33
III.4.3. Le rendement thermique des systèmes.....	34
III.5. Conclusion.....	35
Conclusion générale.....	36
Références bibliographiques.....	37

Liste des figures

Figure I.1 : Classification de l'énergie solaire.....	01
Figure I.2 : Processus dans un capteur solaire plan.....	6
Figure I.3 : Les différents composants d'un capteur plan.....	7
Figure I.4 : Principe d'un capteur sous vide à caloduc.....	8
Figure I.5 : Concentrateur entièrement mobile.....	9
Figure I.6 : Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile.....	9
Figure I.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant.....	10
Figure I.8 : Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension... ..	13
Figure I.9 : Influence de la température sur les courbes courant-tension.....	13
Figure I.10 : Capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T.....	14
Figure I.12 : Capteur solaire hybride PVT à air.....	16
Figure I. 13 : Capteur solaire hybride à eau.....	16
Figure I. 14 : Capteur solaire hybride PV/T à concentration.....	18
Figure II.1 : Image d'un système évaporateur solaire EPVT.....	18
Figure II.2 : Diagramme des différentes composant du système PVT.....	18
Figure II.3 : Module photovoltaïque (PV).....	19
Figure II.4 : Image de l'échangeur thermique en cuivre.....	19
Figure II.5 : Capteurs à tubes sous vide.....	20
Figure II.6 : Concentrateur solaire Le cylindro-parabolique.....	21
Figure II.7 : Schéma géométrique du collecteur thermique-miroir en haut.....	21
Figure II.8 : Image d'un miroir de réflexion.....	22
Figure II.9 : La conception 2D de la cheminé d'air.....	23

Figure II.10 : Pyromètre.....	24
Figure II.11 : Image de la télécarte utilisée	24
Figure II.12 : Image d'un thermocouple type K.....	25
Figure II.13 : Image de l'application HTML Node-red.....	26
Figure II.14 : Le processus de mesure	27
Figure III.1 :Variation de l'éclairement solaire durant les jours 7-8 Juin 2024.....	29
Figure III.2:Variation de la température ambiante durant les jours 7-8 Juin 2024.....	30
FigureIII.3:Variation des températures des systèmes durant le jour 7 Juin 2024	31
Figure III. 4 : Variation des températures des systèmes durant le jour 8 Juin 2024	31
Figure III.5:Variation de la puissance électrique des systèmes durant le jour 7 Juin 2024.....	32
Figure III. 6 : Variation de la puissance électrique des systèmes durant le jour 8 Juin 2024.....	32
Figure III. 7 : Variation du rendement électrique des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024.....	32
Figure III. 8 : Variation des températures des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024	33
Figure III. 9 : Variation de la puissance thermique des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024.....	34
Figure III. 10 : Variation du rendement électrique des systèmes durant le les jours 7- 8 Juin 2024.....	35



Introduction générale

Introduction générale

Le monde s'est industrialisé et les besoins en énergie se multiplient de façon Exponentielle pour soutenir tant l'évolution économique que les besoins en termes de confort et de consommation des populations. Actuellement, nous arrivons à un moment critique de l'exploitation en énergie : nous réalisons la fragilité et l'incohérence de notre fonctionnement.

En effet, les ressources de la planète en sédiment fossile s'épuisent, le pétrole se raréfie et outre les conséquences économiques, force est de constater que soit il faut trouver des alternatives aux sources énergétiques actuelles, soit trouver une alternative à notre mode de civilisation même. Sans énergie, c'est tout notre quotidien qui disparaît.

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie qui utilisent des ressources naturelles considérées comme inépuisables : vent, soleil, marées, chutes d'eau, terre, végétaux...

Ces énergies ne produisent pas de gaz à effet de serre, de rejets polluants, et n'engendrent pas ou peu de déchets. Ils n'utilisent pas les ressources fossiles de la planète, comme le gaz naturel ou le pétrole **[1-2]**

Dans la majorité des applications, l'énergie solaire est utilisée pour produire séparément de l'énergie thermique et électrique au moyen des capteurs solaires thermiques et des modules photovoltaïques respectivement. Cependant, une amélioration possible des deux technologies consiste à des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques (PV/T), qui permet de produire simultanément de la chaleur et énergie électrique utilisant le rayonnement solaire **[2,8]**.

Un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T consiste à l'intégration d'un module photovoltaïque (PV) dans un capteur thermique plan conventionnelle. L'utilisation des capteurs hybrides photovoltaïque thermique PV/T conduit à une augmentation de la production d'énergie par unité de surface de capteur par rapport au capteur solaire thermique conventionnel ou module photovoltaïque **[8]**.

Le rendement des capteurs hybrides photovoltaïque thermique PV/T reste toujours à besoin d'une amélioration, pour cette raison, beaucoup de

recherche reste encore à faire sur l'amélioration des performances de ces capteurs.

La région de Ghardaïa située au centre de la partie nord du Sahara algérien, à 600 km au sud d'Alger, offre un potentiel énergétique solaire très important. La majorité des sites situés dans cette région pourraient être considérés comme sites isolés vue leur superficie immense et leur éloignement par rapport à tout réseau électrique [2].

Dans ce travail nous allons faire une étude expérimentale sur une nouvelle configuration d'un capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, il se compose de six parties essentielles : le module photovoltaïque mono cristalline ; un échangeur thermique en cuivre ; un sous vide ; un cylindro-parabolique ; une cheminée et un miroir de réflexion.

Pour cela notre mémoire est organisée en trois chapitres

Le premier chapitre constitue une synthèse bibliographique à la fois technologique et scientifique abordant sur les capteurs solaires thermiques.

Dans le second chapitre nous allons nous intéresser à la réalisation d'un capteur hybride thermique photovoltaïque PV/T à air,

Lors du troisième chapitre nous allons présenter les résultats aboutis des essais expérimentaux sur le capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T.

Et en terminant par une conclusion générale qui récapitule l'interprétation des résultats obtenus.

Chapitre I

États de l'art sur les capteurs solaires

Chapitre I

Etat de l'art sur les capteurs solaires

I.1. Introduction :

Une énergie renouvelable est une énergie renouvelée naturellement. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels, réguliers ou constants. Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole et tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables car les ressources sont consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle elles sont créées [1].

Les sources d'énergies renouvelables sont fréquentes et variées. Parmi les plus connues, se trouvent :

- ✓ Hydraulique (Eau : turbines).
- ✓ Biomasse (bois CO₂ de combustion = CO₂ de la croissance des arbres : photosynthèse).
- ✓ Energie géothermique.
- ✓ Solaire (thermique et photovoltaïque) - Eolienne (Vent).

I.2. L'énergie solaire :

I.2.1. Définition :

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des capteurs solaires [2-4].

L'exploitation de l'énergie solaire peut classer en deux catégories principales

- Le **solaire photovoltaïque** qui convertit la lumière solaire en électricité, par l'intermédiaire de panneaux solaires photovoltaïques (ou cellules photovoltaïques).
- Le **solaire thermique** qui convertit le rayonnement solaire en chaleur. Dans l'utilisation la plus courante de l'énergie solaire thermique, cette chaleur est

récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude, au moyen de panneaux solaires thermiques (ou capteurs solaires thermiques) ; mais d'autres formes d'utilisation existent également.

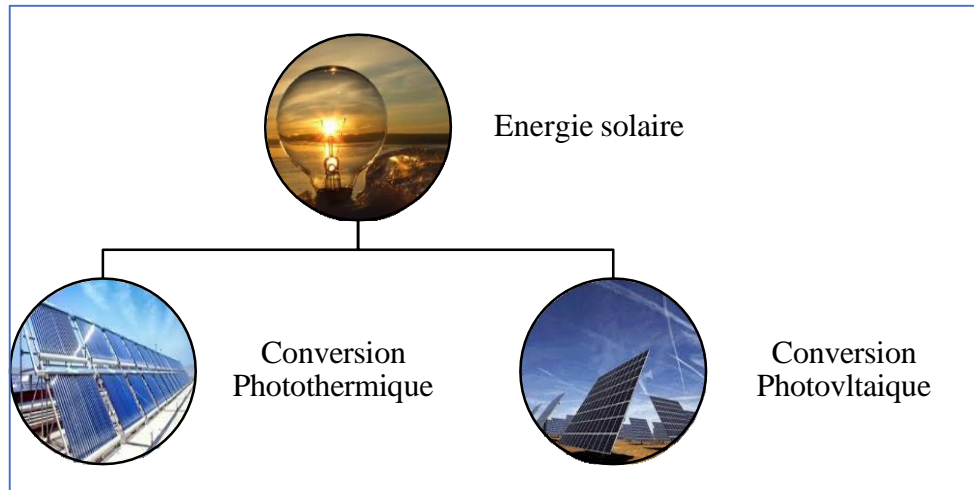


Figure I.1 : Classification de l'énergie solaire

I.3. Les capteurs solaires

I.3.1. Définition :

Un capteur solaire est un élément d'une installation solaire destiné à recueillir l'énergie solaire pour le convertir en énergie thermique et le transférer à un fluide caloporteur ou en énergie électrique à travers des cellules photovoltaïques.

I.3.2. Différents types des capteurs :

I.3.2.1. Capteurs solaire thermiques :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le principe de conversion du rayonnement solaire en énergie thermique est basé sur la paroi absorbante qui s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident, et l'effet de serre qui consiste à accumuler la chaleur dans un capteur pour la transférer directement ou par l'intermédiaire d'un fluide qui circule sous cette paroi et récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température ($T_{fs} - T_{fe}$) à la traversée du capteur.

Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à haute température [1]. Les centrales thermiques peuvent même produire de l'électricité à partir de la chaleur à haute température.

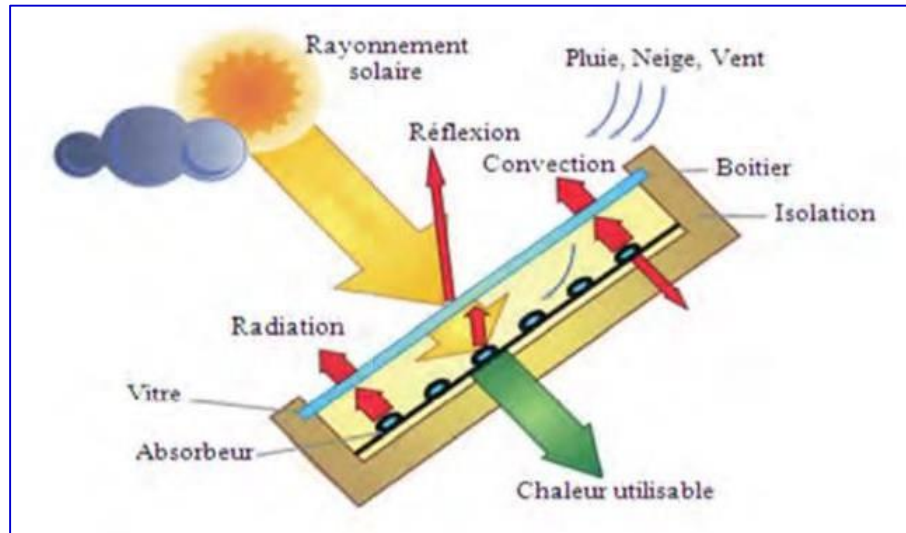


Figure I.2 : Processus dans un capteur solaire plan.

I.3.2.2. Classification des capteurs solaires thermiques :

❖ Capteur solaire plan :

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et du corps noir.

Un Capteur solaire à plaque plane est constitué d'un imperméable, en métal ou en fibre de verre boîte isotherme contenant une plaque d'absorption de couleur foncée, l'absorbeur avec un ou plusieurs vitrages. Les plaques absorbantes sont généralement fabriquées à partir de métal en raison de sa haute conductivité thermique et peints avec des revêtements de surface sélectifs spéciaux afin d'absorber et transférer la chaleur mieux que la peinture noire. Le vitrage recouvert réduit la convection et les pertes de chaleur du rayonnement vers l'environnement [1].

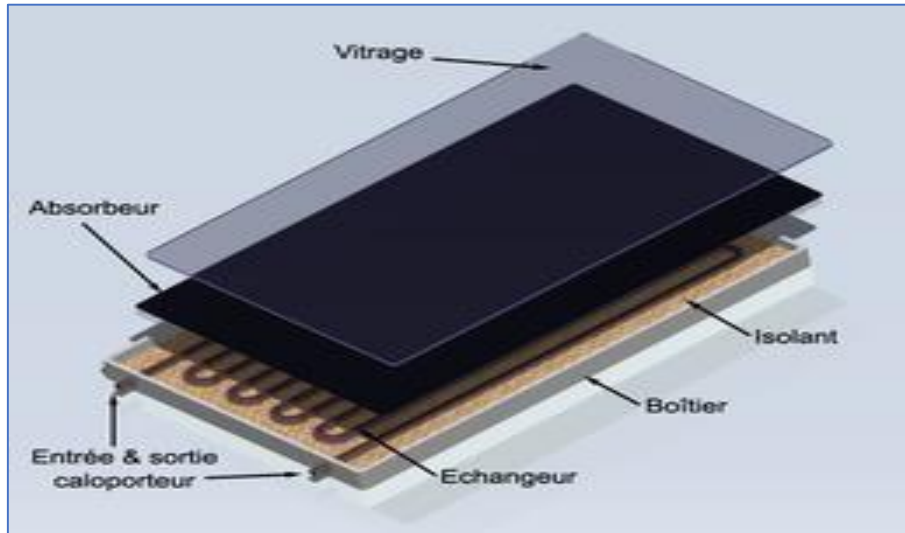


Figure I.3 : Les différents composants d'un capteur plan

Il existe deux grandes catégories des capteurs solaires à plaque plane :

- Capteurs plans à liquide avec vitrage
- Capteurs plans à liquide sans vitrage

❖ **Capteurs à tube sous vide :**

L'utilisation de ce type est très favorable dans le cas où la température de fonctionnement requise est très élevée ($>100^{\circ}\text{C}$), ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne). On distingue deux types :

✓ ***Tubes sous vide à flux direct***

Il est constitué d'une série de tubes de verre dans lesquels passe un autre tube collecteur de chaleur. La paroi des tubes est double, comme celle d'une bouteille thermos, et on y fait le vide afin de limiter les pertes thermiques par convection.

✓ ***Tubes sous vide à caloduc***

Dans les tubes sous vide à caloduc, le tube de l'absorbeur contient une petite quantité de liquide (fluide organique, alcool...). Sous l'action du rayonnement solaire, le liquide se transforme en vapeur qui monte en haut du tube ou elle se condense au contact de l'échangeur et transfère la chaleur au fluide caloporteur.

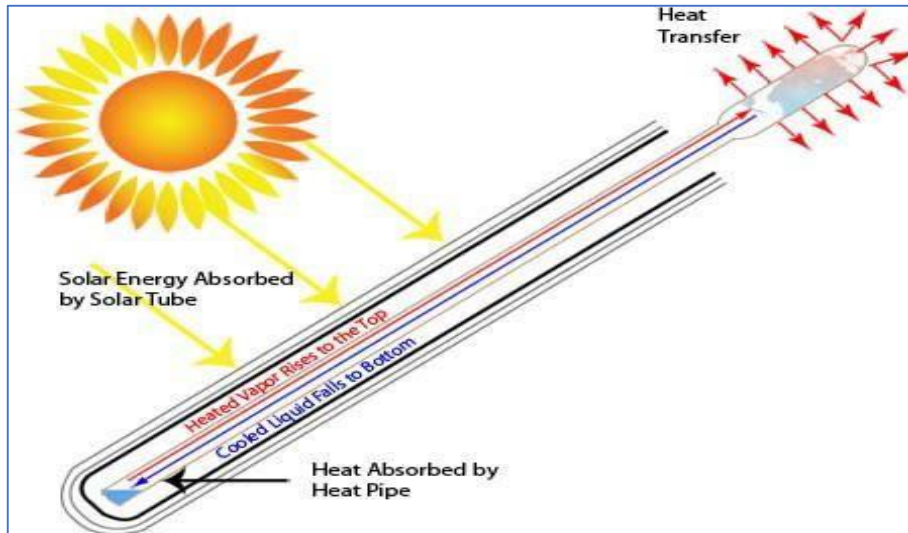


Figure I.4 : Principe d'un capteur sous vide à caloduc

❖ **Les capteurs à concentration :**

Ce sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteurs, lentilles...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture.

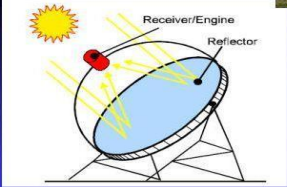
✓ **Le capteur entièrement mobile**




Ce sont des capteurs à concentration ponctuelle, linéaire ; les ponctuels sont équipés de concentrateurs de révolution orientables autour de deux axes. Linéaires utilisent des concentrateurs cylindrique mobiles autour d'un axe de rotation, de préférence parallèle à l'axe du globe.

Les capteurs à concentration : les "dishes"

Concentration sur un absorbeur ponctuel

Suivi du soleil sur 2 directions



**Concentration : 1000
1 à 50 kW/e
Rendement 20 à 30 %**

Figure I.5 : Concentrateur entièrement mobile

✓ **Capteurs à chaudière fixe et concentrateur mobile :**

La solution chaudière fixe-concentrateur mobile correspond essentiellement aux centrales à tour ou aux grosses centrales à foyer linéaire ; la chaudière de grande dimension est fixe et le concentrateur est constitué d'un ensemble d'héliostats qui réfléchissent le rayonnement solaire vers cette chaudière.

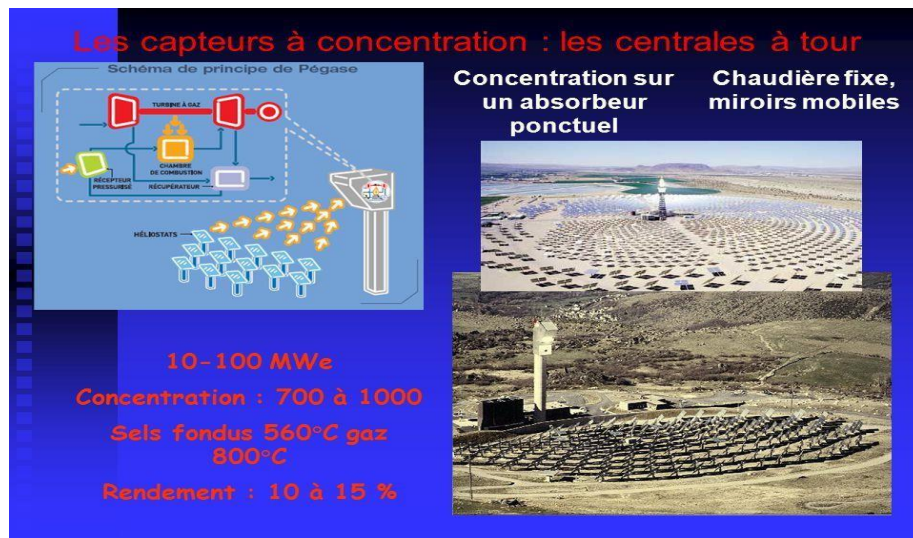


Figure I.6 : Capteur à chaudière fixe et concentrateur mobile.

✓ **Capteur à concentration fixe et chaudière mobile :** Le réflecteur ou le réfracteur constitue la partie encombrante et pesante du capteur, d'où les solutions à concentrateur fixe.

I.3.2.3. Les capteurs solaires Photovoltaïque :

I.3.2.3.1. Principe de fonctionnement :

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur qui peut convertir l'énergie solaire en courant électrique continu à travers l'effet photovoltaïque. Cette cellule est constituée d'au moins deux couches de matériau semi-conducteur. Une couche a une charge positive et l'autre de charge négative [55,56]. Lorsque la lumière pénètre dans cette cellule, une partie des photons de la lumière sont absorbés par les atomes du semi-conducteurs, en libérant des électrons de la couche négative pour s'écouler à travers un circuit externe et à l'arrière dans la couche positive. Ce flux d'électrons produit un courant électrique [7-8].

La figure .1 montre une construction d'une cellule photovoltaïque

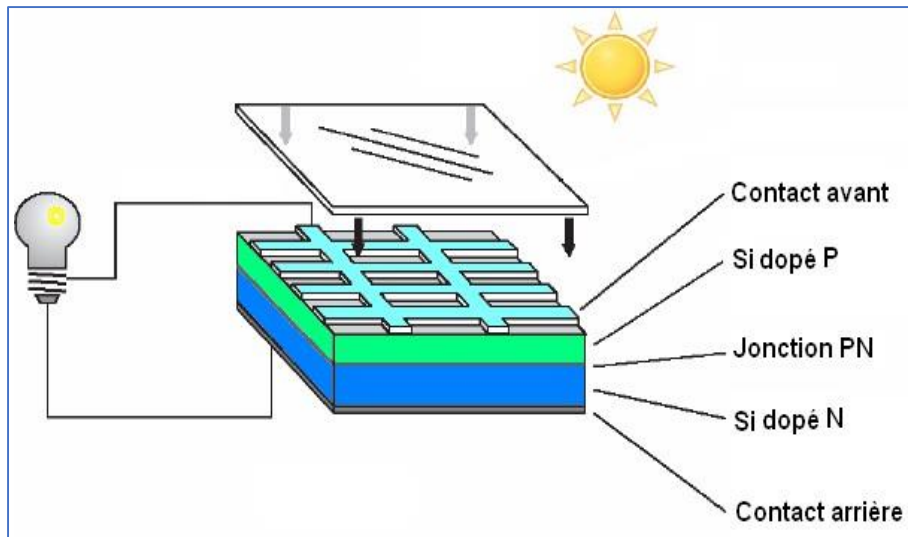



Figure I.7 : Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant.



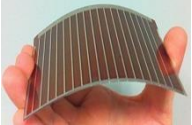
I.3.2.3.2. Différents types de cellules photovoltaïques

De nombreuses cellules photovoltaïques ont vu le jour pour exploiter au mieux la lumière du soleil dans la production d'électricité. Plusieurs matériaux tels que le silicium, les terres rares ou plastiques sont employés, mais chaque technologie a ses atouts et ses faiblesses dans ce domaine prometteur [8] .

De nos jours, nous distinguons plusieurs types de technologies pour les cellules photovoltaïques réparties dans les tableaux suivants :

Tableau I.1: Les cellules photovoltaïques standards.

Type de cellule	Avantage	Inconvénient	Figure
Silicium monocristallin	-Bon rendement, de 14 % à 16 % - Nombre de fabricants élevés.	-Cout élevé -Rendement plus faible sous un faible éclairement ou un éclairement diffus.	

<p>Silicium poly cristallin</p>	<p>-Rendement de 9 à 11 %.</p> <p>-Moins cher que le monocristallin</p>	<p>-Rendement faible sous un faible éclairement ou soleil diffus</p>	
<p>Silicium amorphe</p>	<p>-Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus</p> <p>-Un peu moins chère que les autres techniques.</p> <p>-Intégration sur supports souples ou rigides.</p> <p>-Rendement jusqu'à 10 %.</p>	<p>Rendement faible en plein soleil, de 5 % à 7 %.</p> <p>Nécessite de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de Si-c.</p> <p>-Performances diminuent avec le temps dans les premiers temps d'exposition à la lumière naturelle (3-6 mois)</p>	
<p>Les cellules photovoltaïques en couches minces</p>	<p>-Un fort potentiel de réduction des coûts liés à des processus de fabrications peu onéreux :</p> <p>-Une flexibilité de mise en œuvre des matériaux, notamment avec l'utilisation de substrats souple.</p> <p>-La possibilité d'obtenir des cellules semi-transparentes.</p>	<p>-Le rendement encore faible.</p> <p>-La rareté de certains matériaux.</p> <p>La toxicité de certains matériaux</p>	

I.3.2.3.3. Effet de quelques paramètres sur la performance de la cellule solaire

❖ Influence de l'éclairement

Comme nous l'avons déjà évoqué, la puissance électrique délivrée par la cellule varie énormément selon l'éclairement. Le courant débité lui est directement proportionnel alors que la tension augmente mais de façon moins sensible [4,9].

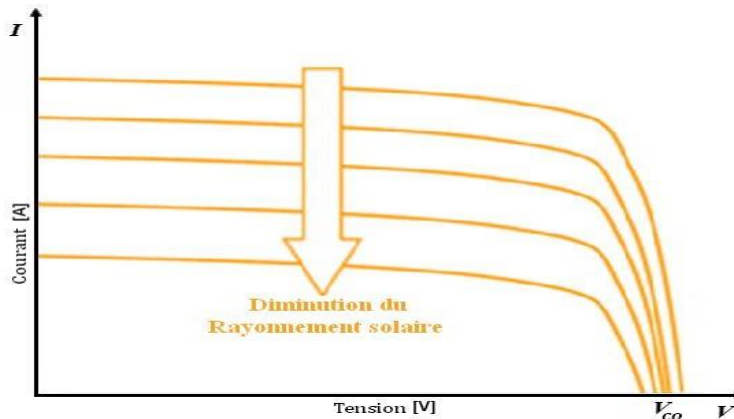


Figure I.8 : Influence de l'éclairement sur les courbes courant-tension [8].

❖ Influence de la température

Les cellules sont assez sensibles aux variations de température. En effet, les résistances internes augmentent avec la température. Quand la température d'une cellule augmente, la tension diminue de l'ordre de $-2 \text{ mV}^{\circ\text{C}^{-1}}$, tandis que le courant augmente faiblement (environ $+ 0.03\% \cdot ^{\circ\text{C}^{-1}}$). La variation de puissance est opposée à celle de la température (environ $-0.4 \% \cdot ^{\circ\text{C}^{-1}}$). Ce comportement est regrettable car généralement, plus il y a de soleil, plus la température de la cellule augmente [4,9].

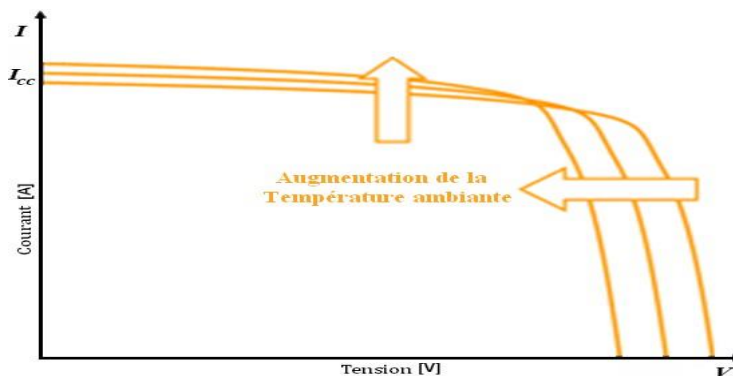


Figure I.9 : Influence de la température sur les courbes courant-tension [9].

I.3.2.4. Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques thermiques PV/T :

I.3.2.4.1. Définition :

Un capteur photovoltaïque thermique (PVT) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue sous forme de chaleur [1,9].

Un module PV convertit 6-20% du rayonnement solaire d'incident en électricité selon son type et les conditions climatiques. Le rayonnement solaire avec la longueur d'onde de 0.6 à 0.7 μ m est absorbé par les cellules PV et convertie en électricité, alors le restant est la majeure partie de rayonnement solaire d'incident est convertie en chaleur qui augmente la température du module photovoltaïque et réduit son efficacité .

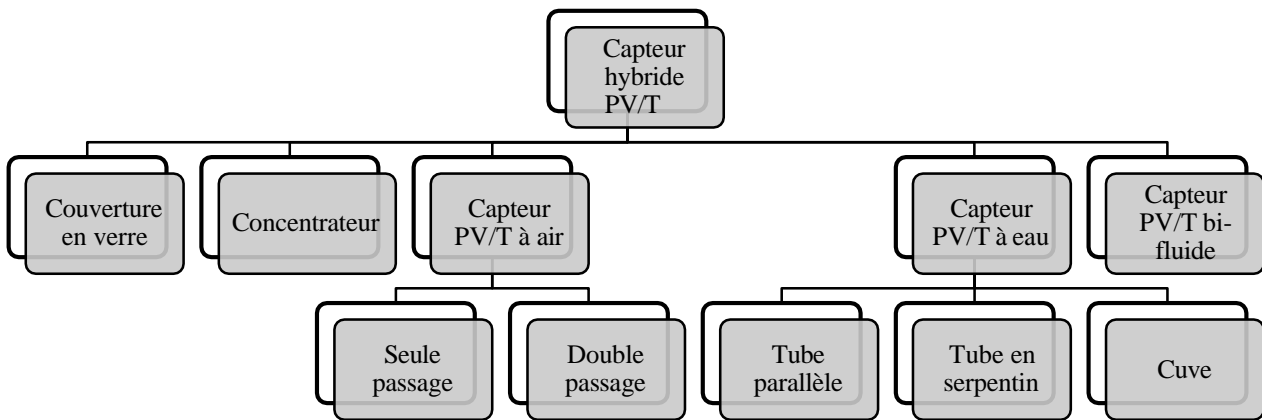
Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé et selon le type d'absorbeur et la couverture.



Figure I.10 : Capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T

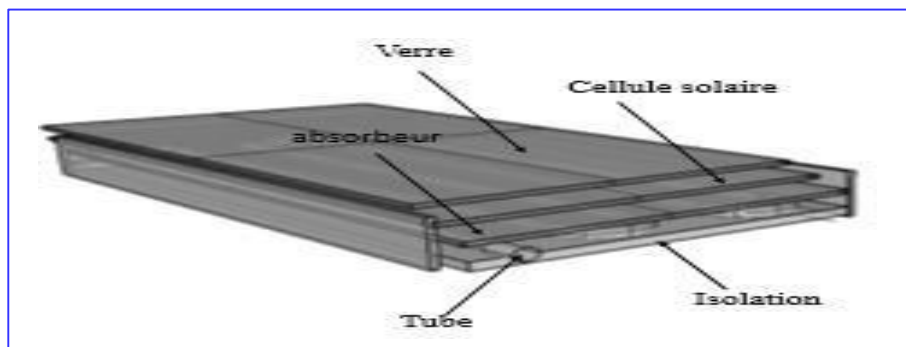
I.2.3.2. Différents types des capteurs hybrides photovoltaïque thermique :

En peut classer les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques selon la nature du fluide utile ; les capteurs hybride à air et les capteurs hybride à fluide caloporteur liquide.

Figure I.11 : Classification des capteurs hybrides PV /T

Les capteurs solaires hybrides PVT à air :

Ici, ils sont pris en compte les capteurs solaires PVT à air et les capteurs solaires PV intégré au bâti dans une configuration de type double peau avec récupération de chaleur dans la lame d'air en sous-face. Compte tenu de faible demande en chauffage solaire sur le marché, peu d'étude ont été menées sur les capteurs solaires PVT intégrés. Plusieurs configurations ont été fait de ce type de capteur PVT à aire [] en peut montrer sur la figure suivante :

**Figure I.12** : Capteur solaire hybride PVT à air.

❖ Les capteurs solaires hybrides PVT avec un liquide :

Afin d'améliorer la performance du système photovoltaïque, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PVT. L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du module photovoltaïque par

circulation de l'eau pour extraire la chaleur utilisant l'eau comme liquide réfrigérant. Ces collecteurs du liquide PV/T sont semblables à un collecteur conventionnel avec un liquide ; un absorbeur avec un tube serpentin ou des séries de canalisations verticales parallèles est appliqué, sur lesquelles le module PV a été stratifié ou collé comme joint époxyde adhésif .

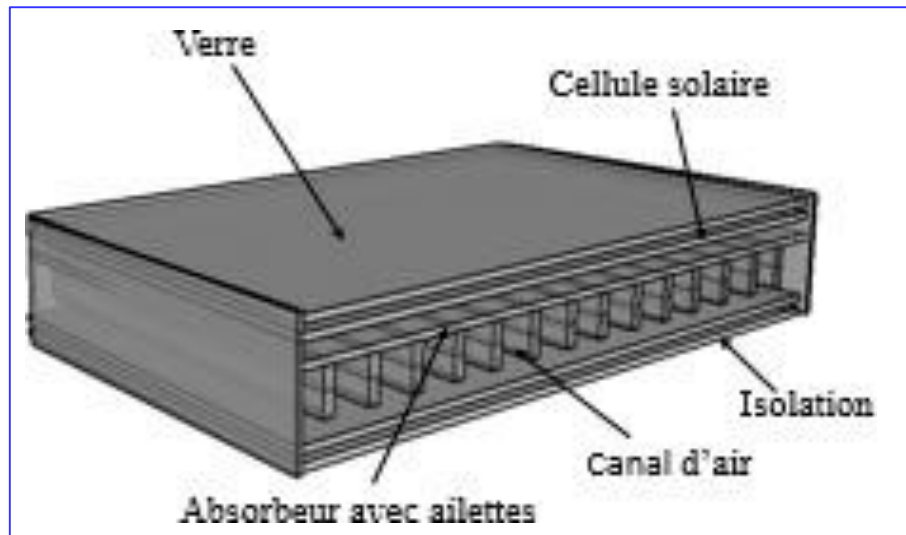


Figure I. 13 : Capteur solaire hybride à eau.

Bien que les collecteurs liquides se soient avérés techniquement faisables, les possibilités économiques sont pourtant incertaines comparé au système du chauffage PVT à air, pas beaucoup de développements sont vus dans la littérature sur des systèmes de liquide-chauffage dus à leurs limitations inhérentes comme : le coût additionnel de l'unité thermique pour la circulation de l'eau, et le problème de congélation inhérent du fluide de fonctionnement une fois utilisé dans des régions de basse température, etc.

❖ Les capteurs solaires hybrides PV/T à concentration :

Afin d'améliorer la performance du capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PV/T. L'augmentation de l'éclairement solaire influe positivement sur le rendement de la cellule photovoltaïque, L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du capteur, en ajoutent un système de

concentration sur les côtés du capteur, les réflecteurs sont de forme rectangulaire ou cylindro parabolique [10].

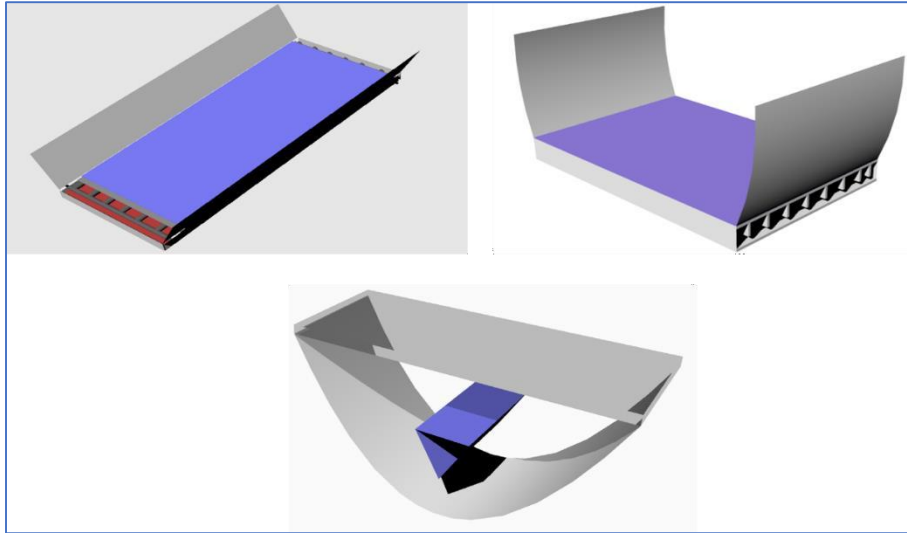


Figure I. 14 : Capteur solaire hybride PV/T à concentration.

I.3.Conclusion :

Un capteur solaire est l'élément essentiel pour de l'exploitation de l'énergie solaire. Le rendement d'un capteur solaire reste toujours a besoin d'une amélioration du son rendement, et en particulièrement le panneau photovoltaïque, pour cette raison, beaucoup de recherche reste encore à faire sur l'amélioration des performances des capteurs solaires. Dans ce chapitre nous avons fait une étude générale sur les capteurs solaire, ou nous avons présentés la classification de l'énergie solaire, les capteurs solaires thermique et leurs types, les capteurs photovoltaïque et leurs types, les capteurs hybride PV/T et leurs types.

Chapitre II



*Etude numérique et
Expérimentale*

Chapitre II

Etude expérimentale

II.1. Introduction

Un système solaire hybride photovoltaïque thermique (PV-T) est une technologie innovante qui combine deux modes de capture de l'énergie solaire : le photovoltaïque (PV) et le thermique (T). Ce type de système vise à maximiser l'utilisation de l'énergie solaire en produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur à partir d'un seul système.

II.2. Présentation de la nouvelle conception EPVT :

La figure suivante présente notre nouvelle conception d'un système hybride photovoltaïque thermique EPVT étudié, il se compose de six parties essentielles : le module photovoltaïque mono cristalline ; un échangeur thermique en cuivre ; un sous vide ; un cylindro-parabolique ; une cheminé et une miroir de réflexion , le principe de fonctionnement de notre système est comme suit : Après l'entrée de l'eau destinée à refroidir le module, celle-ci est préchauffée par un système solaire thermique ; ensuite, l'eau circule dans un tube sous vide placé au foyer d'un cylindre parabolique.



Figure II.1 : Image d'un système évaporateur solaire EPVT

Le diagramme suivant présente les éléments essentiels de la nouvelle conception d'un système hybride photovoltaïque thermique proposé dans cette étude

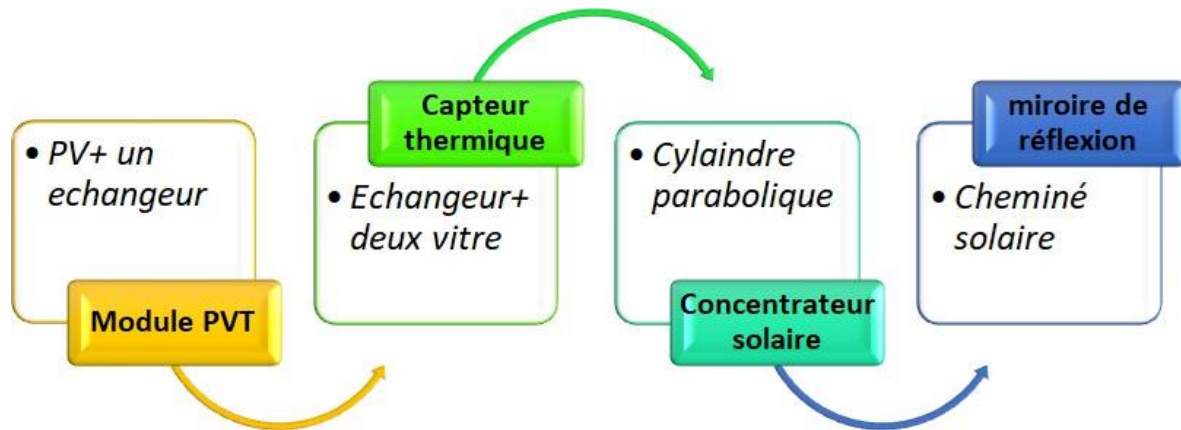


Figure II.2 : Diagramme des différents composants du système PVT

✓ Le module (pv) mono cristalline

Définition :

Un module photovoltaïque monocristallin est un ensemble de cellules solaires monocristallines assemblées en un panneau. Chaque cellule est fabriquée à partir d'un unique cristal de silicium pur, ce qui confère au module une haute efficacité énergétique et une apparence uniforme et noire.



Figure II.3 : Module photovoltaïque (PV)

Ce module photovoltaïque convertit la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules solaires en silicium. Cependant, une grande partie de l'énergie solaire incidente est convertie en chaleur, ce qui entraîne une surchauffe du panneau et une diminution de son efficacité. Les systèmes PV-T cherchent à remédier à ce problème en intégrant un collecteur thermique à l'arrière du panneau photovoltaïque.

www.sollatek.com

Monocrystalline Cell Solar

✓ *Echangeur solair*

Un capteur solaire thermique est un composant d'une installation solaire thermique chargé de capter le rayonnement solaire et de le transformer en énergie thermique. Ce type de panneau solaire est également appelé capteur solaire thermique ou panneau solaire thermique.



Figure II.4 : Image de l'échangeur thermique en cuivre

Les capteurs solaires plans captent le rayonnement solaire reçu sur une surface pour chauffer un fluide. L'effet de serre est souvent utilisé pour réduire les pertes de chaleur.

L'âme de ce type de capteur solaire plat est un ensemble de tubes métalliques orientés verticalement qui conduisent l'eau froide en parallèle. Ces tubes sont reliés en bas par un tube horizontal à l'arrivée d'eau froide et un autre tube similaire à la sortie en haut.

✓ **Capteur sous vide**✓ **Déffinition dun cupteur sous vide**

Un capteur sous vide est un dispositif utilisé pour capter et convertir l'énergie solaire en chaleur. Il se compose de tubes en verre hermétiquement scellés et évacués d'air pour créer un vide. À l'intérieur des tubes, un absorbeur capte le rayonnement solaire, et le vide réduit les pertes thermiques par convection. Ce type de capteur est très efficace pour maximiser l'absorption de la chaleur et minimiser les pertes d'énergie.

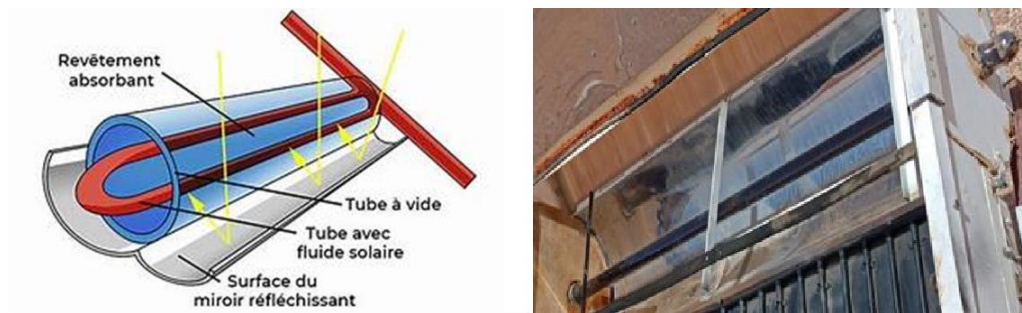


Figure II.5 : Capteurs à tubes sous vide

Le concentrateur cylindro-parabolique utilise un réflecteur cylindrique en forme de parabole qui concentre la lumière sur un tube récepteur situé sur le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures peuvent atteindre aisément les 500 °C et peuvent produire de la vapeur.



Figure II.6 : Concentrateur solaire Le cylindro-parabolique

✓ Miroir de réflexion

En 2011, Tanaka [37] a fait une étude théorique sur l'irradiation solaire journalière absorbée par la surface d'un collecteur solaire thermique augmenté par un réflecteur plat attaché en haut.

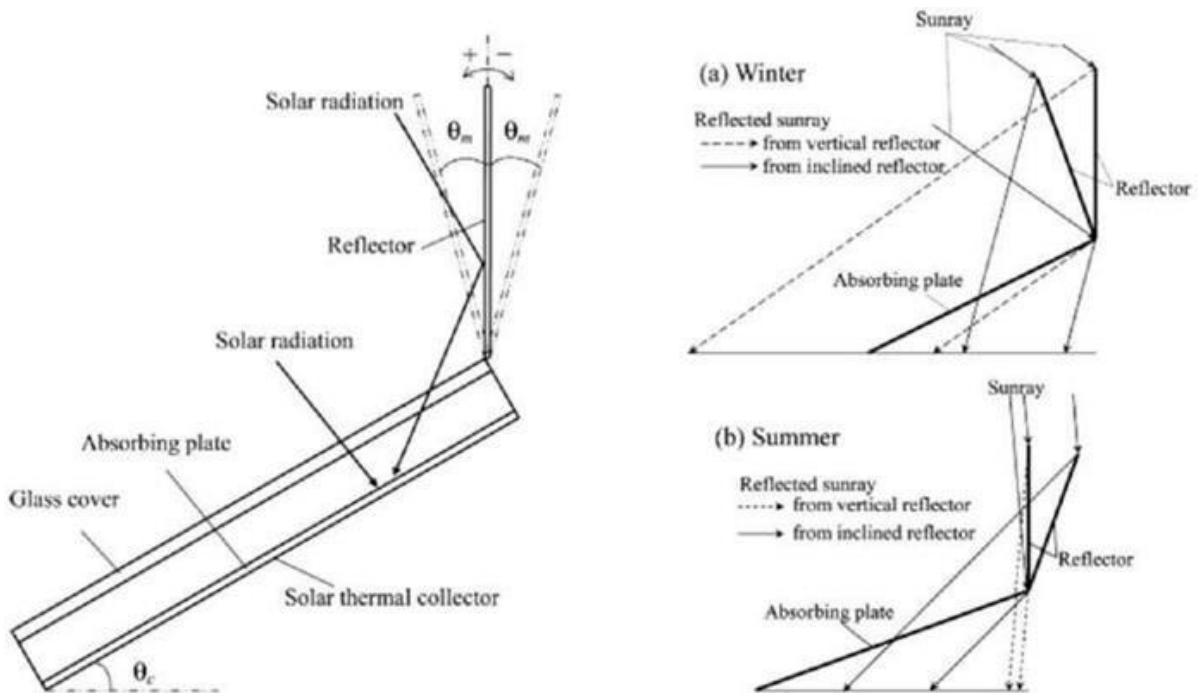


Figure II.7 : Schéma géométrique du collecteur thermique-miroir en haut

Il a trouvé que la quantité moyenne quotidienne d'irradiation solaire reçue sur la surface réceptrice du collecteur solaire thermique plan été améliorée de 19, 26 et 33% lorsque le rapport entre la longueur du collecteur et celui du réflecteur égal à 0.5, 1.0 et 2.0, respectivement.

Naik et al. [38] ont analysé l'énergie et l'exénergie d'un PV/T associé à un miroir en haut de sa structure, utilisé pour le chauffage d'eau dans la région du Calicut (Inde) (voir la figure (II.7)).

Ils ont déduit que l'angle d'inclinaison optimal du réflecteur doit être dans la plage de 85-100° en Hiver (à partir du plan horizontal) pour qu'il y aura une amélioration dans la puissance de sortie du système.

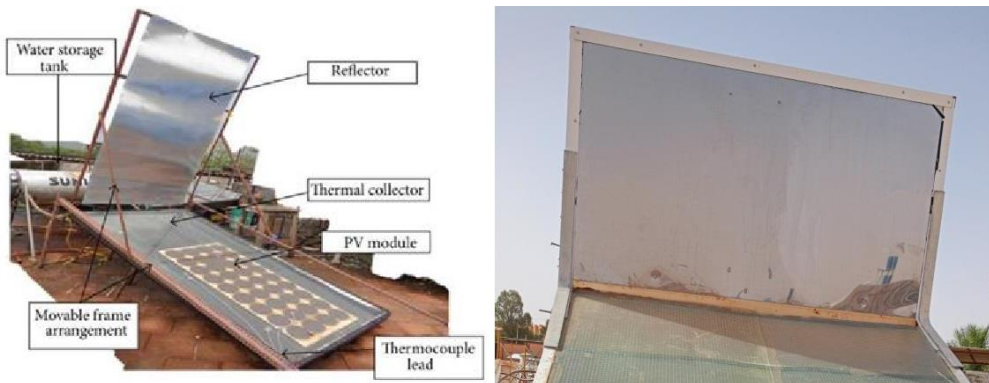


Figure II.8 : Image d'un miroir de réflexion

En 2000, Hussein et al[39]. Ont optimisé les paramètres opérationnels et du désigne d'un collecteur solaire plan augmenté par un réflecteur plat incliné, en utilisant un programme développé sous FORTRAN. Ils ont trouvé que pour un changement d'angle d'inclinaison du réflecteur une fois par jour, une fois par mois, une fois par saison, deux fois et une fois par an, l'augmentation de l'énergie solaire absorbée était de 16.9, 16.3, 14.4, 13.3 et 6.6%, respectivement.

✓ *Le principe de la cheminée*

Les cheminées solaires sont des centrales électriques qui utilisent la force d'un courant d'air ascendant. L'air est chauffé par effet de serre dans un collecteur exposé au soleil. Sa masse volumique baisse et l'air est accélère et amène vers le milieu du collecteur, ou il monte dans la cheminée en passant par des turbines. Celles-ci transforment l'énergie de l'écoulement en énergie mécanique et actionnent des générateurs pour produire de l'électricité

Dans notre system le role de cheminée :

- 1 : Accélération de la vitesse de l air
- 2 : Séchage des produits alimentaire

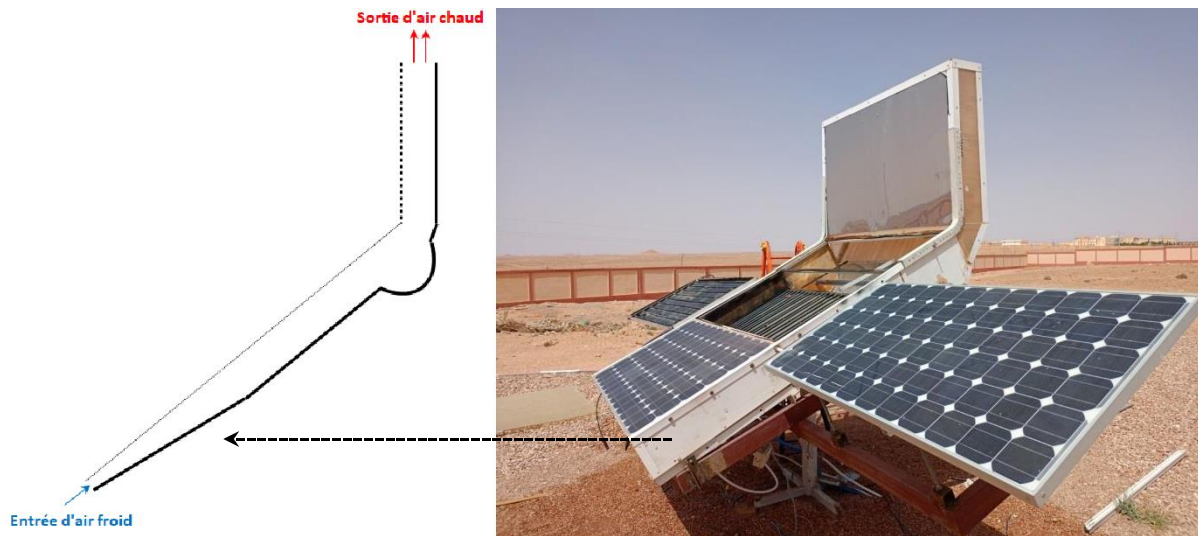


Figure II.9 : La conception 2D de la cheminé d'air

II.3. Les apraeil des mesures

✓ *Un pyranometre :*

Dans la figure suivante une imague reele d'un pyranomètre utilisé dans cet etude, c'est un instrument scientifique utilisé pour mesurer le rayonnement solaire global reçu à la surface de la Terre. Le pyranomètre capte la lumière solaire directe, diffuse et réfléchié, permettant ainsi d'évaluer l'énergie totale disponible provenant du soleil.



Figure II.10 : Pyranometre

✓ Carte d'acquisition à distance**❖ Définition**

Une carte de mesure à distance, souvent appelée télécarte, est un dispositif utilisé pour capturer et enregistrer des données de mesure sans nécessiter de connexion filaire directe. Elle peut collecter diverses informations telles que la température, l'humidité, la pression, ou d'autres paramètres environnementaux, puis transmettre ces données via des moyens sans fil comme le Wi-Fi, le Bluetooth, ou des réseaux cellulaires. Ces cartes sont couramment utilisées dans des domaines comme l'agriculture, la météorologie, ou les systèmes de gestion de bâtiments pour permettre une surveillance et une analyse en temps réel.

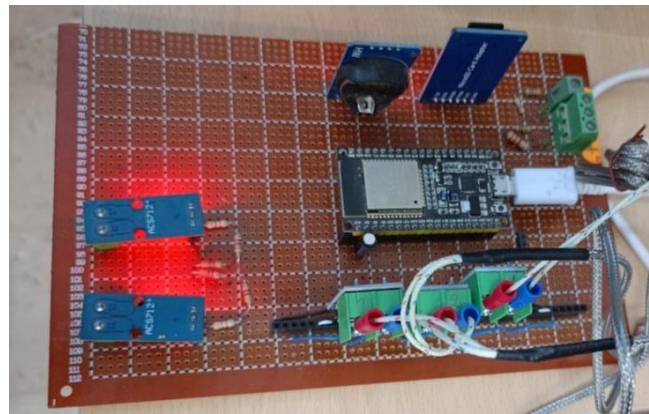


Figure II.11 : Image de la télécarte utilisée

✓ Thermocouple :

Un thermocouple de type K est un type courant de thermocouple utilisé pour mesurer les températures dans une large gamme d'applications industrielles et scientifiques. Il est constitué de deux fils métalliques de différentes compositions, habituellement en alliage de nickel-chrome (chromel) et en alliage de nickel-aluminium (alumel).

Ces fils sont soudés ensemble à une extrémité pour former la jonction chaude, tandis que l'autre extrémité est utilisée pour mesurer la différence de tension générée par la différence de température entre la jonction chaude et une référence, généralement à température ambiante.

Le thermocouple de type K est populaire en raison de ses caractéristiques, notamment sa large gamme de température de fonctionnement, allant généralement de -200 °C à environ 1 300 °C, sa linéarité et sa fiabilité dans des conditions extrêmes. Il est utilisé dans de nombreuses applications telles que la surveillance et le contrôle des processus industriels, la métallurgie, la recherche scientifique et le contrôle de la température des fours industriels, des moteurs et d'autres équipements.



Figure II.12 : Image d'un thermocouple type K

✓ Application HTML Node-red

Node-RED est un outil de programmation visuelle open-source qui permet de connecter des appareils matériels, des API et des services en ligne d'une manière simple et intuitive. L'application HTML dans Node-RED est une des nombreuses fonctionnalités offertes par cet outil.

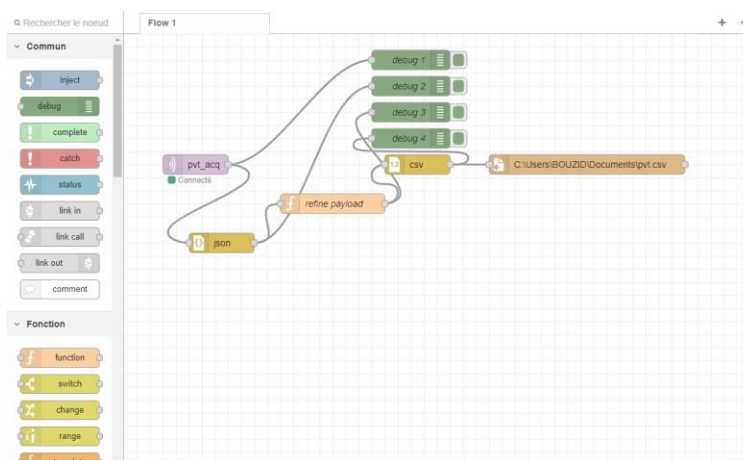


Figure II.13 : Image de l'application HTML Node-red

L'application HTML Node-RED permet aux utilisateurs de créer des interfaces utilisateur Web en utilisant du code HTML, CSS et JavaScript directement dans le flux de travail Node-RED. Cela permet de créer des tableaux de bord personnalisés, des interfaces de contrôle, des visualisations de données et bien plus encore.

✓ Le processus de mesure

La figure suivante présente le processus de mesure des sorties d'un capteur solaire hybride PVT à eau et à air étudié, à l'aide d'une application HTML Node-RED implique plusieurs étapes.



Figure II.14 : Le processus de mesure

Tout d'abord, les thermocouples de type K positionnés sur le bonc d'essai mesurent la température de l'eau, de l'air à l'entrée et à la sortie ainsi que les temperature des autres elements come la surface de module PV, l'échangeur thermique (plaque absorbante).

Ces données sont ensuite transmises à un dispositif de collecte (la télécarte) qu'elle capable de communiquer avec Node-RED programmé sur un pc.

Dans Node-RED, des nœuds spécifiques sont utilisés pour recevoir et traiter les données provenant des capteurs.

Ensuite, des nœuds HTML sont utilisés pour créer une interface utilisateur Web personnalisée permettant de visualiser en temps réel les données collectées.

Cette interface inclure des graphiques pour afficher les variations de température,

Les utilisateurs peuvent interagir avec cette interface pour surveiller les performances du capteur et ajuster les paramètres si nécessaires.

II.4. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre une étude expérimentale détaillée d'un capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T avec une nouvelle configuration, les différents composants du capteur, et les étapes de réalisation sont présentés dans ce chapitre.

La réalisation sont effectués au sein de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa a été mis sur banc d'essai pour une série de mesures thermiques.

Partie III

Résultats et discussions

Chapitre

Résultats et discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons et analysons les résultats expérimentaux obtenus lors des deux journées typiques, les 6 et 7 juin 2024. Ces journées ont été choisies en raison de leur représentativité de la condition standard de notre étude, offrant ainsi un cadre idéal pour observer et interpréter les phénomènes investigués. Les données recueillies au cours de ces deux jours ont été soigneusement enregistrées et traitées pour produire des courbes expérimentales pertinentes.

Nous commencerons par une présentation détaillée des résultats pour chacune des journées (Les conditions météorologiques du site (URAER – Ghardaïa) & le comportement énergétique des systèmes étudiés, talque leur température, énergie produits ...etc.). Pour chaque jour, nous exposerons les différentes courbes obtenues, en précisant les conditions expérimentales et les paramètres mesurés avec une analyse approfondie et interprétation physique.

III.2 . Les conditions météorologiques du site (URAER – Ghardaïa)

III.2.1. . *Le rayonnement solaire G les deux jours sélectionnés*

La figure III.1 montre l'évolution, en fonction du temps du rayonnement solaire globale pendant les jours 7, 8 du mois de Juin 2024, les données obtenues à partir de la station de mesure météorologie placée dans un bâtiment de l'unité de recherche (URAER). En remarque que les valeurs du rayonnement global dans les deux jours prendre presque les mêmes allures, les valeurs varies de 16.668 w /m² à 966.744 w /m², un moyen de 587.547 w/m², selon la figure, ces valeurs atteignent à 13h00 (les

valeurs maximales sont situées entre 11h00 et 15h00). Ces valeurs montrent que le ciel été clair dans les jours d'essais.

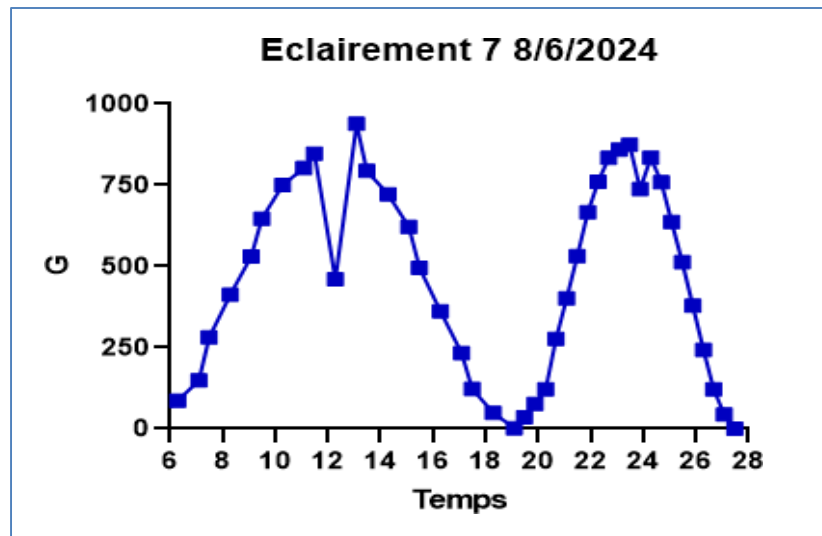


Figure III.1 : Variation de l'éclairement solaire durant les jours 7-8 Juin 2024

III.2.2. La température ambiante les deux jours sélectionnés

La figure III.3 montre l'évolution, en fonction du temps de la température ambiante pendant les jours 14, 19 du mois de mai 2019, les données obtenues à partir de la station de mesure météorologie placé dans un bâtiment de l'unité de recherche (URAER). En remarque que la température ambiante varie de 20 °C à 25°C durant le jour 14 mai et de 20°C à 29 durant le jour 19 mai,

D'après la figure, les valeurs atteignent son maximum à 14h00 pour le jour du 14 mai et à 15 pour le jour du 19 mai (les valeurs maximales sont situées entre 11h00 et 15h00. Ces valeurs montrent également que le ciel été clair dans les jours d'essais

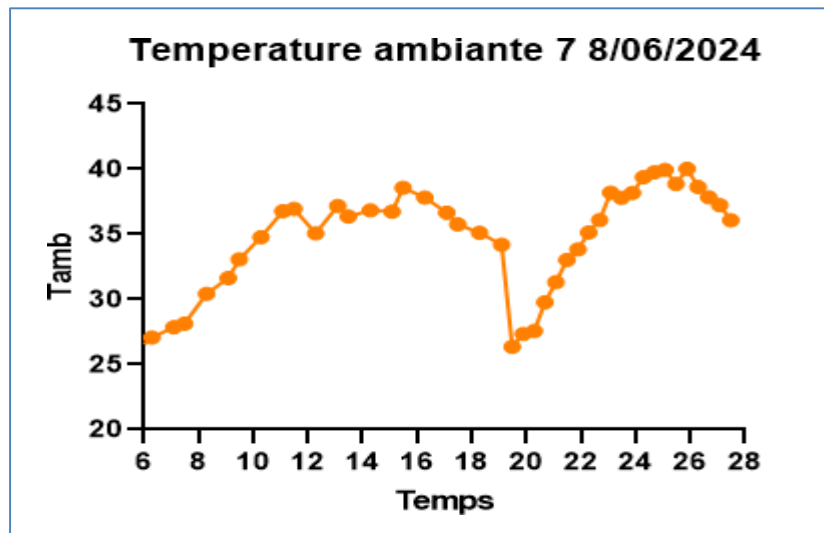


Figure III.2 : Variation de la température ambiante durant les jours 7-8 Juin 2024

III.3 . Comportement électrique des systèmes

III.3.1. La variation des Températures journalières des systèmes

Les figures 3 et 4 montrent l'évolution quotidienne des températures des systèmes installés (le module témoin et la nouvelle conception du PVT) pendant les journées douces des 7 et 8 juin 2024.

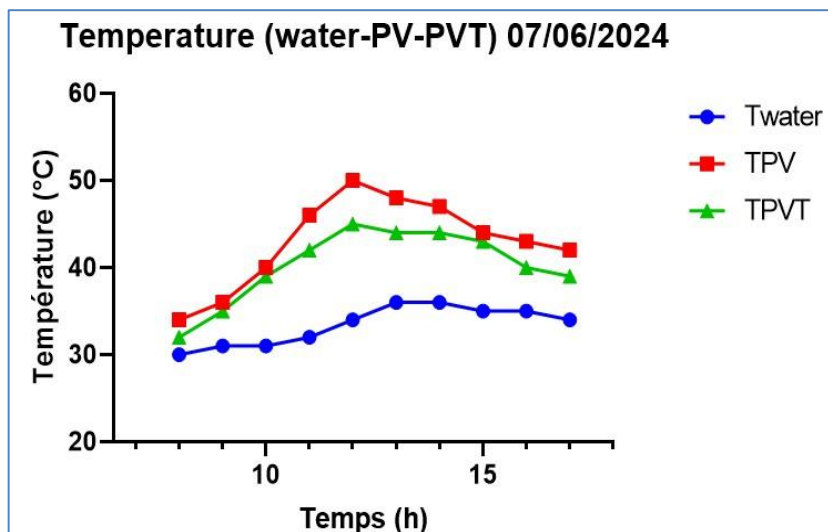


Figure III. 3 : Variation des températures des systèmes durant le jour 7 Juin 2024

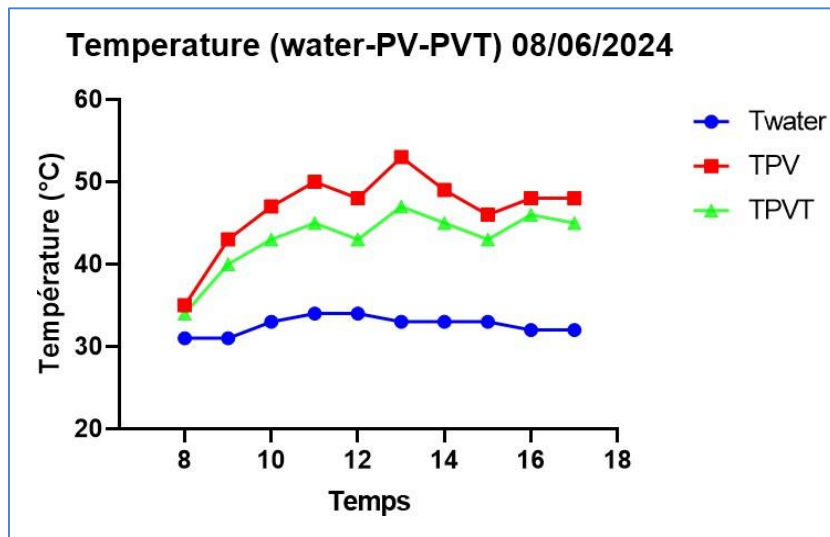


Figure III. 4 : Variation des températures des systèmes durant le jour 8 Juin 2024

On remarque que les températures des modules PV augmentent de 30°C à 8:00H jusqu'à 52°C à 12:00H puis elles sont démunies après-midi sous la forme gaussienne, en raison de l'augmentation de l'éclairement solaire tout au long de la journée. Cette tendance est normale et montre une corrélation directe entre le rayonnement solaire incident et la température du module.

III.3.2. La puissance électrique des systèmes

Les figures 5 et 6 présentent l'évolution de la puissance électrique d'un module PV (témoin) et du nouveau système hybride photovoltaïque thermique PVT pendant les jours 7 et 8/06/2024. La puissance commence à 35 watts à 8:00, atteint un maximum de 130 watts à midi grâce au rayonnement solaire maximale, puis diminue progressivement jusqu'à 30 watts à 18:00 en raison de la baisse de l'ensoleillement.

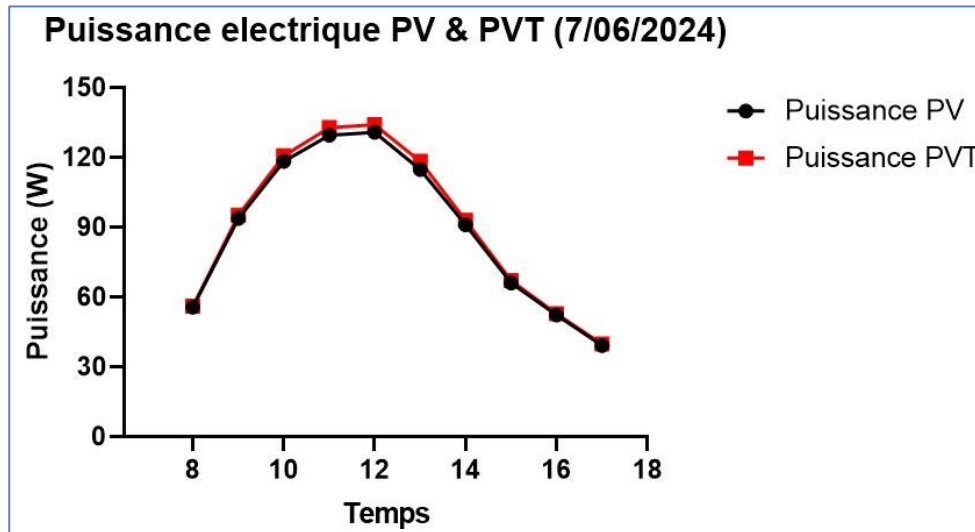


Figure III. 5 : Variation de la puissance électrique des systèmes durant le jour 7 Juin 2024

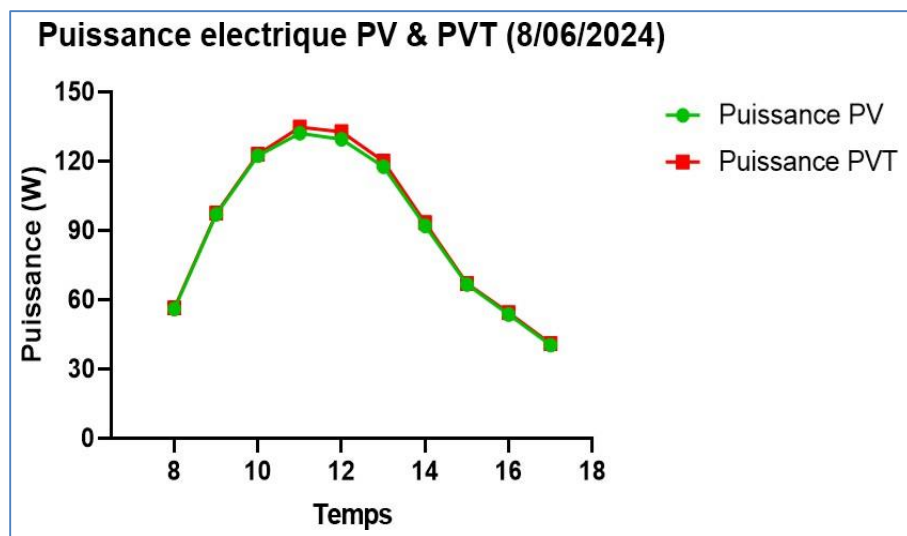


Figure III. 6 : Variation de la puissance électrique des systèmes durant le jour 8 Juin 2024

III.3.3. Le rendement électrique des systèmes

La figure III.7 montre l'évolution quotidienne du rendement électrique du capteur PVT et le module photovoltaïque, le rendement électrique quotidien est un indicateur important pour évaluer la performance électrique du capteur PVT et le module PV.

Selon la figure, le rendement électrique varie environ de 0.07 à 0.16 durant le jour,

La moyenne du rendement thermique quotidienne du capteur PVT installé est environ de 0.11.

En remarque une légèrement augmentation du rendement électrique du capteur PVT par rapport au module PV.

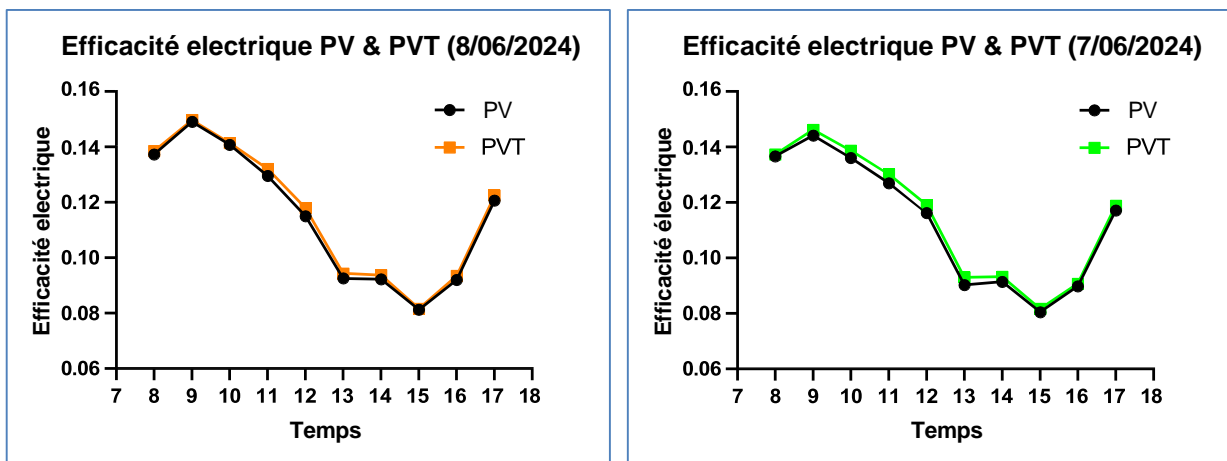


Figure III. 7 : Variation du rendement électrique des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024

III.4 Comportement thermique des systèmes (PVT – Capteur solaire)

III.4.1. La variation des Température journalière des systèmes

La figure 4 montrent l'évolution quotidienne des températures des fluides entrés et sorties dans les systèmes pendant les journées douces des 7 et 8 juin 2024.

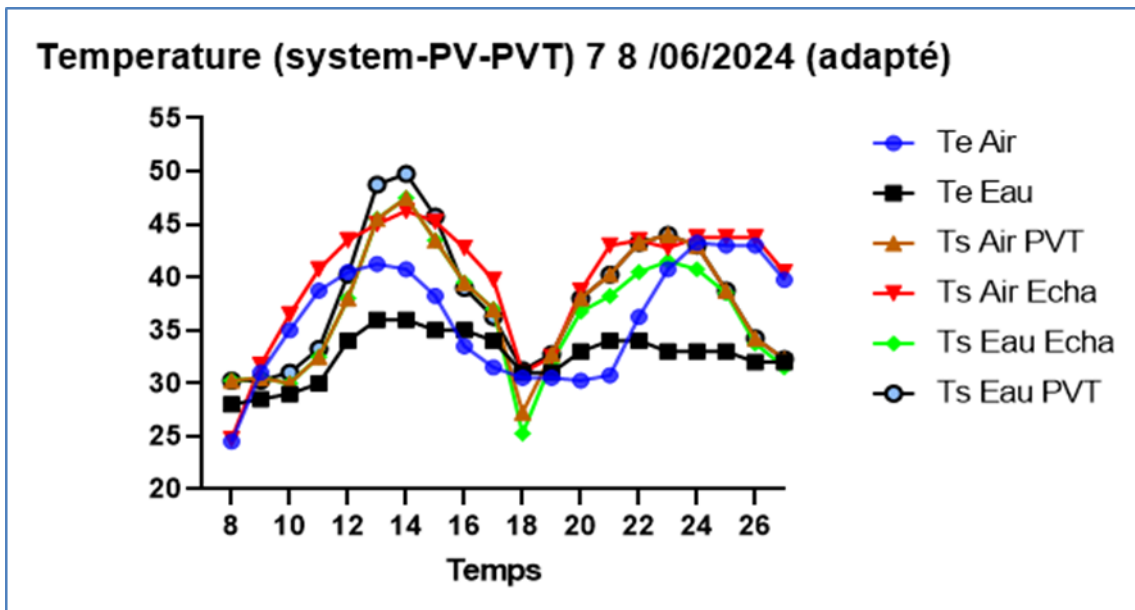


Figure III. 8 : Variation des températures des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024

III.4.2. La puissance thermique des systèmes

La figure 9 présentent l'évolution de la puissance thermique du nouveau système hybride photovoltaïque thermique PVT pendant les jours 7 et 8/06/2024. La puissance commence à 0 watts à 10:00, atteint un maximum de 450 watts à midi grâce au rayonnement solaire maximale, puis diminue progressivement en raison de la baisse du rayonnement solaire.

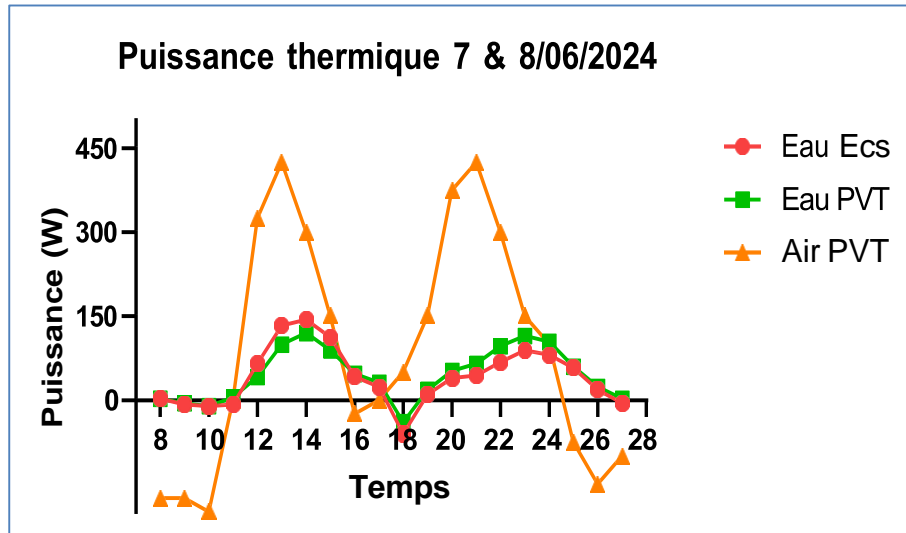


Figure III. 9 : Variation de la puissance thermique des systèmes durant les jours 7-8 Juin 2024

III.4.3. Le rendement thermique des systèmes

La figure III.10 montre l'évolution quotidienne du rendement thermique du capteur PVT à eau, le rendement thermique quotidien est un indicateur important pour évaluer la performance thermique du capteur PVT, il reflète la capacité de convertir l'énergie solaire en énergie chauffé stockée dans le réservoir, le rendement du capteur PVT défini comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance incidente, s'obtient donc avec l'expression suivante :

$$\eta = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_{fs} - T_{fe})}{I_g \cdot A}$$

\dot{m} : Le débit massique [kg/s].

c_p : Chaleur spécifique du fluide [J/kg K].

T_{fs}, T_{fe} : Température du fluide à la sortie et l'entrée du capteur [°C].

I_g : L'éclairement solaire global incident sur la surface du capteur [w/m²].

A : La surface du capteur [m²].

Selon la figure, le rendement thermique varie environ de 0.1 à 0.30 durant le jour,

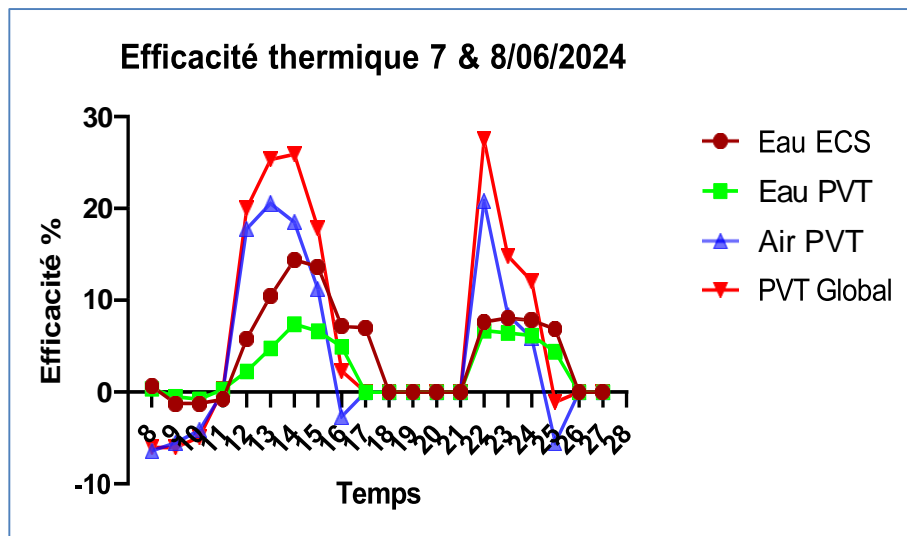
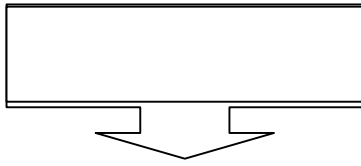


Figure III. 10 : Variation du rendement électrique des systèmes durant le les jours 7- 8 Juin 2024

III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous présentés les résultats aboutis partir des essais effectués sur le capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, les tests effectués sur le capteur PV/T pendant les jours de moi de Juin, le ciel été clair dans ces jours, nous avons mesuré l'éclairement solaire global, la température ambiante, la température du fluide à l'entrée à la sortie du capteur, les résultats aboutis sont présentés sous forme des courbes l'aide de logiciel Origine.



Conclusion Générale

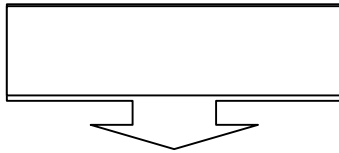
Conclusion général

Un capteur solaire est l'élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteurs appelés cellules solaires.

Le rendement des capteurs solaires thermique et photovoltaïque ou hybride (photovoltaïque thermique) reste encore faible, plusieurs facteurs influent sur la performance du capteur. Cela dépend de leur type d'exploitation, de l'amélioration du pourcentage de captation de rayonnement solaire.

Dans ce travail, nous avons fait une conception et réalisation d'une nouvelle configuration du capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, l'objectif de ce travail est l'amélioration des performances des capteurs solaires PV/T par apport au capteur PV/T classique.

La réalisation du capteur a été faite au niveau de l'unité de recherche appliquée en énergies renouvelables à Ghardaïa en raison des conditions climatiques appropriées et de la disponibilité des ressources matérielles comme des instruments de mesure, des atelier de travail...etc. .



Bibliographie

Références bibliographiques

- [1] Jaques Bernard, Énergie solaire calculs et optimisation, 2008.
- [2] Ismail Tabet, Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire, thèse de doctorat Université des frères Mentouri Constantine, 2016
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire-exploitation>
- [4] <http://www.solaire-services.com/panneau-solaire-hybride-le-mixte-photovoltaïque-thermique>
- [5] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, technique et documentation, Paris, 1981
- [6] <https://www.edf.fr/groupe-edf/espaces-dedies/l-energie-de-a-a-z/tout-sur-energie/produire-de-l-electricite/qu-est-ce-que-l-energie-solaire>
- [7] https://fr.wikipedia.org/wiki/Capteur_solaire_photovoltaïque
- [8] Adouane Mabrouk, Etude de la fiabilité des systèmes solaires hybrides dans le Sahara, thèse de doctorat, Ecole Nationale Polytechnique (ENP), décembre 2014
- [9] K. Touafek, contribution à l'étude et à la conception d'un système énergétique utilisant des capteurs hybrides photovoltaïque thermique, thèse doctorat en électronique, école nationale Polytechnique, 2010.
- [10] I. Tabet, K. Touafek, N. Bellel, A. Khalifa, M.T. Baïssi, étude expérimentale d'un capteur hybride PV/T à eau avec réflecteurs latérales, 4ème séminaire international sur les énergies nouvelles et renouvelables, Ghardaïa Algérie 13, 14 octobre 2016.
- [11] Sourav Diwania¹ · Sanjay Agrawal² · Anwar S. Siddiqui¹ · Sonveer Singh, Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement, International Journal of Energy and Environmental Engineering (2020) 11:33–54.
- [12] Tabet^{1,a}, K. Touafek, N. Bellel, and A. Khalifa, Thermal performances of vertical hybrid PV/T air collector, Eur. Phys. J. Plus, 131- 410, 2016.
- [13] Tabet, K. Touafek, N. Bellel, A. Khelifa, M.T. Baïssi, Etude expérimentale d'un capteur hybride PV/T à eau avec réflecteurs latérales, Le 4ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Ghardaïa Algérie 13, 14 Octobre 2016.

- [14] Assem Abdel Rahman, Electrical Evaluation of a Low Concentrating PVT Collector Based on Performance Ratio, Master Level Thesis European Solar Engineering School ,No.190, January 2015
- [15] https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_thermal_hybrid_solar_collector
- [16] Kalogirou, Soteris. ,Solar energy engineering : processes and systems, Elsevier ,2009.
- [17] Hendrie SD, «Photovoltaic/thermal collector development program», final report.Report, MIT, 1982.
- [18] Schwartz R, Rao KHS, Tscharnner R, «Computer-aided analysis of thermal images of solar cells and solar PV/T collectors», In: Fifth EPSEC, Athens, 1983
- [19] Tscharnner R, Curthins H, Haring JP, Schwartz R, Shah AV, «Low-temperature liquid PV/T collector», In: Fifth EPSEC, Athens, 1983.
- [20] Lalovic B, Kiss Z, Weakliem H, «A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector», Sol Cells 1986; 19: 131–8.
- [21] Lalovic B, Pavlovic T, Kiss Z, van Dine J, «The application of hybrid a-Si:H PV and thermal collectors for different usages», In: Eighth EPSEC, 1988.
- [22] Van der Ree, BCG, «Haalbaarheid van gecombineerde toepassing van fotovoltaïsche en thermische zonneenergie», Report TNO 93-BBI-R1198, 1994.
- [23] Van der Ree, «Tests aan prototype onafgedekte PV/Thermische collector», Report TNO 95-BBI-R1666, 1996.
- [24] Rockendorf G, Sillmann R, Podlowski L, Litzemberger B, «PV-hybrid and thermo electric collectors», Sol Energy 1999; 67 :227–37
- [25] Bosanac M, Soerensen B, Katic I, Soerensen H, Nielsen B, Badran J, «Photovoltaic/thermal solar collectors and their potential in Denmark», Report EFP Project 1713/00-0014, 2003
- [26] Soerensen B, «Modelling of hybrid PV-thermal systems», In: 17th EPSEC, Munich,2001.

- [27] Kalogirou SA, «Use of TRNSYS for modelling and simulation of a hybrid PV-thermal solar system for Cyprus», *Renewable Energy* 2001; 23:247–60.
- [28] Hayakashi B, Muzusaki K, Satoh T, Hatanaka T. «Research and development of photovoltaic/thermal hybrid solar power generation system». In: ISES Solar World Congress, Kobe, 1989.
- [29] Fujisawa T, Tani T. «Binary utilization of solar energy with photovoltaic-thermal hybrid collector». In: ISES Solar World Congress, Korea, 1997.
- [30] Agarwal RK, Garg HP, «Study of a photovoltaic-thermal system-thermosiphonic solar water heater combined with solar cells», *Energy Convers Manage* 1994; 35(7):605–20
- [31] Tiwari A, Sodha MS, «Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model», *Sol Energy Mater Sol Cells* 2007; 91:17–28
- [32] Touafek K, Malek A, Haddadi M, « Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique », *Revue des Energies Renouvelables* 2006 ; 9 (3) : 143-154
- [33] Touafek K, Malek A, Haddadi M, Bendaikha-Touafek W, « Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride photovoltaïque Thermique », *Revue des Energies Renouvelables* 2008 ; 11(1) : 153-16.
- [34] Raghuraman P, «Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance», *J Sol Energy Eng* 1981; 103:291–8.
- [35] Smith DR, Biringer KL, Pritchard DA, «Combined photovoltaic thermal collector testing», In: 13th IEEE, Washington, 1978.
- [36] Komp R, Reeser T, «Design, construction & operation of a PV/Hot air hybrid energy system», In: ISES Solar World Congress, Hamburg, 1987
- [37] H. Tanaka, "Solar thermal collector augmented by flat plate booster reflector: Optimum inclination of collector and reflector," *Appl. Energy*, vol. 88, no. 4, pp. 1395–1404, 2011.
- [38] P. S. Naik and A. Palatel, "Energy and Exergy Analysis of a Plane Reflector Integrated Photovoltaic-Thermal Water Heating System," *ISRN Renew. Energy*, vol. 2014, pp. 1–

[39] H. M. S. Hussein, G. E. Ahmad, and M. A. Mohamad, "Optimization of operational and design parameters of plane reflector-tilted flat plate solar collector systems," *Energy*, vol. 25, no. 6, pp. 529–542, 2000.

[40] Rachedi Mohamed Yacine Thèse Doctorat_compressed Contribution à l'Amélioration de production d'un collecteur solaire dans la région de sidi khoiled ourgla Thèse soutenue publiquement le : 14 :11 :2004

DÉDICACE

AVANT TOUT JE REMERCIE DIEU LE TOUT PUISSANT DE
M'AVOIR DONNÉE LE COURAGE ET LA PATIENCE POUR
RÉALISER CE TRAVAIL

MALGRÉ TOUT LES DIFFICULTÉS RENCONTRÉES .

JE DÉDIE CE MODESTE TRAVAIL À :

MES CHERS PARENTS , TOUT MON RESPECT ET
AFFECTION EN

TÉMOIGNAGE DE LEUR SOUTIEN SACRIFIÉ ET PATIENCE .
"JE SALUE ÉGALEMENT TOUS LES PROFESSEURS TOUT AU
LONG DE MON PARCOURS ACADÉMIQUE, CHACUN PAR SON
NOM, AINSI QUE MES AMIS PROCHES HAMZA, NASSIM,
ZAKARIA ET RAMI. JE SALUE AUSSI MES CAMARADES DE
CLASSE ET MES CHERS FRÈRES, DJABER ET NOUR-EDDINE
ET IKRAM. MERCI POUR VOTRE SOUTIEN." J'ADRESSE MES
SALUTATIONS AU PROFESSEUR KHALIFA ABDELKARIM
ET AU DOCTEUR THABET ISMAIL. ENFIN, JE VOUS
REMERCCIE TOUS LES DEUX POUR VOS EFFORTS ET VOTRE
TEMPS."