

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAIA

-ADRAR-



جامعة أحمد دراية- أدرار

Année / 2022

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en

Physique

Option : Physique Energétique et Energies Renouvelables

Thème

**Etude et Réalisation d'un capteur solaire hybride
photovoltaïque thermique destinée à usage
domestique**

Présenté Par :

Mlle. Nadjat Kouki

Devant le jury composé de :

Mr. KHALLADI Mohammed Fadel

Président

MCA

Université Ahmed Draia-Adrar

Mme. BENABDELKRIM Bouchra

Examineur

MCB

Université Ahmed Draia -Adrar

Mr. Zine SAADI

Promoteur

MRB

URER-MS -Adrar

Année Universitaire 2021/2022



شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة):
سعدى الزين
المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ : Étude et réalisation d'un système solaire hybride :
photovoltaïque thermique (PV/T) destiné pour usage domestique.

من إنجاز الطالب(ة):
كومي نجاة
كلية العلوم والتكنولوجيا
القسم :
قسم علوم المادة
التخصص:
فيزياء طاقة قوية وطاقات متجددة

تاريخ تقييم / مناقشة: 09 جوان 2022
أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.
وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في : 19/06/2022

مساعد رئيس القسم:
و
مساعد رئيس قسم علوم المادة مكلف بها بعد
التدرج والبحث العلمي بكلية العلوم والتكنولوجيا



Remerciement

Tout d'abord, merci pour le grand DIEU qui m'a donné la volonté et la patience de mener à terme ce travail.

Je remercié, les plus respectueux et anticipes vont à mon encadreur MR Dr SAADI.ZINE s'est toujours montré à l'écoute tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour son aide et le temps qu'il a bien voulu me consacrer et pour ses conseils judicieux qui m'a dirigé et qui a été à la hauteur de sa noble tâche

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Merci à mes professeurs et enseignants d'avoir été là, de nous avoir énormément appris par la qualité des enseignements qu'ils nous ont prodigués.

Enfin, Je souhaite aussi adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire et tout ce qui m'a contribué de près ou de loin.

« Merci à tous et à toutes »

Dédicace

J'é dédie ce modeste travail

*À mes très chers parents que les mots ne suffisent pour les
décrire, ils m'ont toujours guidé, toute ma gratitude pour eux.*

À mes frères et mes sœurs.

*À mon promoteur, toute ma gratitude pour lui. À tous
mes amis sans exception.*

À toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à ce travail.

N. Kouki

Résumé

Les capteurs thermiques photovoltaïques hybrides (PV/T) convertissent l'énergie solaire en énergie électrique et thermique. Cette conversion permet d'une part le refroidissement des cellules solaires et d'autre part l'exploitation de l'énergie thermique résultante pour chauffer l'eau ou l'espace. Un panneau solaire hybride utilise la chaleur dégagée par les cellules photovoltaïques pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou air), ce qui améliore le rendement des cellules PV tout en valorisant de la chaleur solaire utile pour l'eau chaude sanitaire ou le chauffage. L'air chaud extrait du collecteur PVT peut être utilisé comme source de chaleur pour le bâtiment. Dans cette étude, un capteur PVT à base d'air avec un module PV monocristallin a été conçu et ses performances électriques et thermiques ont été analysées avec les résultats expérimentaux. Les résultats ont indiqué que les rendements thermique et électrique du collecteur PVT étaient, en moyenne, de 86 % et d'environ 09 %, respectivement et une amélioration des performances thermiques de 22 %.

Mot clé : Capteur solaire hybride PVT, Chicanes, absorbeur, refroidissement, performance, rendement, module photovoltaïque

Abstract

Hybrid photovoltaic (PV / T) thermal collectors convert solar energy into electrical and thermal energy. This conversion allows on the one hand the cooling of the solar cells and on the other hand the exploitation of the resulting thermal energy to heat the water or space. A hybrid solar panel uses the heat given off by photovoltaic cells to heat a transfer fluid (liquid or air), which improves the efficiency of the PV cells while developing useful solar heat for domestic hot water or heating. The warm air extracted from the PVT collector can be utilized as a heat source for the building. In this study, an air-based PVT collector with a mono-crystalline PV module was designed, and its electrical and thermal performance was analyzed with the experimental results. The results indicated that the thermal and electrical efficiencies of the PVT collector were, on average, 86% and about 9%, respectively, and thermal efficiency improved by 22%.

Keywords: Hybrid solar PVT collector, baffles, absorber, cooling, performance, efficiency, photovoltaic module.

ملخص

تعمل المجمعات الحرارية الكهروضوئية الهجينة (PV / T) على تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية وحرارية. يسمح هذا التحويل من ناحية بتبريد الخلايا الشمسية ومن ناحية أخرى استغلال الطاقة الحرارية الناتجة لتسخين الماء أو الفضاء. تستخدم الألواح الشمسية الهجينة الحرارة المنبعثة من الخلايا الكهروضوئية لتسخين سائل نقل الحرارة (سائل أو هواء)، مما يحسن من كفاءة الخلايا الكهروضوئية مع تطوير حرارة شمسية مفيدة للمياه الساخنة أو التدفئة. يمكن استخدام الهواء الدافئ المستخرج من مجمع PVT كمصدر حرارة للمبنى. في هذه الدراسة، تم تصميم جامع PVT قائم على الهواء مع وحدة PVT أحادية البلورية، وتم تحليل أدائه الكهربائي والحراري بالنتائج التجريبية. أشارت النتائج إلى أن الكفاءات الحرارية والكهربائية لمجمع PVT كانت في المتوسط 86 % وحوالي 15 % على التوالي. مع تحسن في المرودية الحرارية بـ 22 %.

الكلمات الاستدلالية: اللاقط الشمسي الهجين PVT، الحواجز، الممتص، التبريد، الكفاءة، المرودية، الوحدة الكهروضوئية.

Listes des figures

Figure I.1 :	Organigramme représentant les différents procédés de l'exploitation de l'énergie solaire.....	3
Figure I.2 :	Système Photovoltaïque.....	4
Figure I.3 :	Effet Photovoltaïque.....	5
Figure I.4 :	Technologie des cellules solaires : a) monocristallines, b) amorphes c) poly cristallines.....	7
Figure I.5 :	Cellule photovoltaïque organique.....	7
Figure I.6 :	Différent processus appliqué sur le silicium.....	8
Figure I.7 :	Schéma de principe d'un capteur solaire plan.....	9
Figure I.8 :	Schéma du collecteur eau PV/T.....	10
Figure I.9 :	Exemple d'un capteur plan à air	10
Figure I.10 :	Capteur solaire plan avec vitrage.....	11
Figure I.11 :	Capteur à tube sous vide.....	12
Figure I.12 :	Capteur à concentration.....	12
Figure I.13 :	Capteur solaire non vitré	13
Figure I.14 :	Capteur solaire plan vitré.....	13
Figure I.15 :	Classification du système PVT.....	15
Figure I.16 :	Système solaire hybride à air PV/T.....	17
Figure I.17 :	Classification des capteurs solaires PV/T basé sur le modèle d'écoulement d'eau	18
Figure I.18 :	Capteur solaire hybride d'eau PVT vitré et non vitré.....	18
Figure I.19 :	Système hybride d'eau PVT.....	19
Figure I.20 :	Schéma d'un capteur PV/T à air.....	20
Figure I.21 :	Différentes conceptions de flux d'air dans les capteurs solaires à air.....	21
Figure I.22 :	Module hybride PV/T à micro-canaux.....	22
Figure I.23 :	Emplacement de la salle d'essai dans le bâtiment solaire.....	24
Figure I.24 :	Configuration expérimentale du collecteur d'air hybride PV/T.....	24
Figure I.25 :	Variation de l'efficacité par rapport aux différents débits massiques.....	24
Figure I.26 :	Carte de l'irradiation solaire globale horizontale par ciel clair en Algérie.....	25
Figure I.27 :	Variation de la puissance utile en fonction du rayonnement global.....	26
Figure I.28 :	Variation du rendement instantané avec le rayonnement global.....	26

Figure I.29 :	Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V selon les conditions météorologiques.....	27
Figure I.30 :	Influence de la température sur la caractéristique I-V.....	27
Figure I.31 :	Evolution du rendement instantané en fonction de l'inclinaison du capteur.....	28
Figure II.1 :	Schéma descriptif du capteur PV-T plan vitré à air.....	30
Figure II.2 :	Photographie du capteur solaire hybride à absorbeur simple.....	31
Figure II.3 :	Module photovoltaïque.....	32
Figure II.4 :	Boîtier en bois.....	32
Figure II.5 :	Tôle rectangulaire galvanisé, peinture, Silicone.....	32
Figure II.6 :	Isolant (laine de verre).....	32
Figure II.7 :	Ventilateurs à courant continue.....	33
Figure II.8 :	Emplacement du : absorbeur, Laine de verre et panneau PV.....	33
Figure II.9 :	Photographie d'instrument de mesure de température (Thermocouples de type K et J).....	34
Figure II.10 :	Système d'acquisition de type Fluke 2625A Hydra.....	35
Figure II.11 :	Station météorologique de l'URER-Adrar.....	35
Figure II.12 :	Appareil de mesure du débit de fluide caloporteur.....	36
Figure II.13 :	Pyranomètre.....	37
Figure II.14 :	Variateur de vitesse de l'air de ventilateur.....	37
Figure III.1 :	Les modes de transfert de chaleur dans un capteur solaire.....	42
Figure III.2 :	Visualisation de l'écoulement de l'air dans un capteur solaire à air muni de chicanes transversales.....	47
Figure III.3 :	Photographie d'un capteur solaire à air.....	48
Figure III.4 :	Photographie des chicanes étudiées.....	48
Figure III.5 :	Schéma descriptifs de capteur solaire hybride a absorbeur modifié.....	49
Figure III.6 :	Photographie de l'absorbeur avec chicanes.....	50
Figure III.7 :	Photographie du dispositif expérimental du de capteur hybride PV/T modifié.....	51
Figure III.8 :	Variation de l'irradiation solaire pendant les jours de tests.....	53
Figure III.9 :	Variation de la température ambiante pendant les jours de tests.....	53
Figure III.10 :	Variation des températures du capteur solaire PVT.....	55
Figure III.11 :	Différence de température d'air entre l'entrée du capteur et la sortie.....	56
Figure III.12 :	La variation d'intensité solaire et de la quantité de chaleur utile.....	57
Figure III.13 :	Variation du rendement Thermique.....	58

Figure III.14 :	Variation de rendement électrique.....	59
Figure III.15 :	Variation de la puissance électrique.....	59
Figure III.16 :	Variation de la température du panneau PV	60
Figure III.17 :	Variation de différence de température du panneau PV	60
Figure III.18 :	Banc expérimental pour la caractérisation de PV	61
Figure III.19 :	Résultats des caractéristiques courant-tension I-V et puissance du PV UDTS-50 affiché par le traceur MP-160	62
Figure III.20 :	Zoom de caractéristiques courant-tension I-V et puissance	62

Listes des tableaux

Tableau	Titre	Page
II.1	Spécifications de conception du capteur solaire hybride PV-T.....	33
II.2	Erreur des instruments de mesure.....	36
II.3	Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de $0.02804 \text{ m}^3/\text{s}$	38
II.4	Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de $0,0082 \text{ m}^3/\text{s}$	39
II.5	Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$	40
II.6	Estimation des coûts des composants du capteur solaire PVT.....	40

Nomenclature

Symboles	
A	Surface d'échange (m^2)
F_r	Facteur d'évacuation de la chaleur du capteur
G	Intensité du rayonnement solaire [W/m^2]
$h_{(cond,i)}$	Coefficient d'échange par conduction.
h_{conv}	Coefficient d'échange par convection. ($W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$).
K	Coefficient de conductivité thermique ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)
Q_m	Débit massique
Q	Quantité de chaleur (W)
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m^2).
T	Température $^\circ C$
U_L	Coefficient de transfert de chaleur global
V	Vitesse d'air
Symboles Grecs	
φ	Densité de flux de chaleur émis par le corps.
ρ	Densité
η	Rendement %
ε	Émissivité thermique du matériau.
σ	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,670 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
r	Transmissivité du verre
a	Capacité d'absorption de l'absorbeur.
Indices	
p	Paroi
T	Total
f	Fluide
th	Thermique
$élec$	Electrique
$cond$	Conduction
$conv$	Convection
Abréviations	
PVT	Photovoltaïque/Thermique

Table des matières

Résumé.....	4
Abstract	4
ملخص	4
Listes des figures.....	5
Listes des tableaux	8
Nomenclature	9
Capacité d'absorption de l'absorbeur.....	9
Introduction générale.....	1

Chapitre I

Étude bibliographique sur capteurs solaires PV/T hybrides

I.1. Introduction.....	3
I.2. L'énergie solaire	3
I.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....	4
I.2.2. L'énergie solaire thermique.....	4
I.3. Les capteurs photovoltaïques.....	5
I.3.1. Panneau photovoltaïque	5
I.3.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.....	5
I.3.3. Types de cellules photovoltaïques.....	6
a. Cellules photovoltaïques inorganiques	6
b. Les cellules de silicium monocristallin.....	6
c. Les cellules en silicium poly cristallin.....	6
d. Silicium amorphe.....	6
e. Cellules à couches minces	6
f. Cellule photovoltaïque organique.....	7
I.3.4. Technologie des panneaux solaire photovoltaïque.....	7
I.3.5. Avantages et inconvénients de la conversion PV.....	8
a. Avantages.....	8
b. Inconvénients.....	8
I.4. Les capteurs solaires thermiques	9
I.4.1. Principe de fonctionnement.....	9
I.4.2. Les capteurs solaires thermiques à eau.....	9

I.4.3. Les capteurs solaires thermiques à air	10
I.4.4. Type des capteurs solaire thermique	11
I.4.4.1. Capteur plan.....	11
I.4.4.2. Le capteur à tube sous vide ou tubulaire.....	11
I.4.4.3. Les capteurs à concentration.....	12
I.4.4.4. Les capteurs non-vitrés	12
I.4.4.5. Les capteurs solaires plans vitrés.....	13
I.5. Les capteurs solaires hybrides PV/T.....	13
I.5.1. Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques	14
I.5.2. Synthèse bibliographique des capteurs solaires PV/T hybrides	16
I.5.3 Applications des capteurs solaires hybrides (PV/T).....	17
I.5.3.1 Capteur solaire hybride PV/T à base d'eau	17
I.5.3.2. Capteur solaire hybride à base d'air (PV/T).....	20
I.5.3.3 Application des systèmes photovoltaïque-thermique (BIPV/T) intégrés aux bâtiments	22
I.6. Le potentiel solaire en Algérie	25
I.7. Paramètres influant sur le rendement d'un capteur solaire hybride.....	25
I.7.1. Effet d'ensoleillement sur la puissance utile et sur le rendement d'un capteur hybride PVT 25	
I.7.2. Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique tension-courant	26
I.7.3. Effet de la température sur la caractéristique I-V	27
I.7.4. Influence de l'angle d'incidence.....	28
I.8. Conclusion	28

Chapitre 2

Étude et réalisation d'un capteur solaire hybride PV/T

II.1. Introduction	29
II.2. Objectif de l'étude	29
II.3 Description du capteur solaire hybride PVT absorbeur simple	29
II.4. Appareils et instruments de mesure	34
II.4.1. Mesure des températures.....	34
III.4.2. Acquisitions des données.....	34
III.4.3. Mesure du débit du fluide de travail	36
III.4.4. Mesure du rayonnement solaire.....	36
III.4.5. Variation de débit d'air	37
II.5. Test N°1 (23-01-2022).....	38
II.6. Test N°2 (30-01-2022).....	39

II.7. Test N°3 (31-01-2022)	40
II.8. Conclusion	41

Chapitre 3

Amélioration des performances du capteur solaire hybride PVT

III.1. Introduction	41
III.2. Rappels sur les transferts de chaleur	41
III.2.1. Transfert de chaleur par conduction	43
III.2.2. Transfert de chaleur par convection.....	44
III.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement	44
III.3. Approche théorique et évaluation des performances thermiques.....	45
III.4. Etude expérimentale	46
III.4.1. Description du capteur hybride PVT à air modifié.....	49
III.4.2. Les paramètres et les caractéristiques électriques du module photovoltaïque.....	51
III.5. Résultats et discussion.....	52
III.5.1 Analyse du comportement thermique du capteur solaire hybride PVT.....	53
III.5.2. Performances électriques	58
III.5.3. Caractérisation outdoor de modules UDTS-50.....	60
III.6. Conclusion.....	62
Conclusion générale	65
Perspectives	66
Annexe	68
Références bibliographiques	74

Introduction
Générale

Introduction générale

La transformation de matières organiques enfouies dans le sol pendant des millions d'années, appelé "Énergie fossile". Elle provient de réserves composées principalement de carbone. Les énergies fossiles sont ainsi des énergies non renouvelables. Une fois consommées, elles ne peuvent être régénérées qu'à l'échelle des temps géologiques.

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Ceux-ci sont utilisés par l'homme depuis l'Antiquité. Dans le passé, les roues hydrauliques, les moulins à vent, le bois de chauffage, la traction animale, les voiliers ont grandement contribué au développement de l'humanité. Elles constituent une activité économique à part entière, notamment en milieu rural, et elles sont aussi importantes et diversifiées que la production alimentaire [1].

Ces dernières années, il y a eu une augmentation significative du développement et de l'utilisation des sources d'énergie renouvelables. Cette exploitation permet une production d'énergie à la fois respectueuse de l'environnement et moins dépendante des ressources, à condition de tolérer des intermittences naturelles et souvent imprévisibles. Le potentiel de l'Algérie en termes de production d'énergie renouvelable est certainement très prometteur, tant en termes de taille et de localisation que de spécificités géographiques. L'énergie solaire apparaît comme l'une des ressources renouvelables les plus prometteuses, avec un taux de croissance mondial très élevé.

Les systèmes solaires thermiques et photovoltaïques sont deux technologies très différentes qui peuvent être utilisées pour l'usage direct d'énergie solaire par des capteurs. Cela a abouti au développement de systèmes hybrides, qui combinent des systèmes provenant de plusieurs sources d'énergie et sont utilisés pour augmenter la production d'énergie. Le capteur solaire hybride plan PV/T (photovoltaïque, thermique) est l'un des nombreux types de systèmes hybrides que nous allons aborder dans ce travail.

Dans les capteurs PVT, les cellules PV ne convertissent qu'une partie du rayonnement solaire reçu en électricité, tandis que l'énergie excédentaire restante est transformée en chaleur, qui est utilisée comme énergie thermique à basse température pour l'eau chaude sanitaire (ECS) et à d'autres applications.

Ce travail a été effectué au sein de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URMER) d'ADRAR, équipe de Froid Photovoltaïque, L'objet de travail de ce mémoire est la conception et la réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique à air pour des applications domestique. Le mémoire a été organisé de la manière suivante :

Le mémoire présenté est structuré en trois (03) chapitres, en plus d'une introduction et une conclusion générale dans laquelle on résume l'essentiel des résultats obtenus.

Le premier chapitre est dédié aux généralités et notions de base sur les capteurs solaire hybrides, et une étude bibliographique sur les systèmes hybrides photovoltaïque/Thermique (PVT) comme moyen de chauffage d'habitation, séchage des légumes, chauffage des serres agricoles...etc.

La recherche bibliographique est l'état de l'art sur l'utilisation de l'énergie solaire et une présentation des travaux théoriques et expérimentaux disponibles dans la littérature. Les principaux types de capteurs solaires, leur principe de fonctionnement ainsi que les techniques utilisées pour augmenter le rendement, sont présentés dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et la conception d'un capteur solaire hybride à air. Les différentes étapes de réalisation du capteur, le matériel utilisé ainsi que les tests préliminaires effectués pour évaluer les performances du de capteur solaire hybride PVT à air, sont présentés dans ce chapitre.

Le troisième chapitre présente une étude expérimentale du capteur solaire hybride à air modifié qui fait l'objet de notre travail. Ce capteur PVT représente une autre forme d'amélioration du premier capteur PVT élaboré dans le chapitre 2 par modification de l'absorbeur. Les principaux paramètres caractérisant le capteur solaire (températures et rendement thermique, rendement électrique, puissance), sont évalués.

Chapitre I :

Étude bibliographique sur capteurs solaires PV/T hybrides

I.1. Introduction

La combinaison des systèmes photovoltaïques et des systèmes solaires thermiques a pour but de produire à la fois de l'électricité et de la chaleur en même temps. Les systèmes PV/T permettent d'avoir des rendements élevés et donc une utilisation plus efficace de l'espace disponible. Cette combinaison ayant pour la préservation de l'environnement à travers la diminution du recours aux combustibles fossiles et la simplification des coûts de maintenance liée aux systèmes de productions d'énergies. Dans ce chapitre nous allons présenter des différents types des énergies renouvelables, et une généralité sur les systèmes hybrides PV/T.

I.2. L'énergie solaire

La plus grande source d'énergie disponible sur Terre est le soleil. Même s'il ne brille pas tous les jours, notamment chez nous, il est un acteur primordial dans la production d'énergie et son rôle devrait encore s'intensifier.

L'énergie solaire est l'énergie transmise par le Soleil sous la forme de lumière et de chaleur. Cette énergie est virtuellement inépuisable à l'échelle des temps humains, ce qui lui vaut d'être classée parmi les énergies renouvelables.

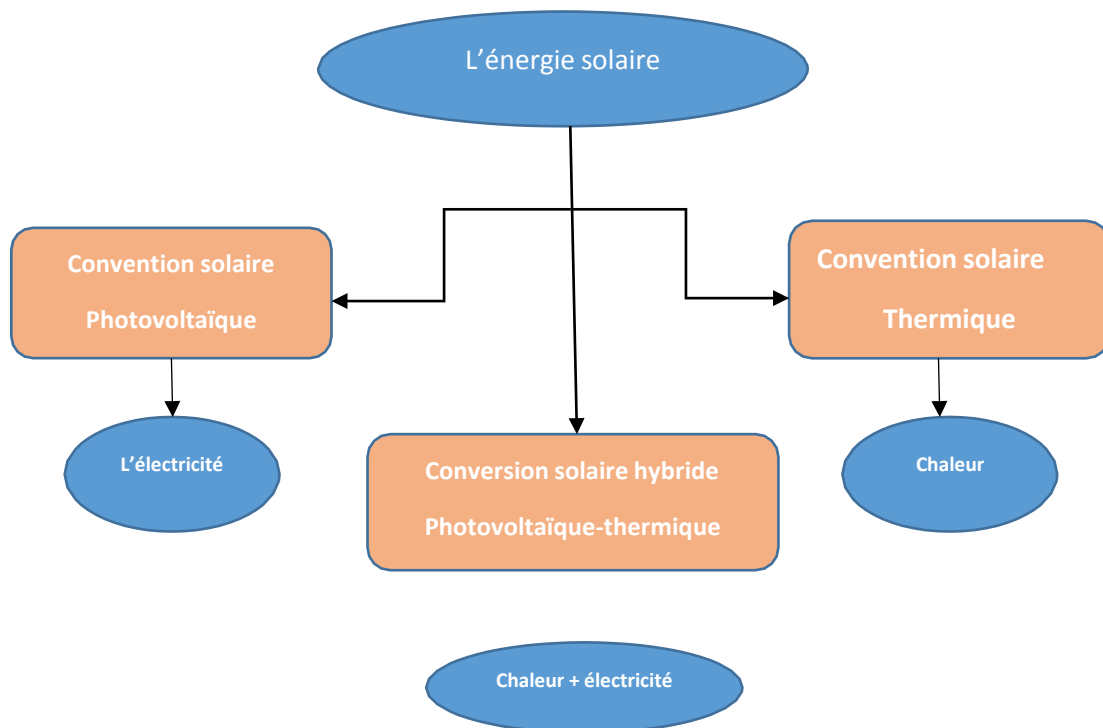


Figure I.1. Organigramme représentant les différents procédés de l'exploitation de l'énergie solaire.

L'énergie solaire est actuellement exploitée selon deux techniques :

I.2.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) provient de la conversion directe de l'énergie photonique, y compris la conversion de l'énergie électrique en énergie électrique sous forme de rayonnement optique (solaire ou autre). Pour ce faire, elle utilise des modules photovoltaïques constitués de cellules constituées de matériaux sensibles aux longueurs d'onde de la lumière visible qui effectuent cette conversion d'énergie. La combinaison de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle produit un générateur photovoltaïque (GPV) avec une caractéristique courant-tension de repos non linéaire $I(V)$ et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairage et de la température de la batterie ainsi que du vieillissement des composants. [2]

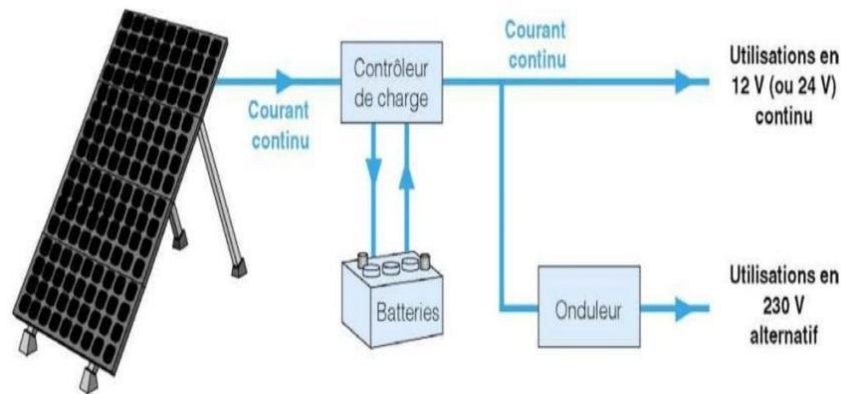


Figure I.2 : Système Photovoltaïque

I.2.2. L'énergie solaire thermique

Les technologies solaires thermiques sont celles qui transforment l'énergie solaire en chaleur utilisable. La chaleur est collectée à l'aide de capteurs solaires puis véhiculée à l'aide d'un fluide caloporteur dans un circuit hydraulique, qui comprend généralement un ou plusieurs réservoirs de stockage et permet une livraison à toute heure de la journée.

Le solaire thermique s'adresse ainsi à toutes les applications à basses et moyennes températures, c'est-à-dire inférieures à 100 °C, dans le but de produire de l'eau chaude sanitaire dans le bâtiment, les réseaux de chauffage et les secteurs de l'industrie, ainsi que les applications à haute température, supérieures à 100 °C, obtenue après concentration des rayons solaires, permettant la création de vapeur pour l'industrie et la production d'électricité.

I.3. Les capteurs photovoltaïques

I.3.1. Panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires sont constitués de cellules photovoltaïques (constituées de silicium cristallin) capables de convertir la lumière du soleil en courant électrique.

Et cette électricité peut être utilisée pour alimenter une maison et/ou revendu sur le réseau national.

I.3.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

L'effet, qui se produit lorsque la surface d'une cellule photovoltaïque est exposée à la lumière, est basé sur un phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. La tension générée peut varier de 0,3 V à 0,7 V, selon le matériau utilisé et la disposition de la cellule, ainsi que sa température et sa durée de vie.

Les cellules photovoltaïques constituées de composés contenant du silicium constituent un panneau solaire. Ils pourront générer du courant électrique continu dès qu'ils seront exposés à la lumière. Un onduleur le convertira ensuite en courant alternatif, qui sera compatible avec les charges électriques et le réseau de distribution.

De plus, il est raisonnable que plus il y a de soleil, plus la production d'énergie sera importante. La chaleur n'améliore pas l'efficacité ; au contraire, si la température monte trop haut, le rendement chute.

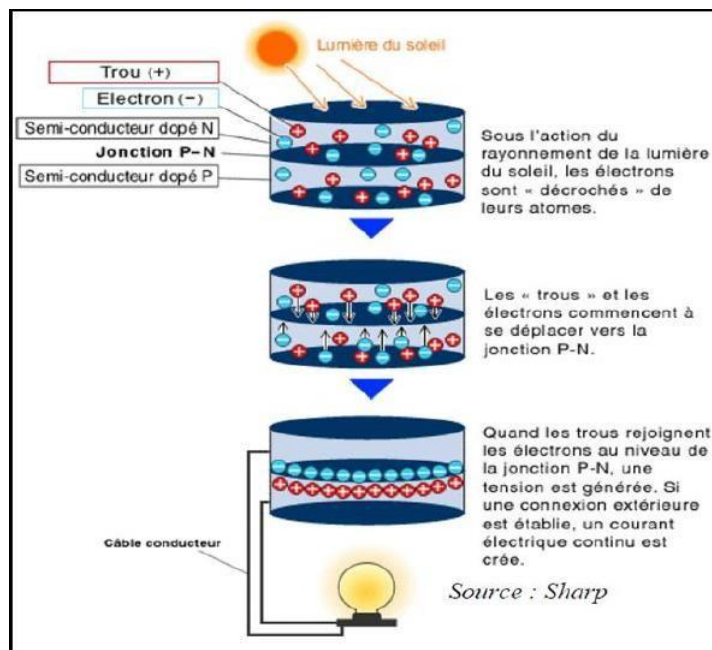


Figure I.3 : Effet Photovoltaïque [2]

I.3.3. Types de cellules photovoltaïques

Aujourd'hui, dans la pratique toutes les cellules solaires disponibles sont réalisées à base d'un semi-conducteur s'appelle 'silicium'. Les cellules solaires sont construites avec la même matière première et les mêmes procédés de base. Elles existent en différentes formes et technologies.

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 :

b. Les cellules de silicium monocristallin

Sont fabriquées en découpant le cristal en fines tranches, qui forment les cellules. La couleur de ces cellules est généralement un bleu uniforme. La puissance de conversion maximale se trouve dans ce type de cellule.

c. Les cellules en silicium poly cristallin

Ont un rendement légèrement inférieur à celui des cellules en silicium monocristallin, ce qui explique leur coût moins élevé. Les cristaux de silicium qui les composent peuvent être vus clairement. Ce type de cellule est également bleu, mais pas de la même manière.

d. Silicium amorphe

Le silicium amorphe offre divers avantages par rapport au silicium cristallin, notamment la possibilité de fonctionner à l'intérieur dans des conditions de faible luminosité. Il n'y a pas de structure cristalline dans ce type de cellule. On les voit couramment dans les appareils mobiles (calculatrices, etc.).

e. Cellules à couches minces

De nouveaux procédés de fabrication permettent la création de cellules à couches minces de grande surface, qui peuvent être utilisées dans les composants de façade, par exemple. Le terme « couche mince » fait référence à une sorte de cellule (ou module) réalisée par diffusion d'une fine couche de silicium amorphe sur un substrat (verre). Plusieurs technologies ont été industrialisées à ce jour (selon l'alliage utilisé).

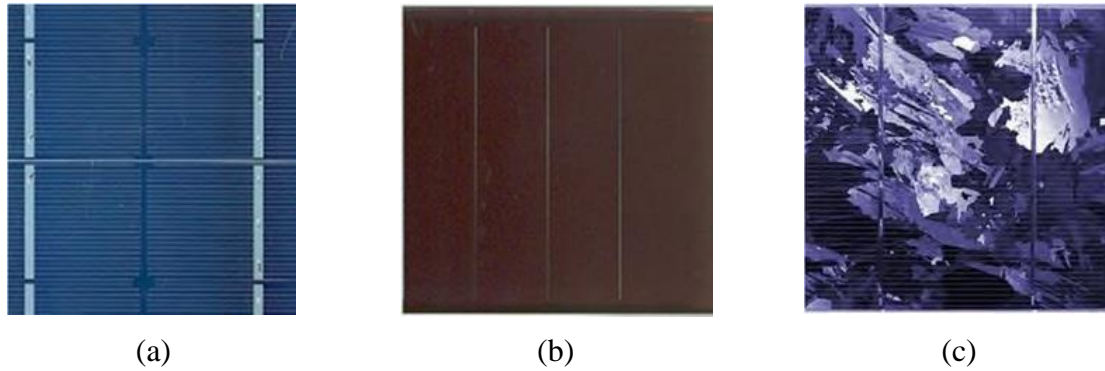


Figure I.4 : Technologie des cellules solaires : a) monocristallines, b) amorphes
c) poly cristallines

f. Cellule photovoltaïque organique

Les efforts de développement de la filière bio peuvent être justifiés pour plusieurs raisons qui résident dans les avantages qu'offrent ces matériaux. En effet, ils peuvent être facilement mis en forme par des procédés secs ou humides (spin, jet d'encre...) et des techniques issues de l'industrie de la microélectronique. De plus, la quantité de matière utilisée est relativement faible, et l'épaisseur du film est de 100 nm. L'ingénierie moléculaire permet également d'ajuster la valeur de la bande interdite et les niveaux d'énergie. [3]

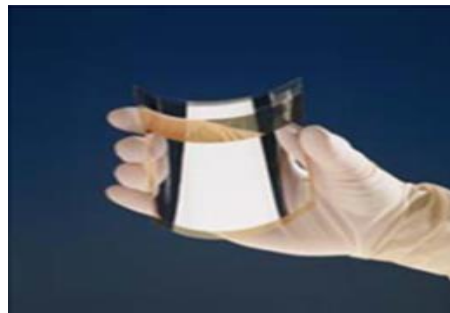


Figure I.5 : Cellule photovoltaïque organique

I.3.4. Technologie des panneaux solaire photovoltaïque

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. Pour obtenir du silicium de qualité photovoltaïque, il faut le purifier. Il se présente alors sous forme de barres à sections circulaires ou carrées appelées lingots.

Le lingot est ensuite tranché en fines tranches : de fines feuilles de plusieurs centaines de microns d'épaisseur.



Figure I.6 : 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.

I.3.5. Avantages et inconvénients de la conversion PV

La conversion photovoltaïque apparaît aujourd'hui comme une opportunité économique très viable. Cette conversion a le potentiel de faire une différence significative dans les régions éloignées qui n'ont pas accès à l'électricité.

a. Avantages

Les systèmes électriques solaires présentent un certain nombre d'avantages, notamment les suivants :

- ✓ Ils sont sûrs, non polluants et silencieux lorsqu'ils sont utilisés.
- ✓ Ils sont rentables dans les régions éloignées et dans une variété d'applications résidentielles et commerciales.
- ✓ Ils sont flexibles et peuvent être étendus à tout moment pour répondre à vos besoins énergétiques.
- ✓ Ils vous permettent de mieux contrôler votre réseau ou votre système de sauvegarde en cas de panne de courant.

b. Inconvénients

- ✓ Vous devez également être conscient des limites pratiques des systèmes PV, notamment le fait qu'ils ne sont pas idéaux pour les applications à forte intensité énergétique comme

le chauffage. Si vous souhaitez utiliser l'énergie solaire, envisagez d'autres options comme les chauffe-eaux solaires, qui peuvent fournir une chaleur plus efficace.

- ✓ Les systèmes connectés au réseau sont rarement rentables, en particulier parce que la technologie solaire actuelle est nettement plus chère que les sources d'énergie traditionnelles. En raison du fait que ces systèmes pourraient être coûteux.

I.4. Les capteurs solaires thermiques

Le capteur solaire thermique (figure I.7) absorbe le rayonnement solaire pour le convertir en énergie thermique utilisable, transmise grâce à un fluide caloporteur (eau, air, ...). Les capteurs solaires sont utilisés pour chauffer l'eau domestique, chauffage domestique, et produire de la chaleur à haute température.

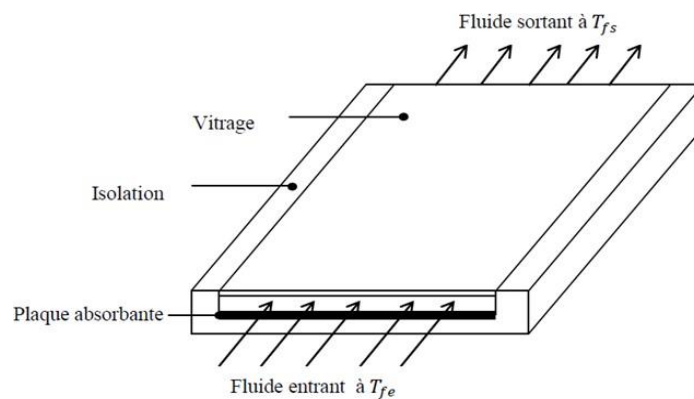


Figure I.7 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan

I.4.1. Principe de fonctionnement

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, huile ...) La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous (sur) cette paroi récupère par convection et rayonnement une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température $\Delta T = T_{fs} - T_{fe}$ à la traversée du capteur. [4]

C'est-à-dire un collecteur solaire ou capteur solaire est utilisée pour extraire la chaleur du rayonnement du soleil. Ainsi, un collecteur fait toujours quelque chose de chaud.

I.4.2. Les capteurs solaires thermiques à eau

Similaire au système de chauffage d'eau, les capteurs solaire photovoltaïques/thermiques à base liquide (PV/T) sont utilisés pour chauffer l'eau et la production d'électricité pour divers applications domestiques et industrielles [5]. Le chauffe-eau domestique utilise

généralement des capteurs solaires plat en connexion parallèle et fonctionne automatiquement avec un thermosiphon tandis que le système de chauffage à eau industrielle un certain nombre de capteurs à plat en série sont utilisés et par conséquent, il utilise une pompe à eau alimenté par un panneau photovoltaïque pour maintenir un débit d'eau à l'intérieur du capteur. Un schéma d'un capteur solaire d'eau PV/T est présenté à la Figure I.8 [6].

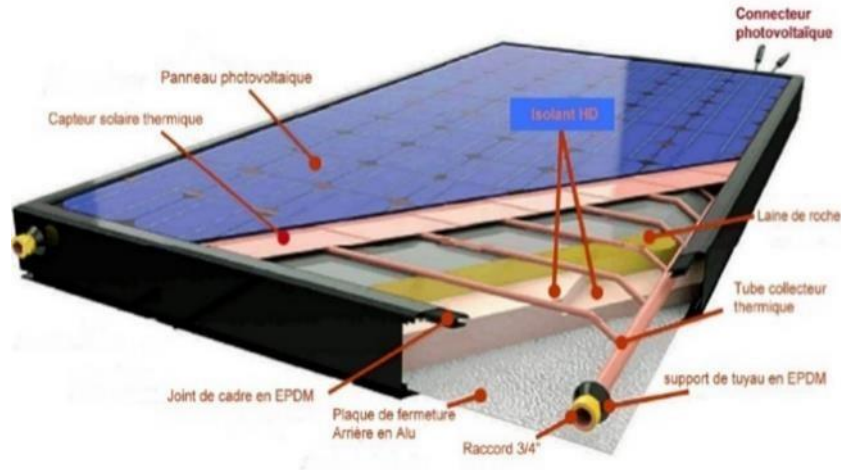


Figure I.8 : Schéma du collecteur eau PV/T. [6]

I.4.3. Les capteurs solaires thermiques à air

L'air et l'eau sont utilisés comme fluides de transfert de chaleur dans les capteurs solaires PVT, produisant des systèmes de chauffages PVT/air et PVT/eau, respectivement. Cependant les systèmes PVT à air sont utilisés dans de nombreuses applications pratiques en raison de faible construction (utilisation minimale des matériaux) et les coûts de réalisation.



Figure I.9 : Exemple d'un capteur plan à air [7]

Dans la plupart des cas, le conduit d'air est composé de deux surfaces parallèles : le verre et l'absorbeur. Contrairement à l'eau, l'air a une faible capacité calorifique ce qui conduit à

augmenter les surfaces de captation. L'air ne présente pas le risque de gel ou d'ébullition, il est abondant et gratuit. [4] [7].

I.4.4. Type des capteurs solaire thermique

Un certain nombre de détails différencient les capteurs les uns des autres, principalement, la structure, la surface des absorbeurs, les circuits hydrauliques et la perte de charge, le vitrage. On distingue :

I.4.4.1. Capteur plan

Les capteurs plans sont composés :

- D'un boîtier ou coffre en profilé d'aluminium avec joint d'étanchéité.
- D'un couvercle transparent en verre trempé sur la face avant.
- D'un isolant thermique sur la face arrière.
- D'une plaque absorbante ou absorbeur en cuivre recouvert d'un revêtement sélectif spéciaux a fin d'absorber et transférer la chaleur mieux que la peinture noire régulier possible.
- De tubes en cuivre soudés sur l'absorbeur à l'intérieur desquels circule le fluide caloporteur.



Figure I.10 : Capteur solaire plan avec vitrage.

I.4.4.2. Le capteur à tube sous vide ou tubulaire

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C.

Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel ainsi que pour les applications de refroidissement par des cycles de réfrigération régénérates.

Comme illustre à la figure 1.11, les capteurs à tubes sous vide sont constitués des rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête. L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré et atteint des pressions de vide autour de 10⁻³ mbar. Cela crée des conditions d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection et par rayonnement, pour atteindre des températures plus élevées.

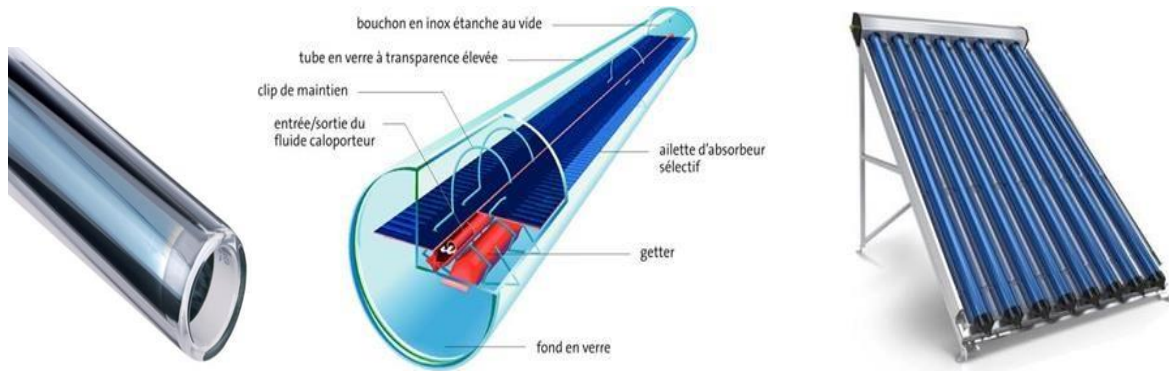


Figure I.11 : Capteur à tube sous vide

I.4.4.3. Les capteurs à concentration

Ce sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteurs, lentilles...) destinés à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement ayant traversé l'ouverture (une surface de grande taille).

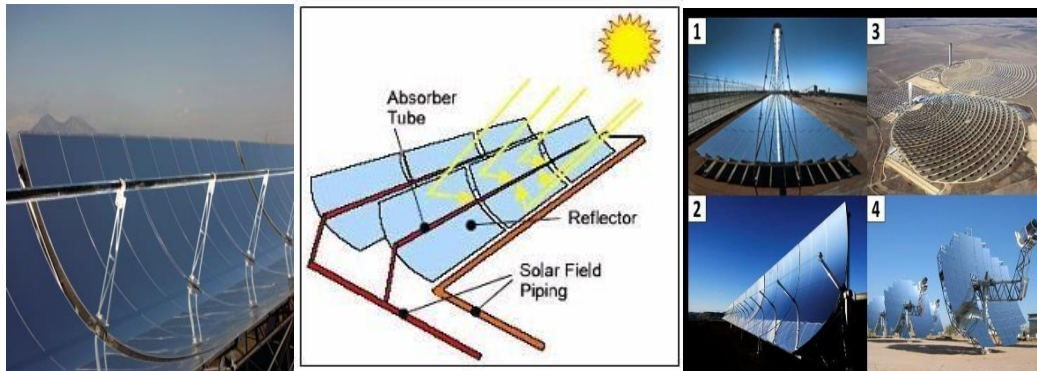


Figure I.12 : Capteur à concentration

I.4.4.4. Les capteurs non-vitrés

Les capteurs solaires non vitrés (de 35 à 40 °C) sont généralement utilisés pour le chauffage à basse température (ex : chauffage de piscine) et ne sont donc pas recommandés pour les applications industrielles. Un capteur solaire plat à eau peut être utilisé pour des applications de température allant jusqu'à environ 80 °C et un capteur solaire à tube sous vide peut atteindre une température d'environ 120 °C. Dans ce type de capteur une grande partie de l'énergie solaire est absorbée à cause de manque de vitrage. 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.



Figure I.13 : Capteur solaire non vitré

I.4.4.5. Les capteurs solaires plans 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.



Figure I.14. Capteur solaire plan vitré

I.5. Les capteurs solaires hybrides PV/T

Un capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) combine un module photovoltaïque avec un capteur solaire thermique pour réaliser simultanément la conversion de l'électricité du rayonnement solaire et la récupération de la chaleur. Environ 15 à 20 % du rayonnement solaire absorbé par les panneaux photovoltaïques est converti en production électrique, tandis que le reste est utilisé pour chauffer les cellules photovoltaïques [8], ce qui cause un certain nombre de problèmes.

Pour un module PV en silicium cristallin fonctionnant à 25 °C, le rendement électrique chute à un taux de 0,45 à 0,6 % par degré d'augmentation de la température de la cellule. Pour les pays qui supportent des températures élevées, en particulier en été, cela se traduit par une

réduction significative de l'efficacité de l'électricité. Un autre problème qui pourrait survenir en raison de la température élevée de la cellule est le risque de dommages complets à la suite d'une surchauffe [9].

Par conséquent, le refroidissement des panneaux solaires est une tâche importante qui doit être prise au sérieux. Le refroidissement PV peut également être utilisé pour chauffer un fluide, ce qui nous permet d'améliorer l'efficacité électrique tout en récoltant de l'énergie thermique. Cette combinaison a donné naissance à un système dit hybride.

I.5.1. Classification des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques

Le capteur solaire PV/T plan peut classer en capteur PV/T d'eau combinaison de capteur PV/T eau/air, et capteur PV/T d'air ça dépend de type de fluide utiliser plus loin. La figure I.15 montre les différents types de capteurs solaires PVT disponibles dans la littérature [10].

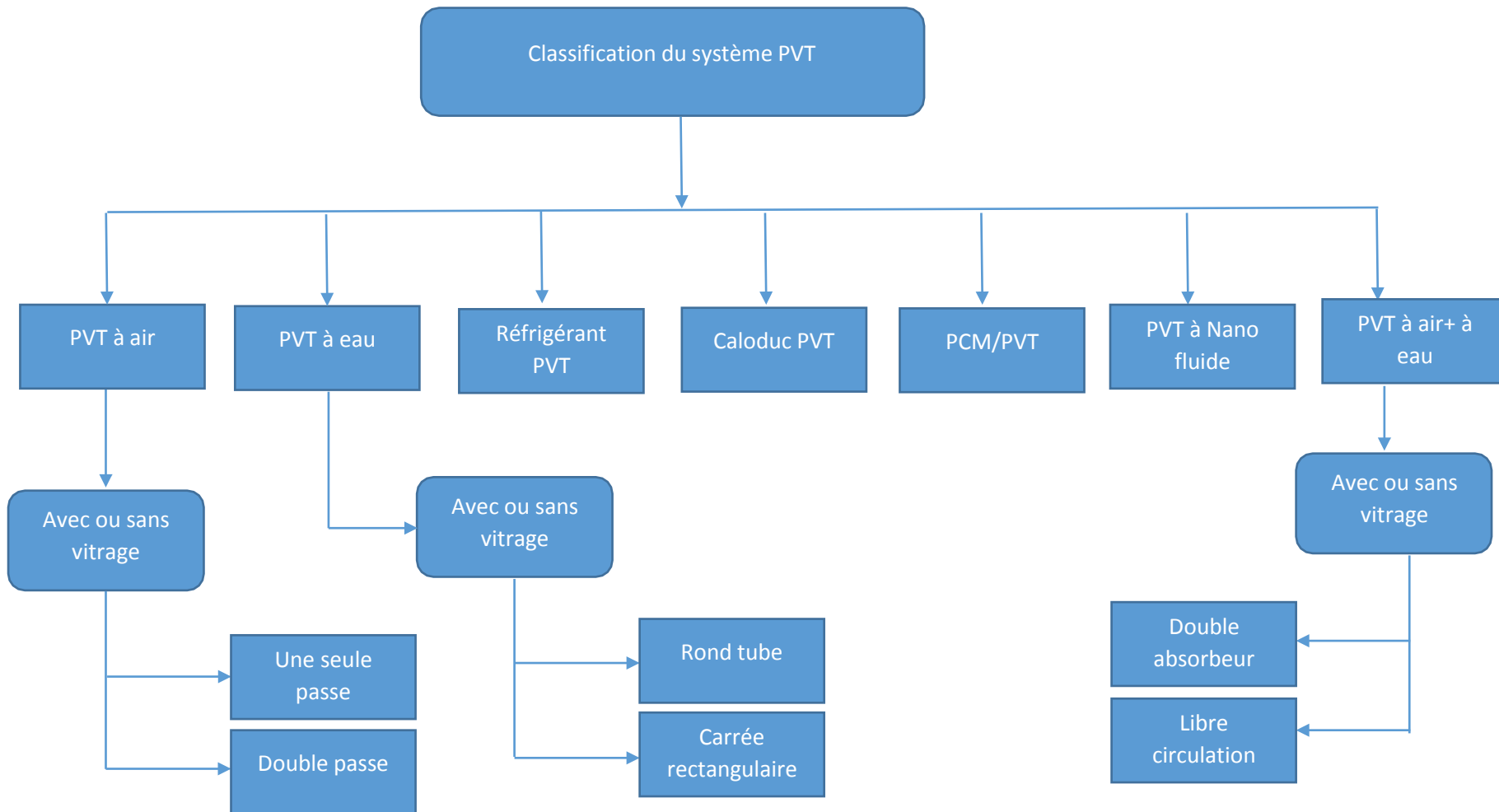


Figure. I.15 : Classification du système PVT. [10]

I.5.2. Synthèse bibliographique des capteurs solaires PV/T hybrides

La recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. La première l'application d'un capteur solaire d'air chaud photovoltaïque thermique a été testée dans une maison solaire de l'institut de conversion d'énergie, Université du Delaware en 1973 [11] et la plus ancienne installation PV/T d'air résidentielle en service se trouve aux États-Unis, construite par SunWatt en 1987 [12].

C'est en 1978, Kern et Russel ont introduit le concept de capteurs PV/T en utilisant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur pour évacuer la chaleur. Les capteurs PV/T sont classés en trois catégories en fonction du type de fluide caloporteur utilisé. À savoir, le capteur solaire hybride d'eau PV/T, le capteur solaire hybride d'air PV/T et le capteur combiné eau/air PV/T [13].

En 1994, la société française Cythelia [14] a développé un capteur solaire hybride à air PVT, appelé le capteur Capthel. Un capteur PVT non vitré avec extraction de chaleur d'air et de liquide a été développé et commercialisé [15]. Un nouveau capteur solaire hybride à air PVT a été développé par la société allemande Grammer Solar et la société Danoise Aidt Miljo [16][17]. Ce capteur solaire hybride à air PVT est recouvert par une petite cellule photovoltaïque pour alimenter un ventilateur. Ce système a été utilisé pour la déshumidification dans les chalets de vacances.

Due à la double fonction d'un capteur PV/T, ce type de capteur maximise l'utilisation de l'énergie solaire, ce qui se traduit par un taux de conversion solaire global plus élevé par rapport à celui d'un panneau PV ou capteur solaire thermique. Les cellules photovoltaïques se composent d'un matériau semi-conducteur convertit les photons à haute énergie du rayonnement solaire incident en électricité. Les photons de moindre énergie sont absorbés par le panneau PV et génèrent de la chaleur dans les cellules [18]. La génération de chaleur à l'intérieur de la cellule réduit l'efficacité des cellules.

La technologie thermique photovoltaïque (PV/T) peut extraire une grande quantité de chaleur et l'utilise pour des applications pratiques. La chaleur produite par la cellule est transférée au fluide caloporteur en augmentant le rendement électrique du module photovoltaïque PV tout en produisant simultanément un fluide chaud qui peut être utilisé pour des applications thermiques (séchoir solaire, chauffage des bâtiments...etc.) (Fig. I.16).



Figure.I.16 : Système solaire hybride à air PV/T [19]

La combinaison entre un système photovoltaïque et un système solaire thermique présente plusieurs avantages [20] :

- Le système peut être utilisé pour produire de la chaleur et de l'électricité,
- L'utilisation dans plusieurs applications : séchage, le chauffage et le refroidissement (refroidissement par dessiccant),
- Flexible et efficace : l'efficacité combinée est plus élevée que l'utilisation de deux systèmes individuels séparés
- Il est praticable et présente un bon marché : facile à intégrer dans un bâtiment en remplaçant le matériau de toiture par le système PV/T, la période de remboursement d'investissement peut être réduite.

Dans la littérature beaucoup de chercheurs ont entamé dans le domaine de systèmes hybrides (PV/T) ; il est important de comprendre les différents aspects scientifiques et approches pour améliorer l'expérience et la compréhension des principes fondamentaux de ce domaine.

I.5.3 Applications des capteurs solaires hybrides (PV/T)

I.5.3.1 Capteur solaire hybride PV/T à base d'eau

L'eau est un élément indispensable au fonctionnement de notre organisme sur la terre. Le capteur solaire hybride PV/T à eau répond aux besoins en électricité ainsi qu'en eau chaude aux habitats. Dans un capteur solaire PVT à eau PV/T, l'eau s'écoule à travers les tubes au-dessous du module PV pour le refroidir, ceci à son tour augmente le rendement électrique η_{ele} du capteur solaire hybride d'eau (PV/T).

Zondag et al. [21] ont analysé diverses configurations de capteur solaire d'eau PV/T basées sur les modèles d'écoulement d'eau sous le module PV (Fig.I.17).

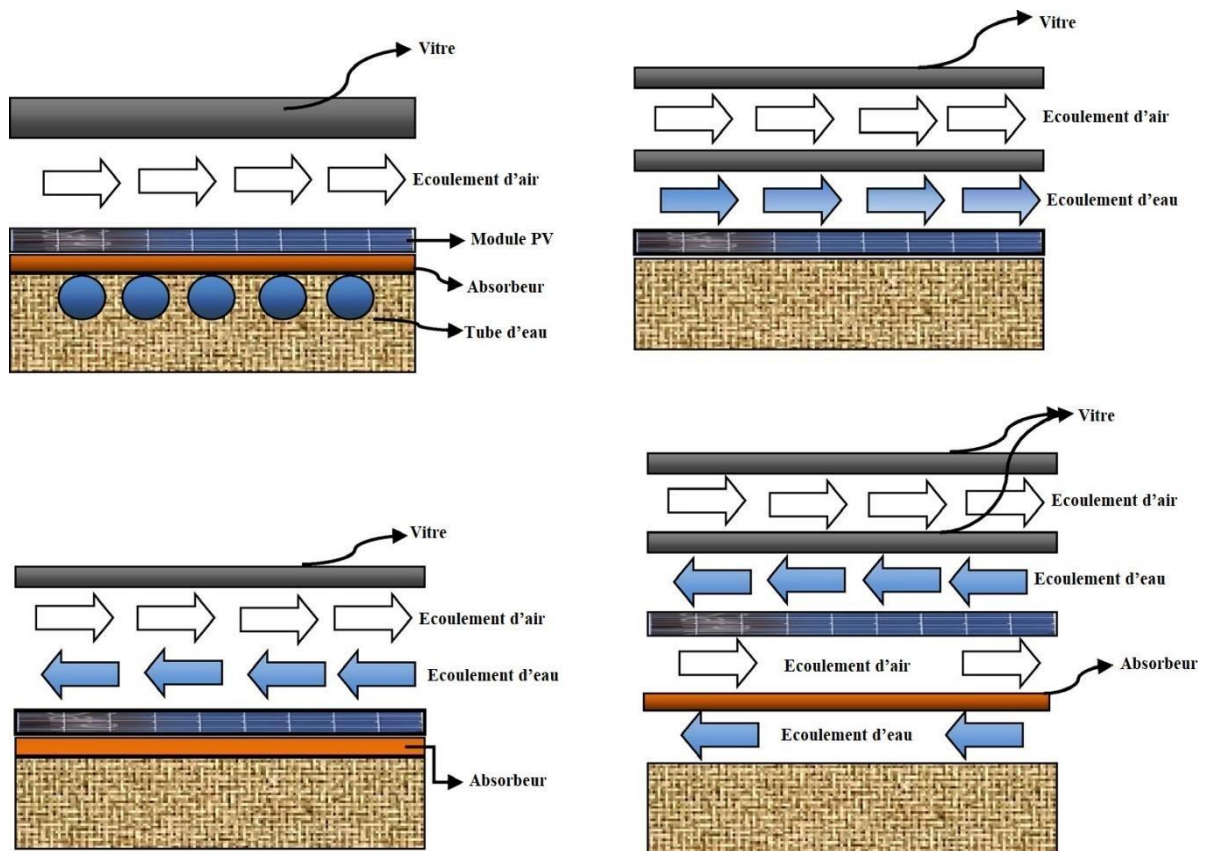


Figure.I.17 : Classification des capteurs solaires PV/T basé sur le modèle d'écoulement d'eau [21].

Chow et al. [22] ont étudié les résultats d'une vitre supplémentaire sur capteur solaire d'eau PV/T. D'après l'étude expérimentale, ils ont conclu que la production d'énergie thermique est plus élevée pour la conception vitrée, tandis que le module PV non vitré convient si l'énergie à la sortie est intéressante (Fig.I.18).



Figure.I.18 : capteur solaire hybride d'eau PVT vitré et non vitré. [22]

Kiran et Devadiga [23] ont présenté étude comparative entre un capteur solaire hybride à eau PVT et un panneau photovoltaïque PV autonome et le chauffe-eau solaire. Ils ont trouvé d'après l'analyse expérimentale que les rendements η_{ele} et η_{th} du système PV/T sont 8,26 % et 57,90 %, respectivement, une augmentation significative par rapport un panneau PV et un chauffe-eau solaire en fonctionnement individuels.



Figure.I.19 : Système hybride d'eau PVT [23].

Dupeyrat et al. [24] ont étudié l'effet de débit d'eau dans un absorbeur plat d'un capteur solaire PV/T à simple vitrage, ils ont trouvé un rendement thermique de 79 %, et un rendement électrique de 8,8 % et, le rendement total est 88 %. Liang et al. [25] ont réalisé un capteur solaire d'eau PV/T combiné avec du graphite ; il a produit un rendement électrique important 7,2 % et une efficacité d'économie d'énergie essentielle de 45 %. Yazdanpanahi et al. [26] ont présenté une modélisation mathématique et simulation d'un système solaire hybride à eau (PV/T) plate avec et sans vitre. Ils ont constaté que le système PV/T avec vitrage donne meilleur rendement énergétique.

L'avantage supplémentaire offert par un système PV/T à base d'eau est que l'eau utilisée comme fluide en circulation peut être réutilisée dans les bâtiments, les maisons, etc. comme eau chaude. Tripanagnostopoulos et al. [27] ont fait un travail expérimental pour analyser l'effet du vitrage et d'un revêtement réfléchissant sur la performance du capteur hybride à eau PV/T. Ils ont conclu à partir de l'étude expérimentale que l'utilisation de vitrage contribue à augmenter la puissance thermique.

Tiwari et Gaur [28] ont rapporté qu'un module semi-transparent présente une meilleure efficacité qu'un module de base.

I.5.3.2. Capteur solaire hybride à base d'air (PV/T)

La conception des capteurs solaire hybride PV/T a été évolué du fait que plus de la moitié du rayonnement incident sur la cellule photovoltaïque est convertie en chaleur. Cette chaleur peut endommager la structure de la cellule photovoltaïque. La chaleur récupérée dans un module peut être utilisé dans de nombreuses applications telles que le séchage des légumes et le chauffage ... etc. le schéma d'un capteur solaire hybride à air PV/T est illustré dans la Figure.I.20.

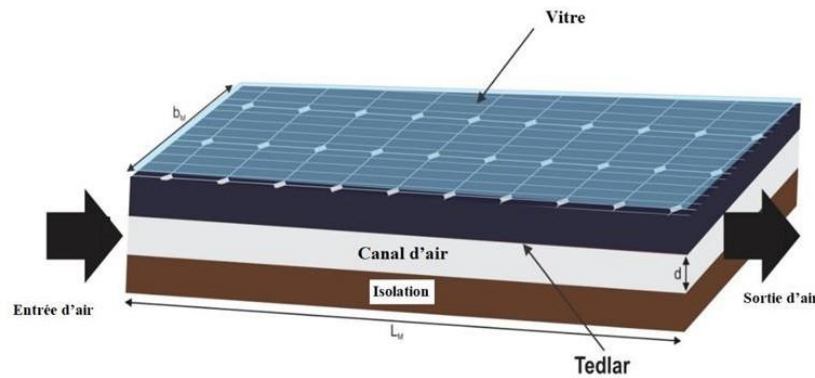


Figure.I.20 : Schéma d'un capteur PV/T à air [29].

La principale différence dans la conception du capteur solaire plat à air par rapport à un capteur solaire à eau est que dans les capteurs solaires à air n'ont pas des tubes où l'air s'écoule. Le paramètre principal pour améliorer la performance du capteur solaire à air est le taux de transfert de chaleur entre la surface de l'absorbeur et l'air.

Plusieurs modifications ont été introduites dans la conception et le mouvement de l'air dans les capteurs solaires à air, y compris l'utilisation des absorbeurs à ailettes, et d'un flux d'air à passages multiples (Fig.I.21).

Agrawal et Tiwari [30] ont analysé les performances d'un module hybride de cellules solaires à micro-canaux thermiques (Figure.I.22.). Les résultats montrent que les performances de ce système sont bonnes comparés à un module PV conventionnels. Amori et al. [31] ont fait une étude comparative pour différentes configurations de capteurs solaires hybrides à air PV/T plat. Pour une vitesse d'air constante égale à 0,0991 kg/s, une réduction moyenne de 15,52 °C de la température de la cellule a été observée avec un canal d'air à un seul passage par rapport au système PV sans refroidissement. Les rendements η_{th} (Thermique), η_{ele} (électrique) et η_T (Total) du système ont été à 46 %, 9,4 % et 55 %, respectivement.

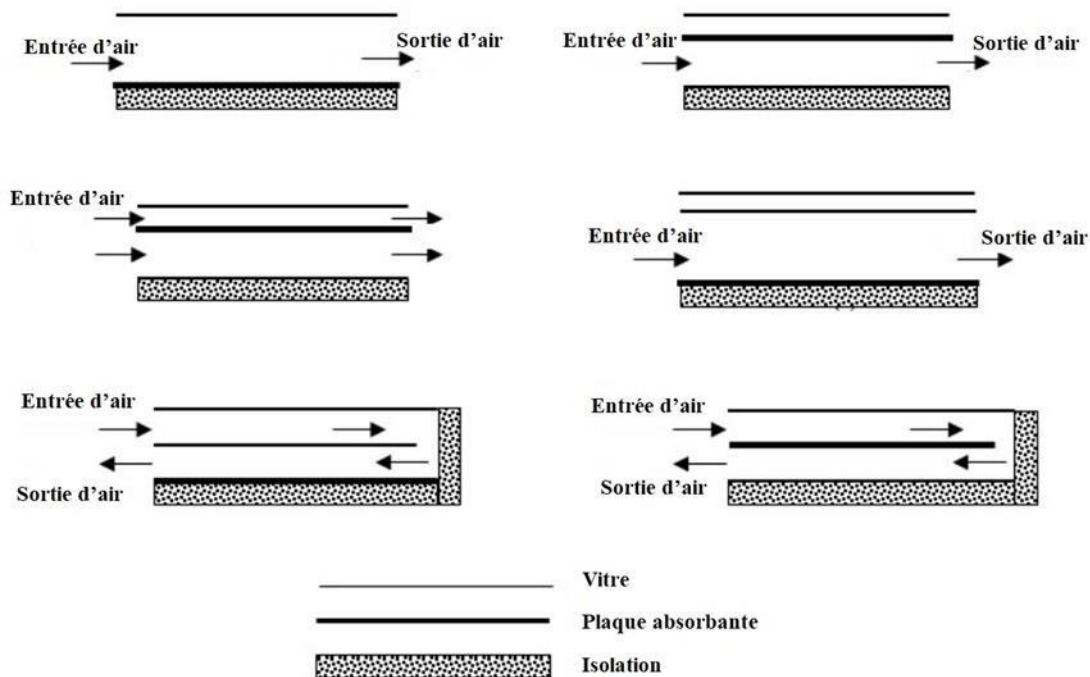


Figure.I.21 : Différentes conceptions de flux d'air dans les capteurs solaires à air [8]

Amori et Al-Najjar [32] ont étudié les performances théoriques thermiques et électriques d'un capteur solaire hybride à air PV/T en Irak. Ils ont trouvé que les rendements PV, thermique et PV/T étaient de 9-12,3 %, 19,4-22,8 % et 47,8-53,6 % respectivement. En 2010, Agrawal et Tiwari [33] ont fait une analyse énergétique et exégétique d'un capteur solaire hybride à air PV/T dans un climat froid. Ils ont rapporté que l'efficacité énergétique PV/T était de 53,7 %.

Une analyse énergétique et exégétique a été effectuée par Sarhaddi et al. [34] [35] pour un capteur solaire hybride à air PV/T. Ils ont signalé que les rendements PV, thermique et PV/T étaient 10 %, 17,18 et 45 % respectivement. Le rendement exégétique PV/T est de 10,75 %. Agrawal et Tiwari [33] ont fait une étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire à air PV/T. Ils ont trouvé que les rendements du PV et thermique étaient de 7,13 % et 33,54 % respectivement.

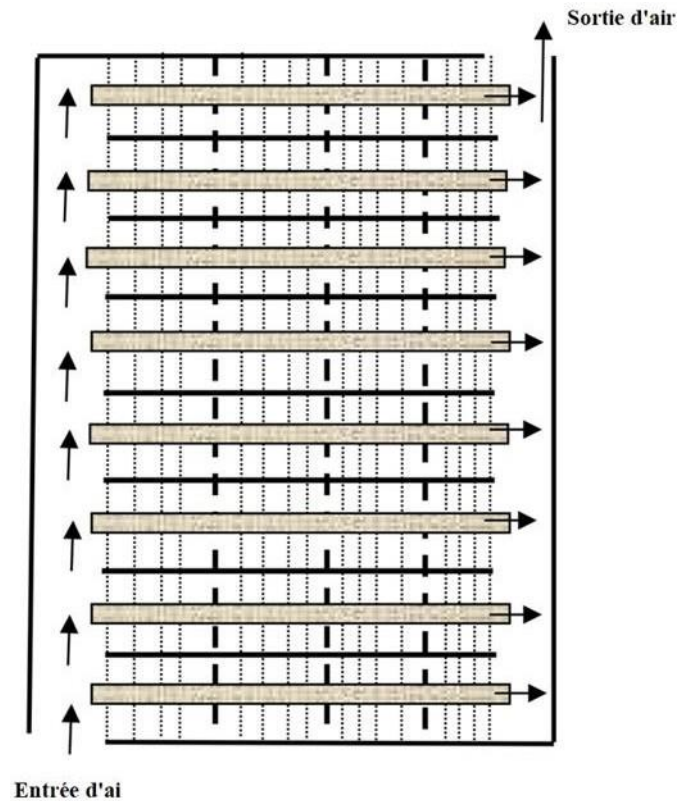


Figure.I.22 : Module hybride PV/T à micro-canaux [31].

Une optimisation de la géométrie de l'absorbeur pour un capteur solaire hybride à air (PV/T) a été effectuée par Pottler [36]. Ils ont constaté que la distance optimum entre les ailettes est d'environ 5 à 10 mm. Le rendement thermique du capteur peut atteindre 77% avec géométrie optimisée. Comme la chute de pression augmente considérablement avec l'espace entre les ailettes, ce facteur devrait également être pris en considération dans la conception.

I.5.3.3 Application des systèmes photovoltaïque-thermique (BIPV/T) intégrés aux bâtiments

Les systèmes hybrides PV/T doit être intégré dans les bâtiments pour chauffer les chambres, et les espaces...etc. pour améliorer ses performances électriques et thermiques. Le terme « **photovoltaïque-thermique (BIPV/T) intégrés aux bâtiments** » désigne l'intégration d'un système PV ou PV/T dans un immeuble.

Les systèmes PVIB sont des composantes intégrales des enveloppes de bâtiments et convertissent l'énergie solaire en électricité tout en remplissant des fonctions d'enveloppe de bâtiment comme :

- ✓ La protection contre les intempéries (imperméabilité, pare-soleil) ;

- ✓ L'isolation thermique ;
- ✓ La protection antibruit ;
- ✓ L'éclairage de jour ;
- ✓ La sécurité.

Actuellement, de nombreuses recherches sont effectuées sur les systèmes photovoltaïque-thermique (BIPV/T) intégrés aux bâtiments pour améliorer cette technologie.

Comme déjà mentionné auparavant, les travaux de recherches innovants sur les systèmes photovoltaïques/thermiques (PV/T) ont été initiés en 1970 et la technologie BIPV/T a été apparue la première fois dans les années 1990 [37] [38]. Dans la pratique, les systèmes BIPV/T a été proposé sur le toit des restaurants pour l'alimentation en l'électricité et la production d'eau chaude en Caroline du Nord, Etats-Unis [39].

Dans un système photovoltaïque-thermique à air (BIPV/T à air) intégrés aux bâtiments, l'air est utilisé pour extraire la chaleur des modules photovoltaïque intégré dans bâtiment. Par l'intermédiaire de flux d'air, la température du module PV est réduite et néglige le problème de congélation en hiver. Masoud Afrand et al. [40] ont proposé deux nouveaux modèles de BIPV/T avec échangeur de chaleur d'air/terre et les deux conceptions fonctionne en deux modes ; chauffage et refroidissement. Ils ont conclu que les critères d'évolution de la performance énergétique et exégétique augmenté avec l'augmentation de la longueur de la conduit, largeur et diamètre des tubes de l'échangeur de chaleur air/sol. Énergétique et exégétique. Le rendement est diminué avec de l'augmentation du débit massique d'air et la profondeur du conduit.

Un système BIPV/T est installé sur la façade de la salle d'essai illustrée à la figure I.23 au Portugal par Karol Bot et al. [41] à l'aide d'un outil de simulation dynamique, l'analyse numérique de la performance de la salle d'essai est effectuée par paramétrage de 14 scénarios dans deux conditions. Il est révélé que 48% de l'énergie totale est réduite pour le chauffage et le refroidissement par rapport au système de base.

Kasaeian et al. [42] Ont effectué une expérience comme le montre la figure.I.24 pour analyser l'effet de la convection de force sur les performances du BIPV/T avec un débit massique et une profondeur de canal variables. Le résultat a montré que l'efficacité thermique augmente avec la diminution de la profondeur du conduit et l'augmentation du débit massique, comme le montre la figure.I.25. La meilleure efficacité thermique du système se produit à 0,05 de profondeur et 0,018–0,06 kg/s de débit massique d'environ 15-31 % et l'efficacité électrique est dans la fourchette de 12–12,4 %.



Figure.I.23 : Emplacement de la salle d'essai dans le bâtiment solaire [41].



Figure.I.24 : Configuration expérimentale du collecteur d'air hybride PV/T [42].

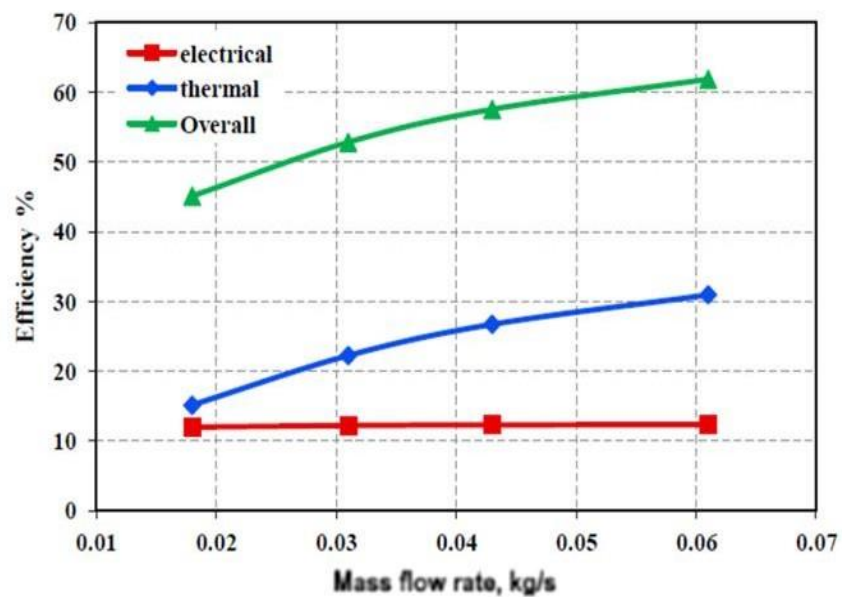


Figure.I.25 : Variation de l'efficacité par rapport aux différents débits massiques [42].

I.6. Le potentiel solaire en Algérie

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution de l'irradiation solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire. [43]

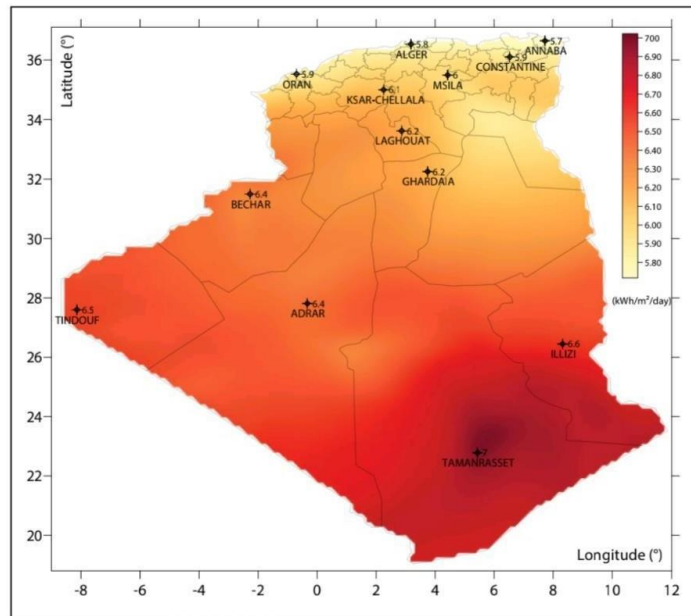


Figure I.26 : Carte de l'irradiation solaire globale horizontale par ciel clair en Algérie [44].

De par sa situation géographique (située entre le 19^{ème} et le 38^{ème} parallèle nord), l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.26. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et atteint les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale est de l'ordre de 5.8 KWh/m² sur la majeure partie du territoire national.

I.7. Paramètres influant sur le rendement d'un capteur solaire hybride

I.7.1. Effet d'ensoleillement sur la puissance utile et sur le rendement d'un capteur hybride PVT

La puissance utile (P_u) récupérée par le fluide de travail dépend étroitement du rayonnement solaire global (P_g). D'après la figure I.27, on remarque que la puissance utile est une fonction linéaire croissante du rayonnement solaire.

Ainsi, le rendement instantané du capteur étant lui-même lié à cette puissance et donc au rayonnement, il en résulte qu'une augmentation de ce dernier conduit à un accroissement du rendement instantané (fig.I.28). [45]

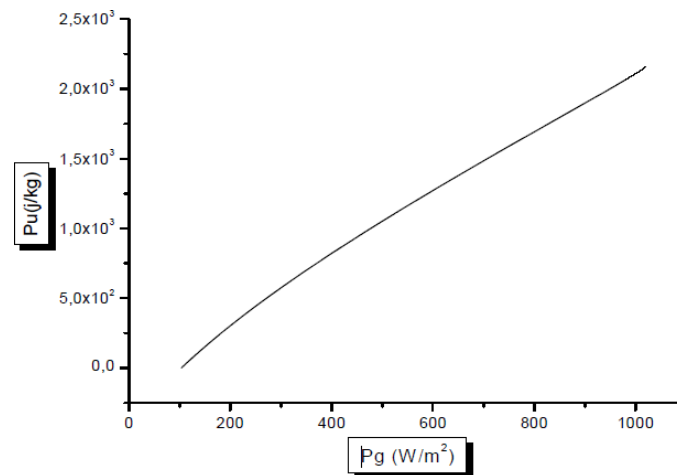


Figure I.27 : Variation de la puissance utile en fonction du rayonnement global [45].

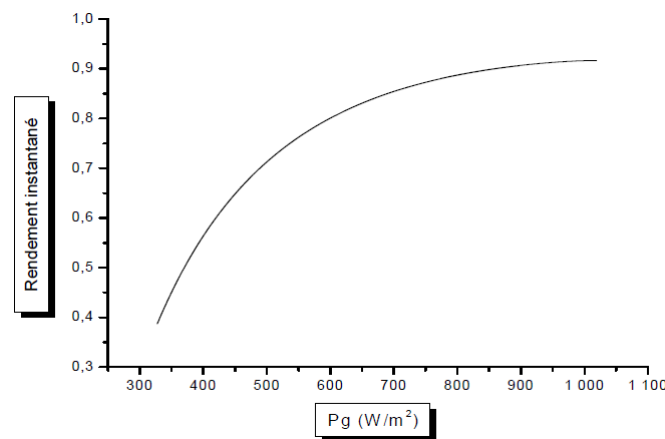


Figure I.28 : Variation du rendement instantané avec le rayonnement global [45].

I.7.2. Effet de la variation d'éclairement sur la caractéristique tension-courant

Sous un éclairement donné, toute cellule photovoltaïque est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) représentant l'ensemble des configurations électriques que peut prendre la cellule. La caractéristique tension-courant examinée à la figure I.29 correspond à un éclairement donné.

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe :

- Sa tension à vide (V_{co}) : Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.
- Son courant court-circuit (I_{cc}) : Cette valeur représenterait le courant généré par une cellule éclairée raccordée à elle-même.
- Son point de puissance maximal (MPP) : (maximal power point) obtenu pour une tension et un courant optimal : V_{opt} , I_{opt} (parfois appelés aussi V_{mpp} , I_{mpp})

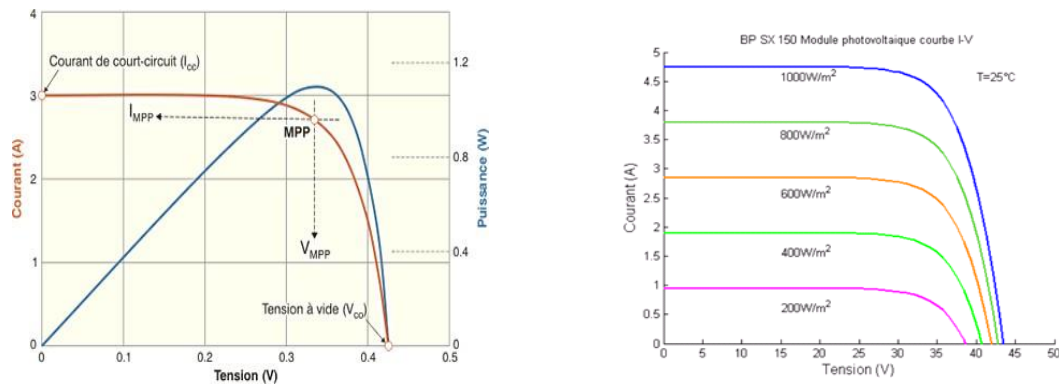


Figure I.29 : Effet de l'éclairement sur la caractéristique I-V selon les conditions météorologiques.

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface. La figure I.29 représente la caractéristique courant-tension d'une cellule PV solaire en fonction de l'éclairement, à une température et une vitesse de circulation de l'air ambiant constantes. On remarque que la tension V_{max} correspondant à la puissance maximale ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant I_{max} qui augmente fortement avec l'éclairement.

I.7.3. Effet de la température sur la caractéristique I-V

Les caractéristiques électriques d'une cellule PV dépendent de la température de jonction au niveau de la surface exposée. Lorsque la température augmente, la tension diminue alors que le courant augmente.

Dans le cas de cellules au silicium, le courant augmente d'environ $0,025 \text{ mA} / \text{cm}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$. La baisse globale de puissance est d'environ de $0,4 \% / ^\circ\text{C}$. Ainsi, plus la température augmente et moins la cellule est performante. Le rendement de la convection dépend fortement de la vitesse du vent.

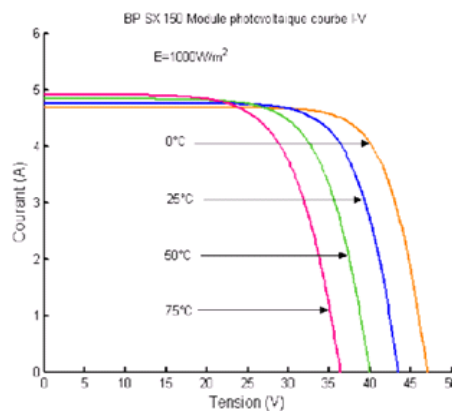


Figure I.30 : Influence de la température sur la caractéristique I-V.

Les cellules solaires sont donc portées à une température supérieure à la température ambiante, la différence entre les deux températures dépend essentiellement du rayonnement incident. Cette différence diminue lorsque la puissance électrique produite ou la vitesse du vent augmente.

I.7.4. Influence de l'angle d'incidence

Lorsque le rayonnement incident provient d'une direction inclinée par rapport à la normale au module, le rayonnement absorbé de façon utile diminue. On remarque que d'après la Figure I.31, le rendement instantané du capteur solaire plan croît avec l'augmentation de l'inclinaison du capteur.

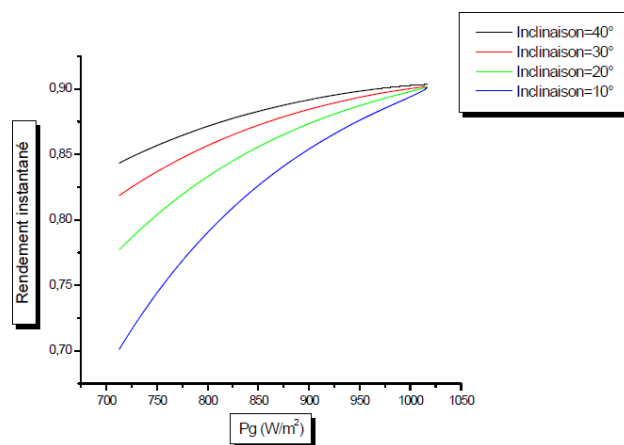


Figure I.31 : Evolution du rendement instantané en fonction de l'inclinaison du capteur.

Selon l'étude de Hamani et al [46], En hiver, lorsque la course du soleil est plus basse dans le ciel, le meilleur endroit pour assurer une bonne réception du rayonnement solaire est une inclinaison de 10 à 15° au-dessus de la latitude de cet endroit. Contrairement à l'été, durant lequel il est préférable d'incliner le capteur moins que la latitude du lieu De 10 à 15°.

I.8. Conclusion

On constate que le système solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) est en évolution, et le sujet de l'heure actuelle. De nombreux chercheurs ont entamé pour améliorer les performances des systèmes PV/T à air et à eau ; principalement dans la conception et la fabrication de l'absorbeur et les matériaux de construction, certains chercheurs ont présenté de nombreuses idées innovantes dans le domaine de PV/T comme, nano fluide et matériaux de changement de phase (PCM). D'autre part, d'autres recherches sont nécessaires pour optimiser les coûts (fabrication, entretien...etc.), amélioration de l'efficacité et du développement de la conception technologique.

Chapitre 2

Étude et réalisation d'un capteur solaire hybride PV/T

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter, les différentes étapes suivies pour réaliser le capteur solaire hybride photovoltaïque thermique (PV/T), en présentant une description détaillée de différents éléments essentiels de capteur PVT. Des tests préliminaires ont été effectuée afin de définir une meilleure configuration du capteur solaire hybride PVT qui donne un meilleur rendement.

II.2. Objectif de l'étude

Les performances d'un capteur solaire PVT peuvent être améliorées en jouant sur les paramètres de conception du système. Jusqu'à présent, plusieurs tentatives et de nouvelles techniques ont été préconisés pour augmenter le rendement du capteur solaire hybride PVT [47] [48] [31]. Deux types d'énergie, thermique et électrique, sont produites simultanément à partir du capteur solaire PVT. Ce capteur permet l'exploitation de l'énergie thermique résultante pour chauffer l'air et assurant le refroidissement des cellules d'un panneau PV. Un panneau solaire hybride utilise la chaleur dégagée par les cellules photovoltaïques pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou air), ce qui améliore le rendement des cellules PV. C'est le cas qui fait l'objet de cette étude pour améliorer ses performances énergétiques.

II.3 Description du capteur solaire hybride PVT absorbeur simple

Le concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique consiste à assembler les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de système hybride, les cellules du panneau photovoltaïque PV fonctionnent comme absorbeur thermique et refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur dans la face arrière du panneau PV. La figure II.1 présente une illustration du capteur solaire PV-T plan vitré utilisant de l'air comme fluide caloporteur. En général le taux élevé de rayonnement solaire avec l'absence d'une source de refroidissement augmente considérablement la température des cellules solaires en raison des interactions de la matière photonique [49]. On trouve plusieurs facteurs qui peuvent affecter le rendement du panneau solaire à plan tels que la nature de la matière de la plaque absorbante qui a un grand effet sur les performances thermiques du capteur solaire plan à air. D'autre part, les conditions météorologiques, la géométrie du panneau (longueur, largeur et épaisseur), le type de la plaque absorbante (acier, aluminium, cuivre, ...etc.) et la nature du vitrage (plexiglas ou verre).

Dans ce chapitre une configuration simple du panneau solaire plan à air avec une seule passe d'air sera présenté, alors on s'intéresse à la détermination expérimentalement des performances thermiques du capteur solaire plan à air, mesurant les températures dans

différents endroits de système hybride PVT avec différents débits massique différents correspond au trois journées 23-01-2022, 30-01-2022 et 31-01-2022, Le capteur solaire hybride PVT est placé à un angle d'inclinaison égale à 27° qui correspond à latitude et longitude d'Adrar (latitude : $27^\circ 8'N$, longitude : $-0^\circ 17'E$).

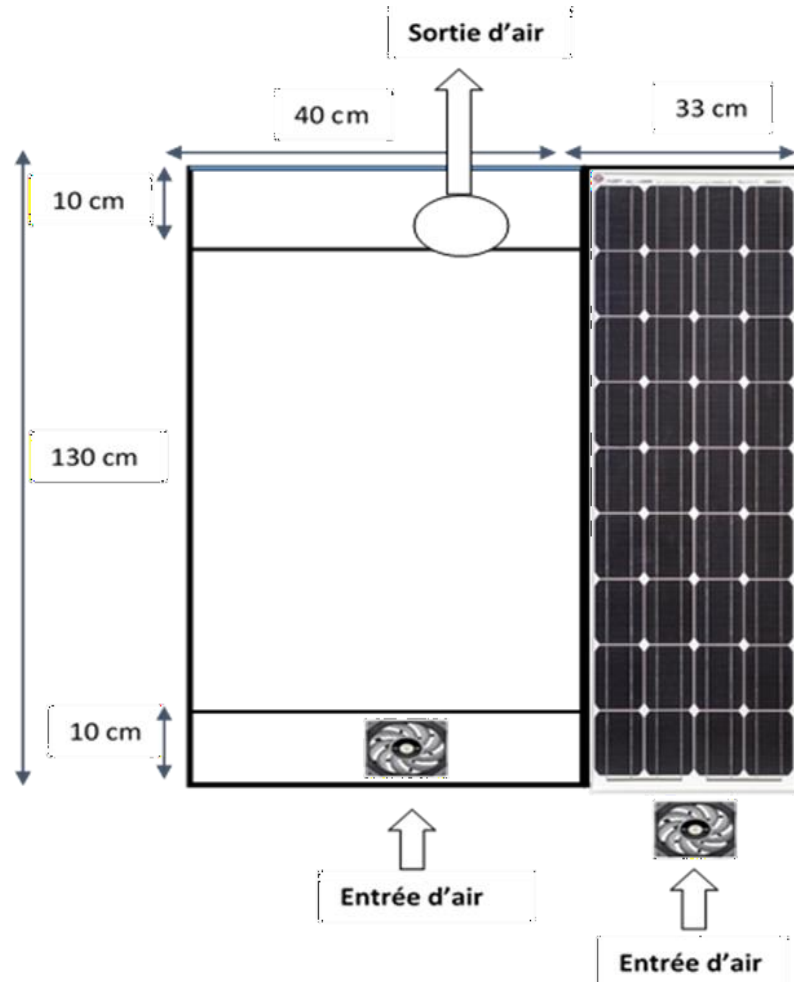


Figure.II.1 : Schéma descriptif du capteur PV-T plan vitré à air

Le système se compose d'un module photovoltaïque PV (Figure.II.3) d'une surface de 0.427 m^2 incliné, placé au même angle d'inclinaison que le capteur solaire PVT (à 27° à l'horizon), La partie supérieure du capteur est enfermée par une vitre en verre transparente de 0.52 m^2 et de 4.0 mm d'épaisseur, inclinée avec un angle de 27° , d'un boîtier rectangulaire en bois (Figure.II.4) couvert par une vitre transparente, collée par un silicone, elle permet de visualiser le capteur à l'intérieur. Le boîtier en bois ou coffret renferme les éléments du capteur (panneau photovoltaïque de type monocristalline UDTS-50 et le panneau solaire avec une surface de 0.52 m^2), il permet d'assurer la fixation du capteur et en lui permettant de se déplacer librement. Le vitrage est généralement posé avec un joint réalisé par le Silicone (Fig. II.5)

insensible aux rayonnements ultraviolets et avec un profil mécanique autorisant des opérations de montage et démontage aisés de capteur solaire PVT.

D'un absorbeur construit en tôle rectangulaire galvanisée de 0.424 m^2 ($1.06 \text{ cm} \times 0.4 \text{ cm}$) de surface et de 0.5 mm d'épaisseur, peinte en noir mat pour augmenter l'absorption des rayons solaires (Figure.II.5), ceci constitue l'élément essentiel du capteur solaire thermique, Généralement, l'absorbeur est une plaque métallique peinte en noir mât, qui permet d'obtenir un coefficient d'absorption compris entre $0,9$ et $0,95$, et d'une isolation thermique de 6 cm (figure.II.6) de Lain de verre est placée sous la plaque galvanisée pour éliminer les pertes thermiques à travers le couvercle sont dues principalement à la conduction à travers l'isolant et celles causées par le vent. Deux ventilateurs pour assurer la convection forcée de l'air au-dessus de la plaque absorbante (Figure II.7).

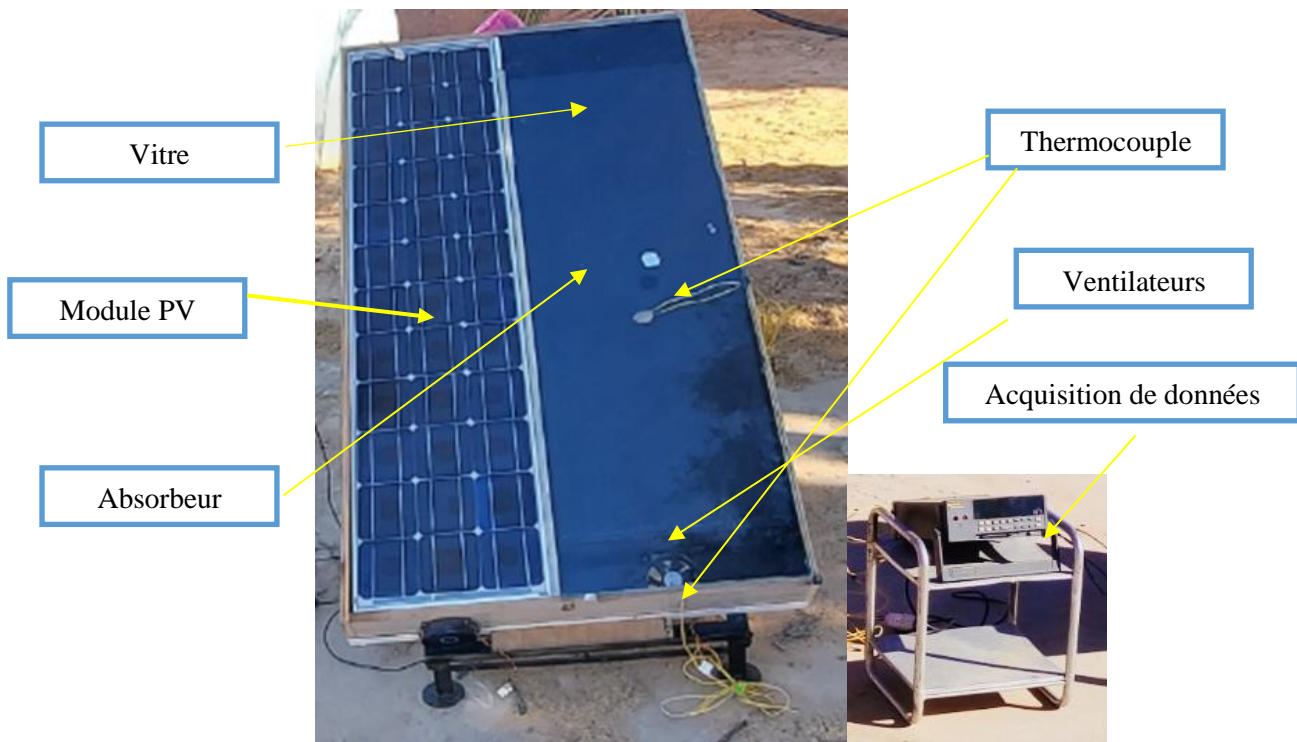


Figure.II.2 : Photographie du capteur solaire hybride à absorbeur simple.

Le module PV est intégré avec le capteur solaire thermique posé en parallèle avec la vitre, ce module est pour alimenter deux ventilateurs (DC) à courant continu. Le système de refroidissement (ventilateur DC) installé à l'entrée au-dessous de module photovoltaïque pour refouler l'air ambiant et refroidir le panneau PV, un autre ventilateur et placé au-dessous du capteur solaire pour refouler l'air chaud entre la vitre et l'absorbeur, Un tuyau de diamètre de 90 mm placé à l'extrémité du capteur pour faire sortir l'air chaud et le réutiliser dans des applications (séchage, chauffage... etc) (Fig.II.8).



Figure.II.3 : Module photovoltaïque



Figure.II.4 : Boitier en bois



Figure.II.5 : Tôle rectangulaire galvanisé, peinture, Silicon



Figure.II.6 : Isolant (laine de verre)

Les ventilateurs DC (à courant continue) (model FOXCONN PV902512L DC 12V 0.16A) (Fig II.7) sont utilisés pour souffler ou éjecter l'air ambiant dans les deux compartiments (la partie inférieure du module PV et la partie supérieure du capteur solaire thermique), alimentés directement par l'électricité produite par le panneau photovoltaïques PV.



Figure.II.7 : Ventilateurs à courant continue.

La figure II.8 représente l'emplacement des différentes composantes du capteur hybride photovoltaïque/Thermique PVT (l'absorbeur, l'isolant et le panneau photovoltaïque) dans le boîtier.



Figure.II.8 : Emplacement du : absorbeur, Lain de verre et panneau PV.

Table.II.1. Spécifications de conception du capteur solaire hybride PV-T

No	Composants	Spécification
1.	Panneau solaire thermique (Boîtier)	Taille : 1.3m × 0.4m × 0.1
2.	Panneau photovoltaïque	Taille : 1.3m × 0.33m ; 50W
3.	Espacement entre l'absorbeur et le verre	0.04 m
4.	Ventilateur DC	12V, 0.16 A
5.	Inclinaison	27°

II.4. Appareils et instruments de mesure

Le capteur solaire est équipé par des instruments de mesure pour mesurer les températures dans différents endroits de chaque composant ainsi que la tension et le courant fournir par le panneau photovoltaïque. Des thermocouples calibrés de type-K (Ni-Cr) et type-J sont utilisés pour mesurer la température d'entrée d'air, d'air ambiant, d'absorbeur, de la vitre et de sortie d'air. Ces thermocouples sont connectés et rassemblés à un système d'acquisition de données automatique de type Fluke 2625A Hydra. Toutes les mesures sont enregistrées avec un intervalle de temps de 10 minutes. Ces mesures ont été enregistrées de 08h00 jusqu'à 19h00.

II.4.1. Mesure des températures

Afin de mener à bien l'expérimentation, six thermocouples (Figure.II.9.) ont été placés sur le système, répartis comme suit :

- ◆ 1 thermocouples à l'entrée du capteur.
- ◆ 1 thermocouples à la sortie du capteur.
- ◆ 2 thermocouples au niveau de la plaque absorbante.
- ◆ 1 thermocouples au niveau du vitrage.
- ◆ 1 thermocouple pour la mesure de la température ambiante.



Figure.II.9 : Photographie d'instrument de mesure de température (Thermocouples de type K et J)

III.4.2. Acquisitions des données

Dans cette étude, une acquisition des données de marque FLUKE : HYDRA Model 2625A Figure.II.10 est utilisé pour collecter les données des thermocouples de températures indiquées auparavant. Cette acquisition de données possède 20 canaux qui sont utilisés pour mesurer les données de température, rayonnement et tension (6 thermocouples, Pyranomètre, deux ports pour la tension). Grâce à cet appareil, on peut enregistrer les valeurs de température et du rayonnement et les tensions pendant les expériences, par le biais d'une interface d'un logiciel installé sur un ordinateur permettant de lire et de stocker séparément

les données collectées, il est mentionné que l'acquisition des données est programmée manuellement pour que les données seront prises et enregistrées automatiquement pendant des intervalles de temps de 10 minutes.



Figure.II.10 : Système d'acquisition de type Fluke 2625A Hydra.

La station météorologique URER-MS fournit les caractéristiques météorologiques qui caractérisent les journées d'essai, telles que le flux solaire, la température ambiante et la vitesse du vent (Fig. II.11). Un Pyranomètre de type Kipp & Zonen CM11 est utilisé pour détecter l'intensité de l'irradiation solaire. Un anémomètre de type NRG 40C est utilisé pour mesurer la vitesse du vent. L'erreur des instruments de mesure utilisés dans cette étude (thermocouples, pyranomètre, anémomètre) sont regroupés dans le tableau II.2.



Figure II.11 : Station météorologique de l'URER-Adr.

Tableau II.2 : Erreur des instruments de mesure.

Instrument de mesure	Modèle/type	Précision	Gamme de mesure
Thermocouples	Type-K (Ni-Cr)	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	-100 à 500°C
Pyranomètre	Kipp & Zonen CM11	$\pm 1 \text{ W/m}^2$	0 à 4000 W/m^2
Anémomètre	NRG 40C	$< 0.1 \text{ m/s}$	1.0 à 96 m/s

III.4.3. Mesure du débit du fluide de travail

Pour mesurer la vitesse de l'air ou le débit du fluide caloporteur, on a utilisé un Thermo-anémomètre de type « Testo 425 » avec une précision de ($\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ / $\pm 0,03 \text{ m/s}$ + 5 % v.m) destiné aux mesures des vitesses, des débits et des températures des gaz (figure II.12).

**Figure II.12 :** Appareil de mesure du débit de fluide caloporteur.

III.4.4. Mesure du rayonnement solaire

La mesure de l'éclairement solaire est assurée par un Pyranomètre de type Kipp & Zonen modèle CM11 (figure II.13). Ce Pyranomètre est étalonné avant les essais avec une sensibilité typique de $4.78 \mu\text{V/W/m}^2$ qui varie de moins de 5% telle que les conditions de fonctionnement considérées. Ce type de Pyranomètre a un double cristal pour le protéger de l'environnement et aussi pour éviter les pertes de chaleur par convection. Ainsi, la chaleur absorbée par la thermopile est convertie à un signal de tension proportionnel au rayonnement solaire. Le Pyranomètre employé est positionné dans un même plan que le capteur solaire PVT.



Figure II.13 : Pyranomètre.

Le dispositif expérimental a été réalisé durant les mois de Décembre 2021, Janvier 2022, Février et Mars 2022 conçue pour le tester au sein de l'Unité de recherche URER/MS à Adrar, dans laquelle les données ont été enregistrées avec un intervalle de 10 minutes du matin jusqu'au coucher de soleil durant la période de test, dont les paramètres mesurés sont :

- ✓ Le rayonnement solaire global
- ✓ La température ambiante.
- ✓ La température de l'air à l'entrée du capteur
- ✓ La température de l'air à la sortie du capteur
- ✓ La température moyenne d'air dans le canal.
- ✓ La température de l'absorbeur.
- ✓ La température de la vitre.
- ✓ Le débit volumique de l'air

III.4.5. Variation de débit d'air

Pour faire varier la vitesse de l'air ou le débit volumique de l'air nous avons réalisé un interrupteur de de contrôle de vitesse de l'air à la sortie du panneau photovoltaïque, la figure II.14 représente un variateur de vitesse d'air de ventilateur, trois vitesses ont été choisi ; $0.02804 \text{ m}^3/\text{s}$, $0.0082 \text{ m}^3/\text{s}$ et $0.016 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivement pour les expériences.



Figure II.14 : Variateur de vitesse de l'air de ventilateur.

II.5. Test N°1 (23-01-2022)

Les données météorologiques de la journée du 23/01/2022 sont présentées dans le tableau II.3. C'est une journée froide avec un flux solaire moyenne qui atteint une valeur maximale de 738,05 W/m². La température ambiante pour cette journée est basse et varie entre 9,33 °C et 22,19°C. Les résultats montrent que la température de l'absorbeur (T_{abs}) augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire. On constate que la température maximale de l'absorbeur est de 69,95 °C. Cette augmentation de la température de l'absorbeur est due à l'épaisseur de la tôle galvanisée et l'épaisseur de la lame d'air qui influe sur les échanges convectifs entre l'absorbeur et la vitre.

Tableau II.3. Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de 0.02804 m³/s.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques		Température PVT					DT	η %
	I_0 (W/m ²)	T_{amb} (°C)	T_{eair} (°C)	T_{abs} (°C)	T_{eair} (°C)	T_v (°C)	T_{sair} (°C)		
08 :00	3.63	9.33	9,9	11,29	10,61	8,43	10,24	0.34	0
09 :00	131.36	10.18	11,9	20,49	14,74	12,92	13,7	1.8	0.26
10 :00	344.57	13.38	17,27	39,41	24	22,44	22,41	5.14	0.40
11 :00	517	16.01	20,15	53,03	30,05	30,05	29,16	9.01	0.56
12 :00	667.09	18.1	24,73	64,72	36,08	36,77	35,6	10.87	0.55
13 :00	738.05	19.55	26,05	69,95	37,96	40,02	37,5	11.44	0.51
14 :00	677.96	20.67	24,86	66,91	36,72	41,35	35,47	10.6	0.54
15 :00	629.94	21.13	25,92	64,23	36,18	40,11	35,08	9.15	0.47
16 :00	486.5	22.19	24,7	55,37	32,37	36,79	31,48	6.75	0.43
17 :00	287.49	21.05	25,21	42,01	29,61	30,51	28,2	2.99	0.24
18 :00	72.18	20.81	22,18	26,38	23,24	22,43	22,49	0.3	0.16

D'après la littérature, pour une lame d'air comprise entre 2,5 cm et 4 cm, le coefficient d'échange reste inchangé. Pour une lame d'air plus faible, le coefficient d'échange augmente, l'air étant immobile la chaleur est transférée par conduction uniquement. Pour des épaisseurs supérieures à 4 cm, les mouvements de convection sont importants et le coefficient d'échange n'est guère amélioré [50] [51]. Il est possible de réaliser une lame d'air étanche mais il faut veiller aux pressions obtenues. La meilleure solution consiste à réaliser une légère ventilation du capteur qui permet l'évacuation des condensations (Notre cas).

La température de la face interne de la vitre (T_g) est inférieure à celle de l'air, du fait qu'elle est exposée à un échange thermique convectif et radiatif à sa face extérieure en contact avec l'air ambiant. La comparaison montre aussi que la température de l'entrée d'air est supérieure à celle de la sortie et atteint une différence de 11,44 °C à 13h00. Ceci confirme la puissance thermique transférée au fluide par la plaque absorbante.

Le calcul de rendement thermique, montrent bien l'efficacité du système. Meilleure valeur du rendement pendant la journée était 0,54 %, et la quantité de chaleur produite par le capteur solaire est de 107 watts.

II.6. Test N°2 (30-01-2022)

C'est une journée froide avec un flux solaire maximale qui atteint une valeur de 833.79 W/m² et la température ambiante maximale qui atteint la valeur de 22,61°C. Les données météorologiques de cette journée sont présentées dans le tableau II.4.

Les résultats montrent que la température de l'air sortie du capteur solaire hybride (T_s) augmente progressivement avec l'augmentation du flux solaire. Ceci est dû principalement à l'utilisation de peinture noire qui est couverte l'absorbant. On rappelle que le coefficient d'absorption du corps noir $\alpha = 1$. On constate que la température maximale d'air chaud résulte du capteur solaire hybride plan simple est de 49.718 °C.

Tableau II.4. Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de 0,0082 m³/s.

Temps(hr)	Paramètres météorologiques		Température PVT					DT	η %
	I_o (W/m ²)	T_{amb} (°C)	T_{eair} (°C)	T_{abs} (°C)	T_{cair} (°C)	T_v (°C)	T_{sair} (°C)		
08 :00	9.36	4.66	4.69	5.33	5.46	3.52	5.81	1.11	0
09 :00	149.18	5.36	7.44	20.3	12.9	9.21	11.7	4.27	0.37
10 :00	360.27	8.24	13.66	41.38	27.88	18.65	25.42	11.75	0.42
11 :00	483.79	11.81	17.65	56.58	33.82	28.93	34.52	16.87	0.51
12 :00	621.19	14.92	23.34	72.46	45.41	39.87	45.45	22.1	0.64
13 :00	833.79	17.1	27.37	74.49	51.18	41.89	49.71	22.33	0.6
14 :00	576.49	20.5	28.87	71.59	50.76	42.27	48.07	25	0.61
15 :00	646.25	21.58	29.39	77.54	48.97	47.5	48.13	18.73	0.5
16 :00	419.77	22.19	28.56	62.02	41.85	39.14	40.93	12.36	0.46
17 :00	288.4	22.61	27.04	55.25	37.03	36.23	35.86	8.82	0.35
18 :00	104.49	22.22	23.79	30.2	25.65	25.34	25.35	1.55	0

II.7. Test N°3 (31-01-2022)

Le 31/01/2022 est une journée hivernale a été caractérisée par un flux solaire relativement faible où sa valeur maximale est de 769,16 W/m². Un autre test expérimental a été effectué dans cette journée afin d'évaluer les performances de notre capteur. La température ambiante dans cette journée varie entre 5,19°C et 23,45°C. La température d'absorbeur maximal est 76,29 °C et une différence de température de l'air 13,24 °C. Le coût des différents composants, qui font partie dans la construction de capteur hybride PVT, est donné dans le tableau II.6.

Tableau II.5. Variation horaire de l'intensité solaire et des différentes températures avec un débit volumique de la valeur de 0.016 m³/s.

Temps (hr)	Paramètres météorologiques		Température PVT					DT	η
	I_o W/m ²	T_{amb} (°C)	T_{eair} (°C)	T_{abs} (°C)	T_{cair} (°C)	T_v (°C)	T_{sair} (°C)		
08 :00	8.76	5.19	5.85	7.43	6.42	4.623	6.3	0.45	0
09 :00	148.27	5.95	7.92	18.9	11.82	9.69	10.61	2.69	0.47
10 :00	324.33	9.25	13.31	38.46	21.42	20.07	20.1	6.79	0.54
11 :00	549.61	13.86	18.85	56.28	30.73	29.74	29.54	10.69	0.64
12 :00	687.32	17.33	24.48	69.26	37.76	37.53	37.72	13.24	0.61
13 :00	769.16	19.95	26.87	75.54	41.02	42.25	40.98	14.1	0.64
14 :00	761.61	22.24	28.22	76.29	40.95	44.54	40.45	12.22	0.69
15 :00	583.14	22.81	26.37	64.71	37.71	40.71	36.81	10.43	0.62
16 :00	527.57	23.45	28.23	61.28	37.25	39.03	35.46	7.23	0.56
17 :00	315.58	23.36	26.71	46.62	32.1	33.01	30.69	3.97	0.40
18 :00	96.33	21.84	23.45	28.69	24.89	23.98	24.06	0.6	0.19

Tableau II.6. Estimation des coûts des composants du capteur solaire PVT.

Matériaux	Prix (DA)
Boîtier en bois	6500
Vernis bouteille peinture poignées + peinture	790
Tuyau aluminium	500
Vitre	1500
Tôle galvanisé	2800
Silicone transparent	450
Peinture noire	250

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre on a présenté les différentes étapes suivies de la mise au point de notre capteur solaire hybride Photovoltaïque/Thermique à base d'air. Les performances du capteur solaire PV/T ont été étudiées. Une configuration simple de l'absorbeur a été proposée et une série de tests expérimentaux ont été effectués pour différentes conditions météorologiques.

Les résultats des tests montrent que le rendement du capteur solaire hybride PV/T peut améliorer en variant la vitesse d'air à l'entrée du capteur PVT et changement de la géométrie de l'absorbeur, un autre facteur important influe directement sur le rendement, c'est les conditions météorologiques (Flux solaire, température ambiante).

Chapitre 3

Amélioration des performances du capteur solaire Hybride PV/T

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation d'un capteur solaire hybride PVT avec un absorbeur modifié en utilisant les différents appareils de mesures appropriés. A travers la fabrication de ce prototype, nous nous intéressons à mettre en pratique la recherche expérimentale du capteur solaire hybride. La réalisation du système ainsi que l'ensemble des expériences ont été faites au sein de l'Unité de Recherche en Energie Renouvelables au Milieu Saharien (URERMS) sis à ADRAR. Les caractéristiques suivantes ont été mesurées afin de réaliser une caractérisation de notre capteur solaire :

- ✓ Les températures dans différent endroit dans le capteur solaire, y compris l'entrée et la sortie du fluide de travail, la vitre, l'absorbeur et l'isolation, ainsi que température du panneau PV,
- ✓ Le débit volumique du fluide caloporteur,
- ✓ Les paramètres météorologiques caractérisant la journée de test ; flux solaire et température ambiante.

Plusieurs techniques sont utilisées pour améliorer les performances thermiques des capteurs solaires plans, notamment la sélection rigoureuse des formes et des caractéristiques de conception appropriées (géométriques, thermo-physiques et optiques). Tels que l'épaisseur du canal, l'épaisseur de la lame d'air fluide, la longueur et la largeur du capteur, l'épaisseur de l'isolant (pour une bonne calorifugation), le choix d'un matériau absorbant sélectif ou non sélectif, le simple et le double vitrage, avec de nombreuses couvertures en verre, polycarbonate ou film plastique etc.).

Les applications thermiques de l'énergie solaire, telles que le séchage des produits agroalimentaires et le chauffage des habitations exigent des capteurs qui ont des rendements élevés. Cette performance peut être atteinte en optimisant d'une part, les coefficients de transfert convectifs entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur et d'autre part, en réduisant les pertes thermiques à travers les différents composants du capteur solaire.

Le but de ce chapitre est de contribuer en majeure partie à l'amélioration des performances de notre capteur solaire hybride (PVT), en introduisant dans la lame d'air de l'absorbeur des obstacles en bois minces dites chicanes. Les résultats obtenus de l'étude expérimentale vont analyser et interpréter.

III.2. Rappels sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de calculer la quantité totale d'énergie qu'un système a besoin d'échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique

(ou thermocinétique) vise à caractériser quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des paramètres caractéristiques du système, notamment la température, entre les états d'équilibre initial et final.

Dans un capteur solaire hybride on distingue trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) présenté dans la figure III.1. Le transfert de chaleur par conduction s'effectue dans notre système d'étude dans les matériels solides par contact direct entre le produit et la paroi chauffée. La conduction est la transmission de la chaleur dans le matériel par vibration moléculaire. Cet échange peut être trouvé dans les éléments suivants :

- Les cellules PV et la couche de Tedlar (capteur hybride).
- Les faces supérieures et inférieures de la vitre.
- Les faces supérieures et inférieures de l'isolant.
- L'absorbeur et l'isolant.

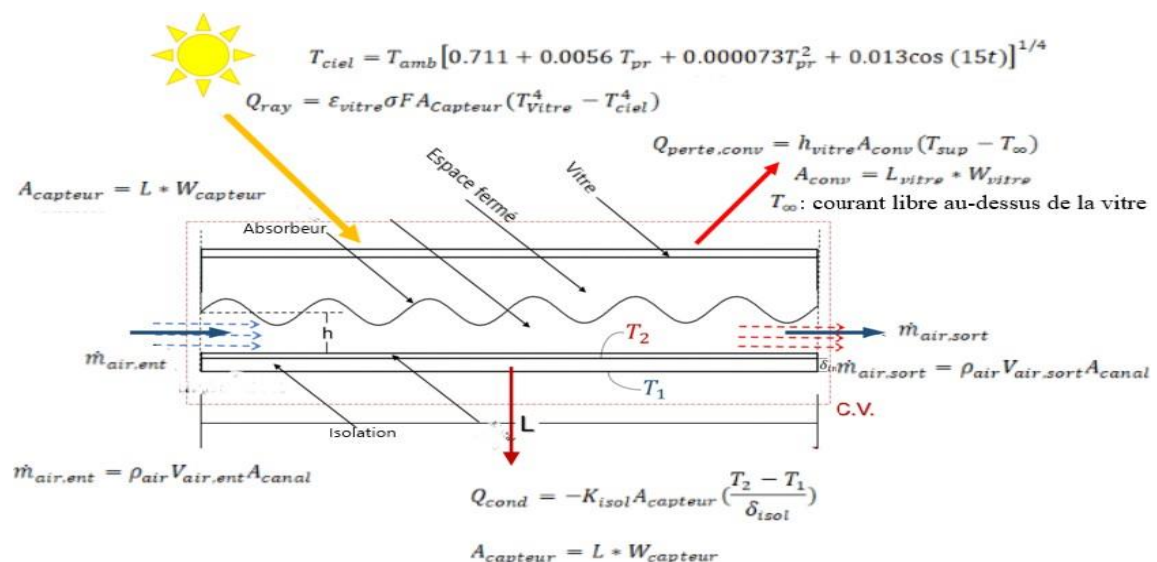


Figure.III.1 : Les modes de transfert de chaleur dans un capteur solaire.

Avec : T_{pr} Température de saturation

On trouve aussi le transfert de chaleur par convection qui s'effectue à :

- L'extérieur du capteur : entre le vitrage et l'isolant avec le milieu ambiant.
- L'intérieur du capteur : entre l'air avec la vitre et l'air avec la plaque métallique.

Le transfert de chaleur par rayonnement qu'est au niveau de vitrage et aussi entre la vitre et l'absorbeur (au niveau de passage d'air). Ce mode de transfert se produit par l'intermédiaire de

l'émission et de l'absorption électromagnétique entre les corps des différentes températures et se nomme rayonnement thermique. Il n'exige d'aucun milieu pour se propager. [49,50]

III.2.1. Transfert de chaleur par conduction

C'est la propagation de la chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. Le transfert de chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue par deux mécanismes différents : la transmission par les atomes ou les molécules vibrantes et la transmission par les électrons libres. La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température. En absence d'hypothèses simplificatrices, la propagation de la chaleur est un phénomène tridimensionnel qui répond à la loi correspondant à ce processus de diffusion thermique qu'est la loi de Fourier donnée par la relation [52] :

$$\varphi = -k \times A \times \text{grad } T \quad (1)$$

φ Est flux de chaleur (W).

A Est surface d'échange (m^2).

k Est coefficient de conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

On va étudier le transfert de chaleur par conduction dans un milieu solide homogène de surface A_i et isotrope, caractérisé par sa conductivité thermique λ_i et son épaisseur e_i , ce milieu est traversé par un flux de chaleur Q_i et dont les deux faces sont portées à des températures T_i et T_j (respectivement).

$$\text{Alors d'après la loi de Fourier : } Q_i = h_{(cond,i)} \times A_i \times (T_i - T_j) \quad (2)$$

$h_{(cond,i)}$: Coefficient d'échange par conduction à travers le milieu « i ».

$$\text{Et : } h_{cond,} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (3)$$

Dans le cas de deux couches voisines i et j, le coefficient d'échange thermique par conduction est calculé à travers l'expression de Chow :

$$h_{(cond,i-j)} = \frac{1}{\left(\frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{e_j}{\lambda_j}\right)} \quad (4)$$

III.2.2. Transfert de chaleur par convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques [53]. Les transferts de chaleur qui s'effectuent simultanément avec des transferts de masse sont dits transferts de chaleur par convection. Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides. On exprime le flux thermique échangé par convection par la loi de Newton [53] :

$$\varphi = h_{conv} \times S \times (T_p - T_f) \quad (5)$$

φ : Le flux échangé par convection.

h_{conv} : Est appelée coefficient d'échange par convection. (W. m⁻². °C⁻¹).

$(T_p - T_f)$: Différence entre la température de la paroi et celle du fluide.

S : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m²).

T_p : Température de la paroi solide.

T_f : Température du fluide.

III.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

Lorsqu'il n'y a pas de support solide, liquide ou gazeux au-delà de l'atmosphère terrestre, la chaleur du soleil atteint pourtant notre planète. Ceci signifie donc que l'énergie thermique peut tout de même traverser le vide. Ce mode de transfert s'appelle le rayonnement. Il correspond à un flux d'ondes électromagnétiques émises par tout corps, quelle que soit sa température. Seuls les milieux transparents (gaz, verre, vide) ou semi-opaques (gaz + fumées de CO₂, gaz + vapeur d'eau) émettent un rayonnement. C'est le transfert d'énergie sur une longue distance entre deux corps séparés par un milieu matériel ou non (transformation de l'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie que nous recevons du soleil. La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [54] :

$$\varphi = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (6)$$

φ : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,670.10^{-8} \text{ W.m}^{-2}.\text{K}^{-4}$

T : Température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

III.3. Approche théorique et évaluation des performances thermiques

Un concept fondamental pour l'analyse thermique de tout système thermique est la conservation de l'énergie, qui peut être analysée par le calcul d'un bilan énergétique dans des conditions d'équilibre. À l'état stable, la production d'énergie utile du capteur solaire est la différence entre le rayonnement solaire absorbé et les pertes thermiques totales du capteur solaire :

$$\text{Énergie utile} = \text{Énergie solaire absorbée} - \text{Pertes thermiques}$$

Évidemment, plus la production d'énergie utile d'une conception particulière est élevée, plus l'efficacité attendue est élevée. L'efficacité thermique d'un capteur est un paramètre important dans ce type d'analyse car elle crée la base pour la comparaison de différents matériaux et les modifications des systèmes capteurs solaires. Beaucoup analyses théoriques présentés dans la littérature pour évaluer le rendement.

La quantité de rayonnement solaire reçue par le capteur est donnée par :

$$Q = G.A \quad (7)$$

Avec G [W/m^2] l'intensité du rayonnement solaire, A [m^2] la surface de capteur.

Alors la puissance incidente Q_i qui atteint l'absorbeur est le produit de la vitesse de transmission de vitrage par la vitesse de l'absorbeur :

$$Q_i = G.A.r\alpha \quad (8)$$

Avec τ : transmissivité du verre et α : capacité d'absorption de l'absorbeur

Le taux de pertes de chaleur Q_0 dépend du coefficient de transfert de chaleur global du collecteur U_L et de la température du capteur :

$$Q_0 = U_L.A.(T_c - T_{amb}) \quad (9)$$

Ainsi le taux d'énergie utile extraite par le collecteur Q_u peut être exprimé comme suit :

$$Q_u = Q_i - Q_0$$

$$Q_u = A.[G.r\alpha - U_L.(T_c - T_{amb})] \quad (10)$$

Il est également connu que le taux d'extraction de chaleur du capteur peut être mesuré au moyen de la quantité de chaleur emportée dans le fluide qui le traverse, comme indiqué [38]:

$$Q_u = q \cdot (T_s - T_e) \quad (11)$$

Avec : T_s : température de sortie du capteur, T_e : température de d'entrée du capteur.

Si $T_s = T_e$ dans l'équation (10) dans ce cas on considère que la température totale de la surface du capteur devient égale à la température du fluide d'entrée.

Nous pouvons définir une quantité qui est connue sous le nom de facteur d'évacuation de la chaleur du capteur F_r , elle s'exprime par :

$$F_r = q \cdot C_p(T_s - T_e)/A \cdot [G \cdot r\alpha - U_L \cdot (T_c - T_{amb})] \quad (12)$$

Le gain d'énergie utile réel Q_u est trouvé par :

$$Q_u = F_r \cdot A \cdot [G \cdot r\alpha - U_L \cdot (T_e - T_{amb})] \quad (13)$$

Cette équation est utilisée pour mesurer le gain d'énergie du capteur, il est généralement connu par 'Hottel-willier-Bliss equation' [38].

Le rendement thermique [35] instantané du capteur est :

$$\begin{aligned} \eta_{th} &= \frac{Q_u}{A \cdot G} = \frac{F_r \cdot A \cdot [G \cdot r\alpha - U_L \cdot (T_e - T_{amb})]}{A \cdot G} \\ &= -F_r(T_e - T_{amb})/G + F_r r\alpha \end{aligned} \quad (14)$$

Si l'on suppose que pour F_r , U_L , α sont des constantes à un capteur et débit donnés, alors le rendement devient une fonction linéaire des trois paramètres définissant les conditions de fonctionnement : rayonnement solaire (G), température d'entrée du fluide (T_e) et température de l'air ambiant (T_{amb}).

L'efficacité thermique peut également être exprimée comme le gain de chaleur du fluide de travail entre la sortie et l'entrée divisé par le rayonnement solaire incident [55].

III.4. Etude experimeptale

Les chicanes sont des obstacles de faibles épaisseurs comparativement à ces hauteurs; elles sont insérées au niveau des dispositifs de transfert de chaleur en vue d'augmenter le transfert de chaleur, en prolongeant le parcours de fluide caloporteur pour exploiter la plus grande surface d'échange thermique possible [56], comme il est indiqué par la figure suivante :

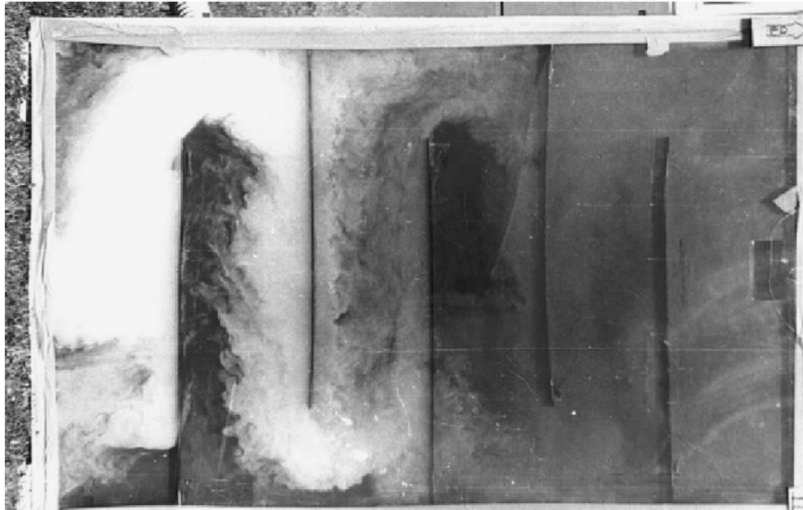


Figure III.2 : Visualisation de l'écoulement de l'air dans un capteur solaire à air muni de chicanes transversales.[56]

D'après la littérature l'introduction de ces obstacles dans le parcours offert au fluide caloporteur permet l'augmentation de l'échange thermique avec l'absorbeur. Il a été établi que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important, et par conséquent, les performances thermiques sont nettement améliorés [56][57].

Jianjun Hu et al. [58] ont fait une étude numérique validée par une autre étude expérimentale, leur objectif est de montrer l'effet des chicanes rectangulaires sur les performances thermiques d'un capteur solaire plan à air comme indiqué sur la figure III .3.

Ils ont constaté que l'introduction des chicanes dans la veine d'air mobile prolonge le parcours de l'air et modifie sa trajectoire afin d'augmenter le temps de séjour de l'air dans le capteur, réduire les zones mortes et renforcer la perturbation interne, ce qui améliore le transfert de chaleur entre l'air et la plaque absorbante. Pour un régime laminaire de l'écoulement de l'air dans le conduit utile d'un capteur solaire à air, ayant un rapport d'aspect de 6, Ebru Kavak Akpınar et al. [59] et [60], ont examiné expérimentalement l'effet de l'adjonction de trois types de chicanes dont la configuration et la géométrie de disposition sont présentées d'après la figure III.4.

L'étude comparative entre quatre types a été faite, les résultats obtenus pour un nombre de Reynolds de 700 et de 1000, montre que l'utilisation de la configuration type (Feuille : 5x5 cm) donne de meilleures performances thermiques.



Figure III.3 : Photographie d'un capteur solaire à air [58].

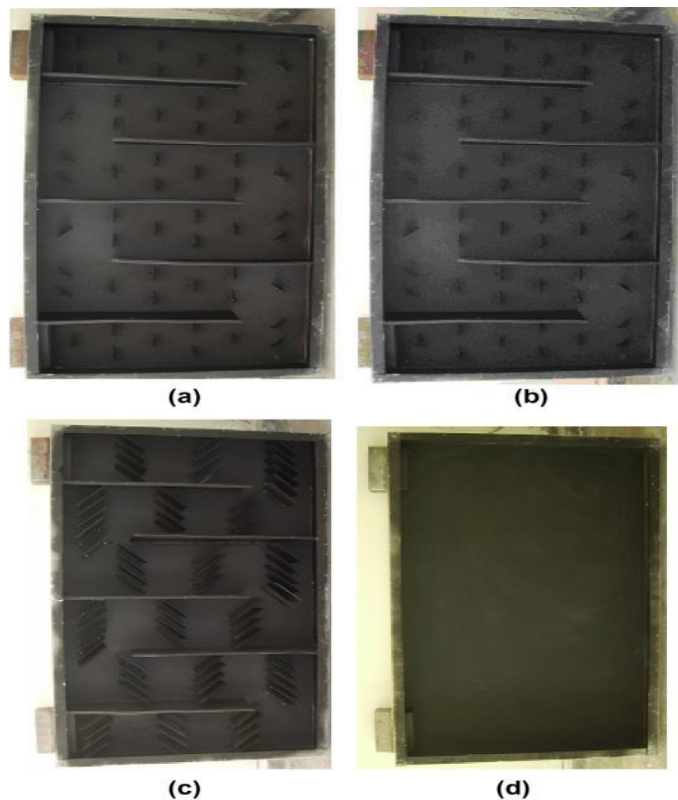


Figure III.4 : Photographique des chicane étudiées [59][60].

L'insertion d'obstacles dans le flux d'air dynamique nécessite une sélection rigoureuse du mode de fixation ; ils peuvent être posés sur l'isolant, sous l'absorbeur ou une combinaison des deux. Du fait que la surface totale d'échange thermique impliquée est augmentée et que la

section de passage donnée devant le passage de fluide est ainsi abaissée, les performances thermiques sont fortement améliorées dans tous les cas. [61]

Dans ce cas le rôle de ces chicanes à un double aspect favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- ✓ Elles permettent de rendre l'écoulement turbulent à proximité de la plaque chaude,
- ✓ Et prolongent le parcours du fluide caloporteur.

III.4.1. Description du capteur hybride PVT à air modifié

La figure III.5 montre un schéma descriptif du montage expérimental proposé pour évaluer les performances thermiques du capteur solaire PVT modifié par l'intégration des obstacles (chicanes) dans un absorbeur simple.

L'absorbeur à chicanes est représenté dans la figure III.5. Il se compose de 08 chicanes de (15 cm * 1,5 cm * 1cm) de forme rectangulaire posés avec un espace de de 10 cm entre chaque une ; colées sur une tôle rectangulaire galvanisée de 0.424 m² (1.06 cm*0.4 cm) de surface et de 0.5 mm d'épaisseur, peinte en noir mat pour augmenter l'absorption des rayons solaires.

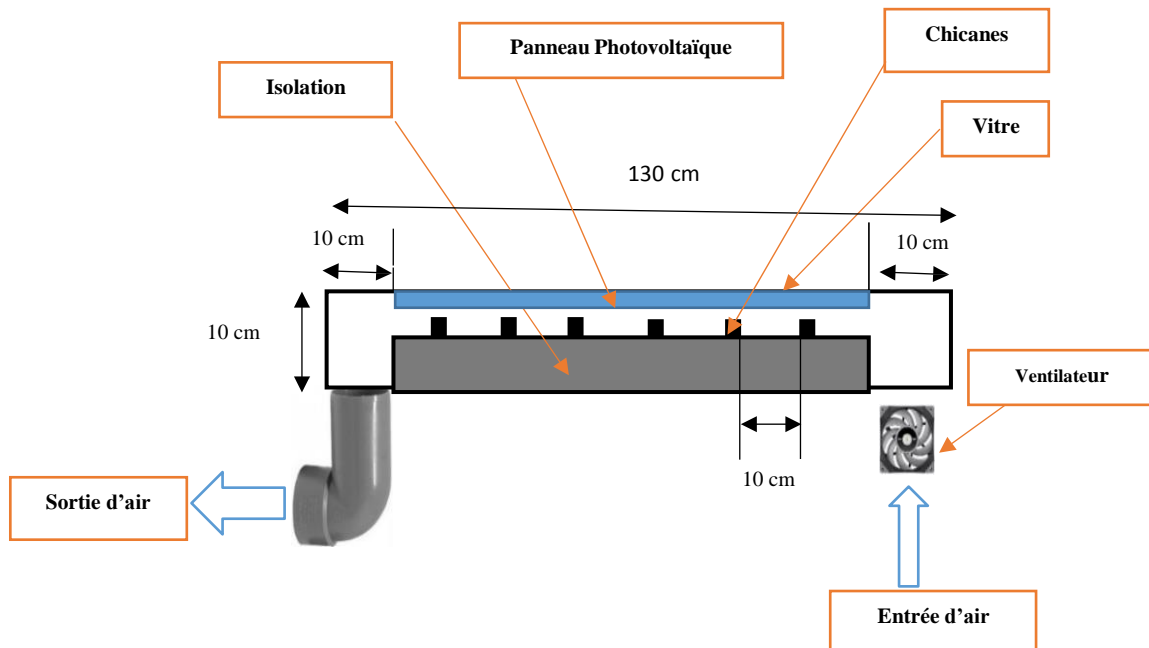


Figure III.5 : Schéma descriptifs de capteur solaire hybride a absorbeur modifié.

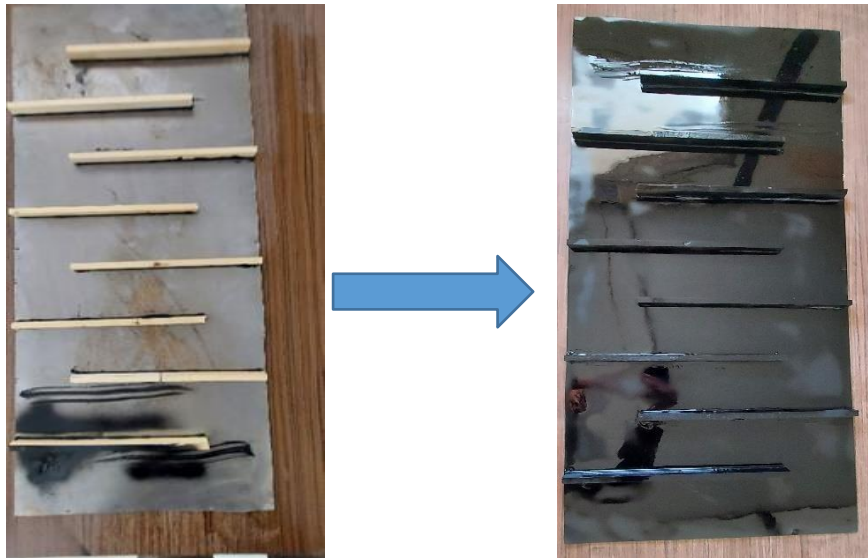


Figure III.6. Photographie de l'absorbeur avec chicane.

Dans le but d'évaluer les performances thermiques et électrique du capteur solaire hybride Photovoltaïque/Thermique (PVT), une étude expérimentale a été faite. Ces tests expérimentaux ont été effectués pendant trois jours successive à Mars, à l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS), Adrar-Algérie, (Latitude : $27^{\circ}8'N$, Longitude : $-0^{\circ}17'E$ and Altitude : 279 m).

Les trois tests expérimentaux présentés dans ce chapitre concernent trois jours typiques du 03, 04 et 05 Mars 2022. Les paramètres météorologiques décrivant les conditions météorologiques des trois journées de test, à savoir : l'irradiation solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, sont présentés respectivement ci-dessous.

La figure III.7 représente une photographie du dispositif expérimental proposé pour l'étude expérimentale de capteur hybride PV/T modifié. Le système se compose de deux parties essentielles : le capteur solaire thermique avec des chicanes, et la deuxième est une partie très importante c'est la partie électrique représenté par le panneau photovoltaïque PV de type UDTS-50 monocristallin pour alimenter deux ventilateurs (DC) ; une pour évacuer l'air au-dessus du capteur solaire thermique entre l'absorbeur et la vitre et l'autre pour évacuer l'air au-dessous du panneau photovoltaïque et le refroidir par l'extraction de la chaleur provienne des cellules afin d'améliorée son rendement électrique. Ce panneau PV permet au système PVT de fonctionner en mode autonome. Afin de mesurer la température de l'air sortant du capteur solaire thermique et de module PV, un thermocouple de type-K (Ni-Cr) est placé à la sortie du capteur solaire, et un autre collé à la face arrière du panneau PV.



Figure III.7 : Photographie du dispositif expérimental du de capteur hybride PV/T modifié.

Le capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T utilisé dans cette étude est avec les mêmes dimensions que le capteurs étudié au chapitre II :

Longueur 130 cm

Largeur 73 cm

Epaisseur 10 cm

Le capteur solaire hybride est placé sur un support métallique incliné à 27° et orienté vers le nord-sud afin de recevoir le maximum de l'irradiation solaire pendant les journées de tests.

III.4.2. Les paramètres et les caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Le modulé photovoltaïque utilisé dans cette étude est un panneau monocristallin de type UDTS-50 dans les conditions STC ($AM=1.5$, $G=1000W/m^2$ et $T_c=25^\circ C$) de parametres cité dans le tableau III.1.

Les modules photovoltaïques au silicium monocristallin de type UDTS-50 sont des modules fabriqués en Algérie, au sein l'Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS) [62].

Le module solaire UDTS-50 est composé de 36 cellules solaires carrées au silicium monocristallin, de 10 cm de côté, connectées en série. Les cellules de ce module, laminées et dotées d'un revêtement antireflet, sont enrobées dans l'EVA qui permet la dilatation thermique.

Tableau III.1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

Paramètres	Valeur
Nombre des cellules PV, N_c	12*3
Le courant de court-circuit $,_{c,ref}$	3.18 A
La tension de circuit ouvert $,_{o,ref}$	21.6 V
Le courant de MPP $,_{p,ref}$	2.9 A
Le rendement électrique $,_{ef}$	12%
Le facteur de forme $,_{ref}$	70.8%
Le courant de saturation de la diode $,_0$	$5.021 * 10^{-8}$ A
L'énergie de gap $,_{ap}$	1.2 eV
Le facteur d'idéalité, γ	1.2
La résistance série $,_s$	0.25 Ω
La résistance parallèle $,_h$	198.1 Ω
Le facteur d'idéalité modifié, a	1.016 J/C
La puissance crête, $P_{m,f}$	50 W

III.5. Resultats et discussion

Trois jours typiques, couvrant une saison à Mars 2022, ont été sélectionnés et présentés dans le cadre de cette étude. Les principaux paramètres météorologiques caractérisant les jours d'essai, à savoir : l'irradiation solaire, la température ambiante, sont illustrés dans les figures III.8-III.9, respectivement.

La variance des conditions météorologiques entre les jours d'essai n'est pas importante tant que ces jours sont successifs d'après les profils d'irradiation solaire et la température ambiante enregistrés.

Le premier essai est représenté par la journée du 03/03/2022 qui est marquée des températures ambiantes comprises entre 7.95 °C et 24.11 °C et par une intensité de l'irradiation solaire (de 0 à 961.53 W/m²), relativement aux autres journées d'essais.

Pour l'essai du (04/03/2022), l'irradiation solaire maximum a atteint 948.84 W/m² et la température ambiante était modérée et comprise entre 9.3 et 29.68 °C. Pareil pour la journée d'essai (05/03/2022), le temps était un peu froid, marqué par des températures ambiantes atteignant 29.11°C avec un irradiation solaire très élevé qui dépasse les 918.34 W/m².

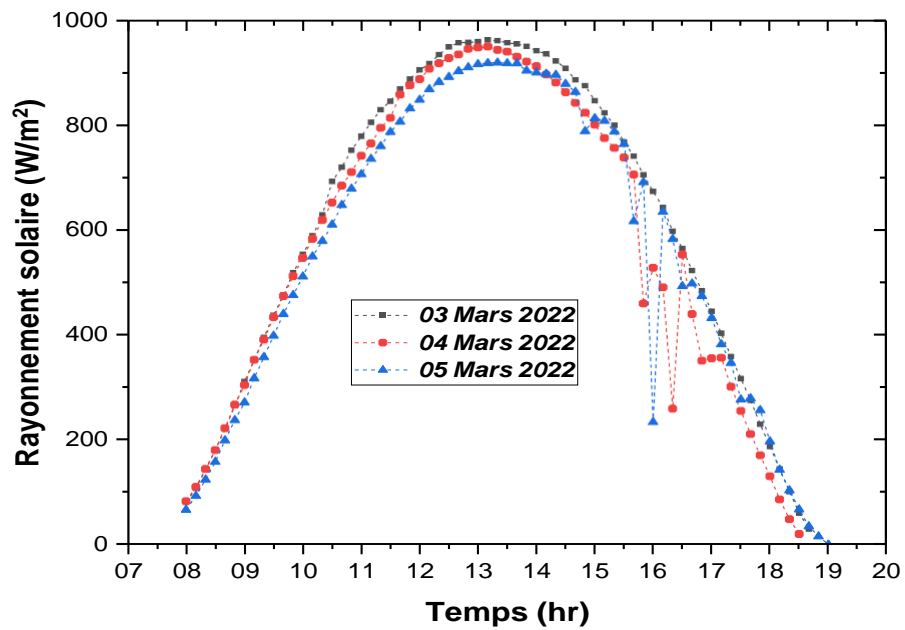


Figure III.8: Variation de l'irradiation solaire pendant les jours de tests.

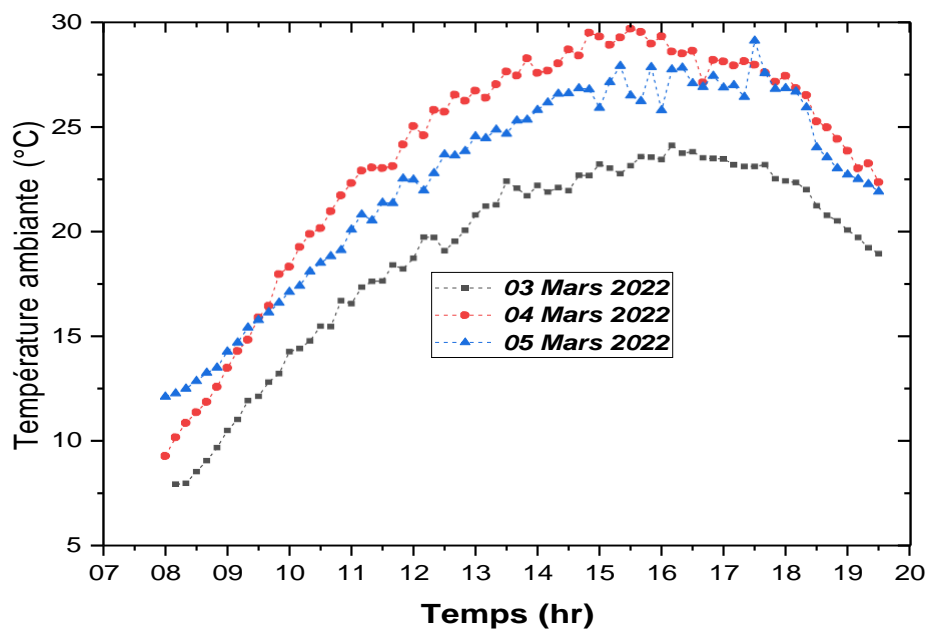


Figure III.9: Variation de la température ambiante pendant les jours de tests.

III.5.1 Analyse du comportement thermique du capteur solaire hybride PVT

Le capteur hybride PVT et le module photovoltaïque inclinés avec angle et égale à l'attitude d'Adrar et orienté vers le sud (27°). Les données expérimentales présentées dans cette

section décrivent le comportement thermique du capteur solaire. Les principales températures décrivant le comportement thermique des différentes parties du capteur solaire entrée air ($T_{ent-air}$), l'absorbeur (T_b), air entre la vitre et l'absorbeur ($T_{cent-air}$), la vitre (T_v), la température de sortie de l'air ($T_{sort-air}$) et la température ambiante pour les trois jours de tests pour différents débits massiques, sont illustrés dans la figure III.10.

D'après les figures on remarque que les profils de températures montrent clairement l'effet des conditions météorologiques sur le comportement thermique du capteur solaire pendant les jours d'essai. Il est clair aussi que le profil des températures pour du capteur solaire est généralement proportionnel au profil d'irradiation solaire.

La température maximale de l'absorbeur enregistrée correspond au trois vitesse d'air, pour les trois tests est de : 91.03°C ($V_{air}=1.3\text{ m/s}$), 98.93 ($V_{air}=2.3\text{ m/s}$) et 59.78°C ($V_{air}=3.6\text{ m/s}$), respectivement. La comparaison montre qu'il n'y a pas une différence significative de la température de l'absorbeur pour les deux tests correspond au 03 et 04 Mars 2022 alors pour le test du 05 Mars, on observe une différence de plus 30°C par rapport à la température d'air d'entrée. Lorsqu'on compare la température de la vitre. Les résultats montrent que les températures de la vitre sont 53.01 ($V_{air}=1.3\text{ m/s}$), 63.93 ($V_{air}=1.3\text{ m/s}$) et 40.6°C ($V_{air}=1.3\text{ m/s}$), respectivement, cette augmentation est expliquée par l'effet de transfert par rayonnement qui s'effectué entre la vitre et le ciel et aussi entre la vitre et la plaque absorbante car ces corps ont différentes températures, alors ce mode de transfert qui passe dans eux se produit par l'intermédiaire de l'émission et l'absorption électromagnétique.

Les températures d'entrée d'air au centre du capteur et à la sortie du capteur sont présentées dans les mêmes figures, On constate que ces températures augmentent progressivement avec l'augmentation du flux solaire. La figure III.11 montre la variation de différence de température d'entrée d'air et sortie d'air.

Pour le test de 03 Mars 2022 une différence de température maximale a été enregistré à 13h20 est 10.48°C , est 12.26°C enregistré le 04 Mars 2022, pour le troisième jour une différence de température enregistré égale à 17.91°C . Cette augmentation est due à l'augmentation de la température de plaque métallique (absorbeur) lorsque l'air circule à travers l'absorbeur, un échange convectif crée entre cette plaque et l'air, l'air prend la chaleur générée par plaque qui augmente sa température.

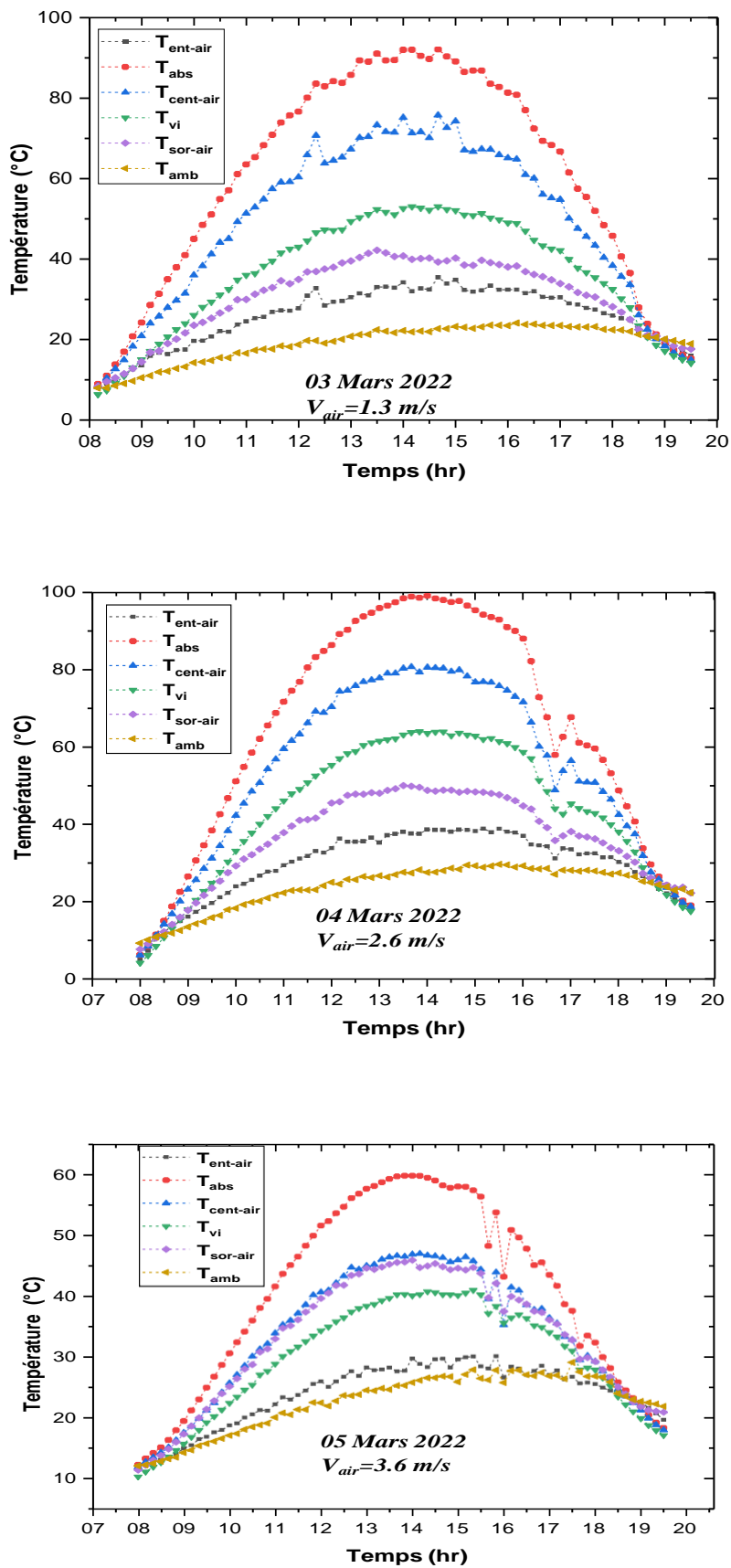


Figure III.10: Variation des températures du capteur solaire PVT.

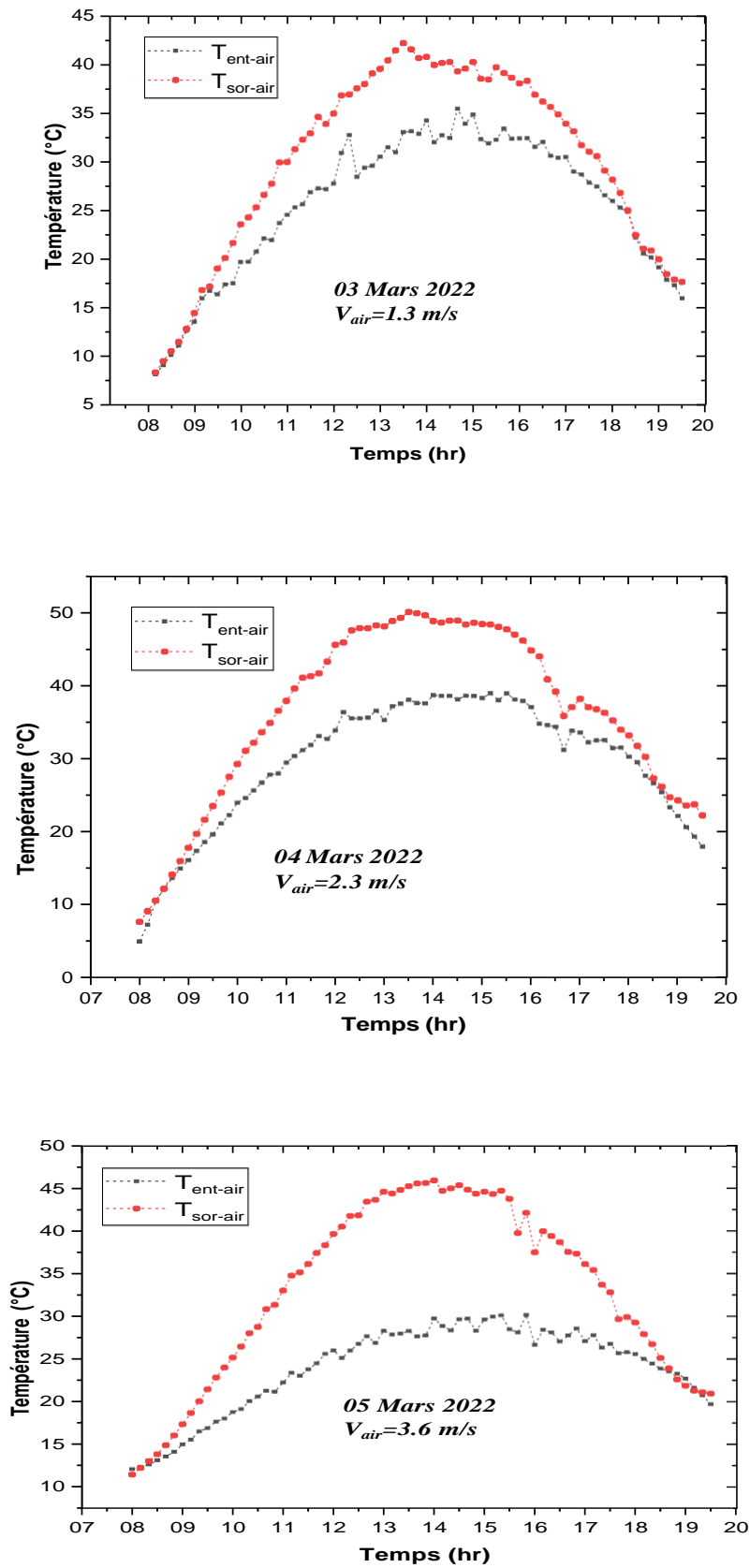


Figure III.11 : Différence de température d'air entre l'entrée du capteur et la sortie

Les figures III.12 représente la variation du flux solaire et la quantité de chaleur utile du capteur hybride photovoltaïque thermique en fonction de temps de trois jours de tests. On remarque que la quantité de chaleur utile fournie par le capteur augmente progressivement lorsque l'irradiation solaire augmente est atteindre une valeur maximale de 260,17 W à 13h00 pour le test de 04/03/2022, pour le test du 05 Mars 2022 une quantité de chaleur utile atteinte égale à 504.44 Watt.

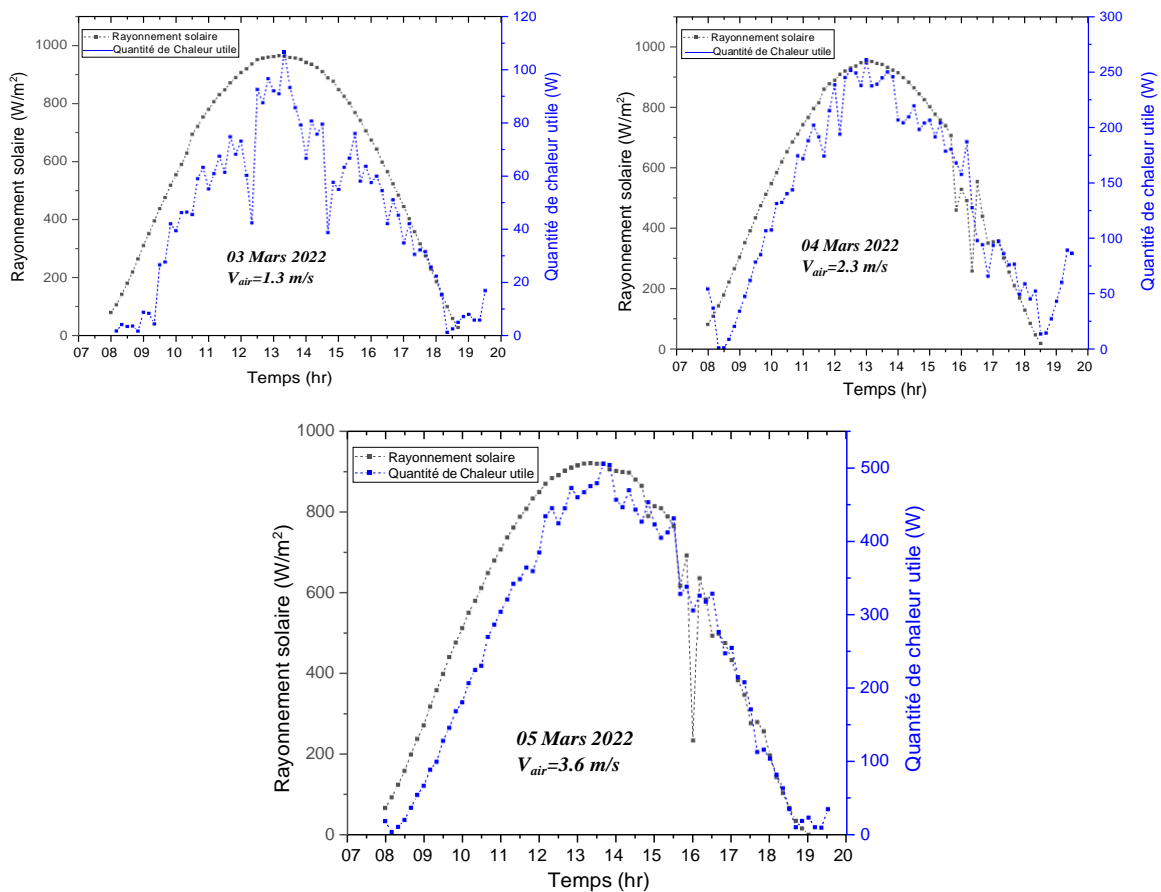


Figure III.12 : La variation d'intensité solaire et de la quantité de chaleur utile.

Le rendement thermique (η_{th}) est défini par le rapport de la quantité de chaleur utile par le du capteur solaire thermique sur la quantité d'énergie globale incidente par mètre carré sur la surface du capteur solaire). Elle est donnée par l'équation (III.14) selon la référence [35].

La variation du rendement thermique du capteur solaire PVT, pour les trois tests du 03, 04, 05 Mars 2022, est illustrée sur la figure III.13. Il est clair que le rendement thermique du système est plus important lorsque l'intensité du flux solaire est élevée. Le calcul montre que le rendement thermique maximum du capteur solaire hybride PV/T (03/03/2022) est de 26.19% pour un débit massique de 0.01013 kg/s. Pour la journée du 04/03/2022 le capteur solaire atteint un rendement thermique maximal de 62.73 % pour un débit massique égal à

0.02025 kg/s, alors que pour le test du 05 Mars 2022 le rendement est 87.27 pour un débit massique égale à 0.02804 Kg/s.

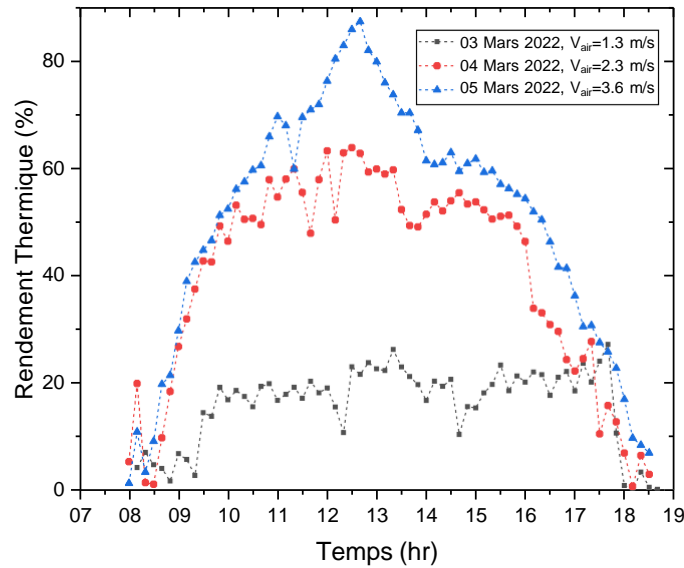


Figure III.13 : Variation du rendement Thermique.

III.5.2. Performances électriques

Dans un système photovoltaïque lorsque le rayonnement solaire augmente, la puissance des panneaux photovoltaïques augmente. D'autre part les panneaux photovoltaïques perdent leur efficacité lorsqu'ils la température ambiante augmente. Dans ce cas, l'évacuation de la chaleur des panneaux photovoltaïques est indispensable. L'air passant sous les panneaux PV réduit la température de fonctionnement des panneaux PV et augmente leur puissance électrique. Lorsque l'air passe sous le panneau photovoltaïque, sa température augmente en raison de l'absorption de la chaleur des panneaux, ce qui entraîne une augmentation de l'efficacité thermique du système hybride PV/T.

Lors des tests, les sorties électriques (courant I_m et tension V_m) du module PV connecté au ventilateur ont été mesurées. L'efficacité électrique dépend principalement du rayonnement solaire entrant et de la température du module PV. Il est calculé avec l'équation suivante [21] :

$$\eta_{ele} = I_m \cdot V_m / S_{pv} \cdot G \quad (15)$$

La figure III.14 présente la variation du rendement électrique pour les trois jours de test. D'après les graphes on constate que le rendement au début de la journée augmente légèrement et diminue avec l'augmentation de rayonnement solaire pour les trois vitesses d'air (1.3, 2.3 et 3.6, m/s).

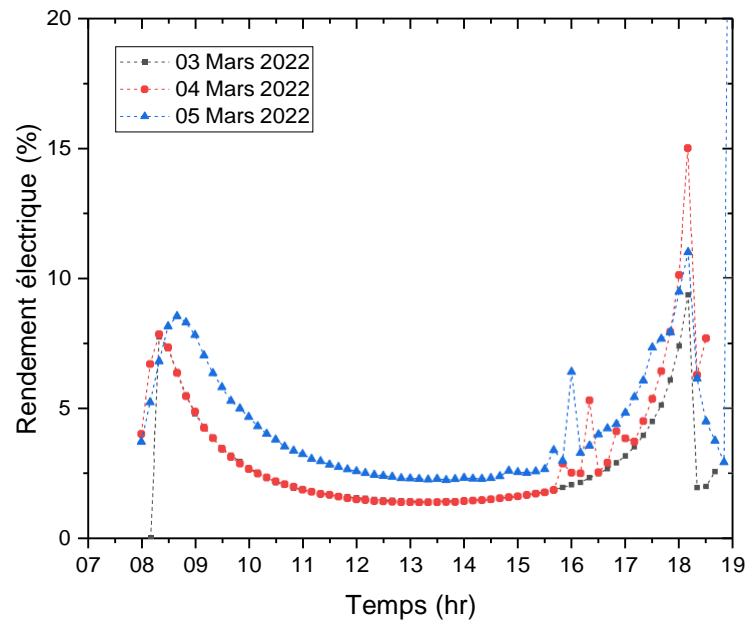


Figure III.14 : Variation de rendement électrique.

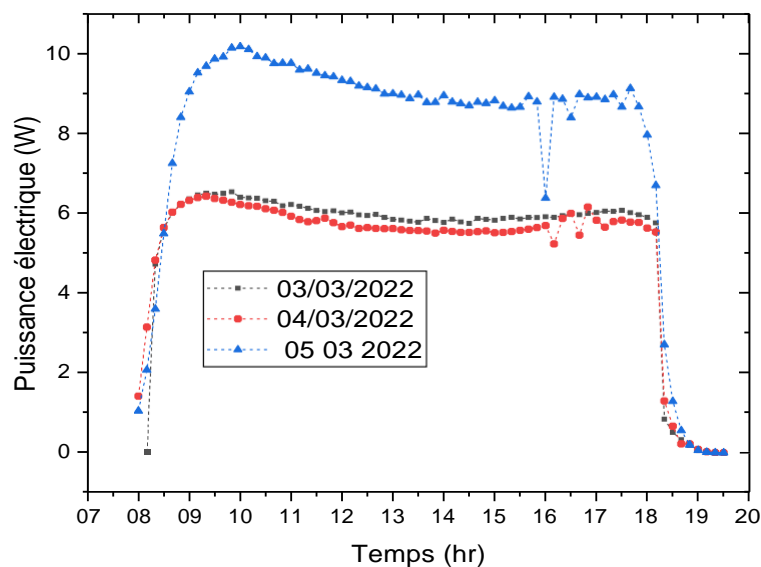


Figure III.15 : Variation de la puissance électrique.

L'évolution de la puissance électrique pour les trois tests (03-04-05 mars 2022) est illustrée dans la figure III.15. D'après la figure la puissance électrique des trois jours de test augmente au début de la matinée jusqu'à atteindre une valeur maximale, et par la suite avec l'augmentation de rayonnement solaire ; une légère diminution jusqu'à qu'elle se stabilise à des valeurs constantes, à la fin de la journée le rendement électrique diminue.

Deux autres tests ont été effectués afin de mesurer la température du panneau, avec et sans ventilation, ces deux jours presque ont les mêmes conditions météorologiques avec un flux maximal égale à 1042 W/m^2 pour la journée du 25 Mars 2022 et une température ambiante

maximale égale à 31.14 °C ; 1048.79 W/m² et 33.57°C pour le journée du 26 Mars 2022, le premier jour du test, le ventilateur de refroidissement du panneau est en arrêt, d’après la figure III.16 la température du panneau atteint une valeur maximal égale à 70.28 °C alors que pour le test du 26 Mars 2022 le ventilateur est en mode de fonctionnement la température du panneau photovoltaïque maximale était 61.16°C, ceci montre bien l’avantage d’intégration d’un ventilateur au-dessous de panneau photovoltaïque.

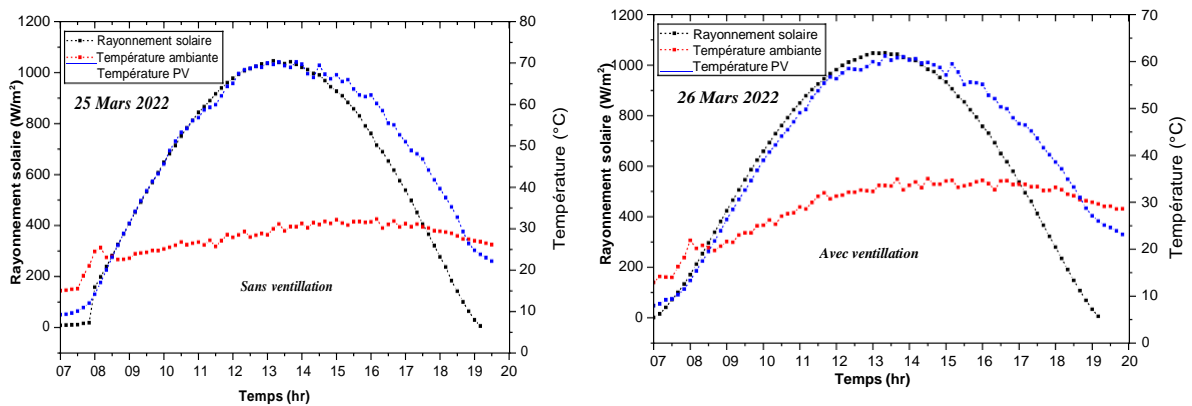


Figure III.16 : Variation de la température du panneau PV.

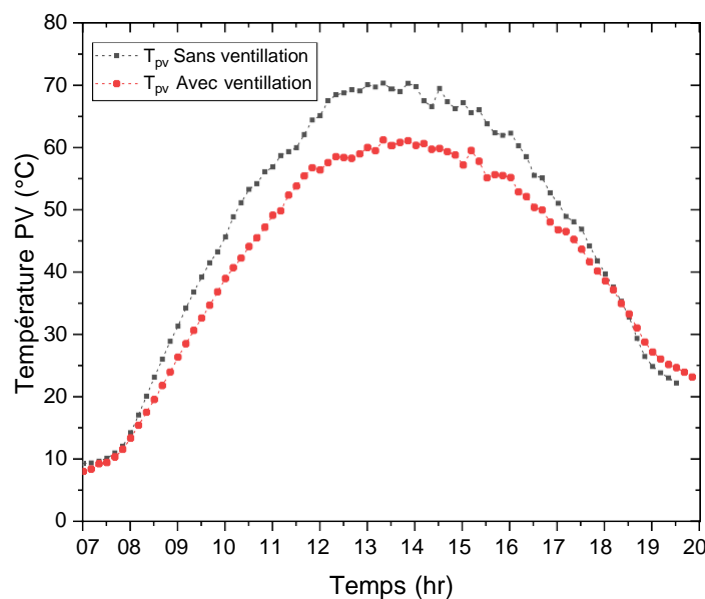


Figure III.17 : Variation de différence de température du panneau PV.

III.5.3. Caractérisation outdoor de modules UDTS-50

La mesure sur place des caractéristiques I-V d’un module photovoltaïque est un moyen de valeur diagnostique et une clé importante pour identifier sa qualité (modules faibles, défauts possibles, dégradation, ...) [58]. Les caractéristiques électriques les plus importantes pour un module photovoltaïque sont les courbes I-V et P-V, le courant de court-circuit I_{cc} , la tension

de circuit ouvert V_{co} , la puissance au point de puissance maximale P_{max} , le facteur de forme FF en fonction de l'ensoleillement et de la température du module photovoltaïque [59].

Les essais de caractérisation extérieure du module photovoltaïque ont été réalisés sur le banc expérimental (figure III.26). Il se compose principalement d'un module photovoltaïque de type UDTS-50 et d'un traceur de courbe de type EKO MP-160 avec charge électronique. L'irradiation solaire incidente est mesurée à l'aide d'un pyranomètre Kipp&Zonen type CM 11 monté dans le même plan que le module. La température de la cellule est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K fixé à l'arrière du module. Le traceur de courbes enregistre ces paramètres et les envoie à un micro-ordinateur pour stockées dans des fichiers data. [60].



Figure III.18 : Banc expérimental pour la caractérisation de PV

La centrale d'acquisition est pilotée par son propre logiciel MP-160, il permet de convertir les données automatiquement en STC, en injectant les paramètres de translation comme (A , β ...) qui doivent être appliqués pour tous les points de la caractéristique I-V. Les courbes I-V sont relevées par une charge électronique qui permet de balayer toute la caractéristique électrique du module [61]. Un ordinateur, sur lequel est installé le logiciel MP-160 est relié à la centrale d'acquisition pour permettre la collecte, le stockage et le traitement des données mesurées par la plateforme. La (figure III.27) donne les caractéristiques courant-tension I-V et puissance du module photovoltaïque UDTS-50 pour un éclairement et une température donnés affiché par le traceur MP-160.

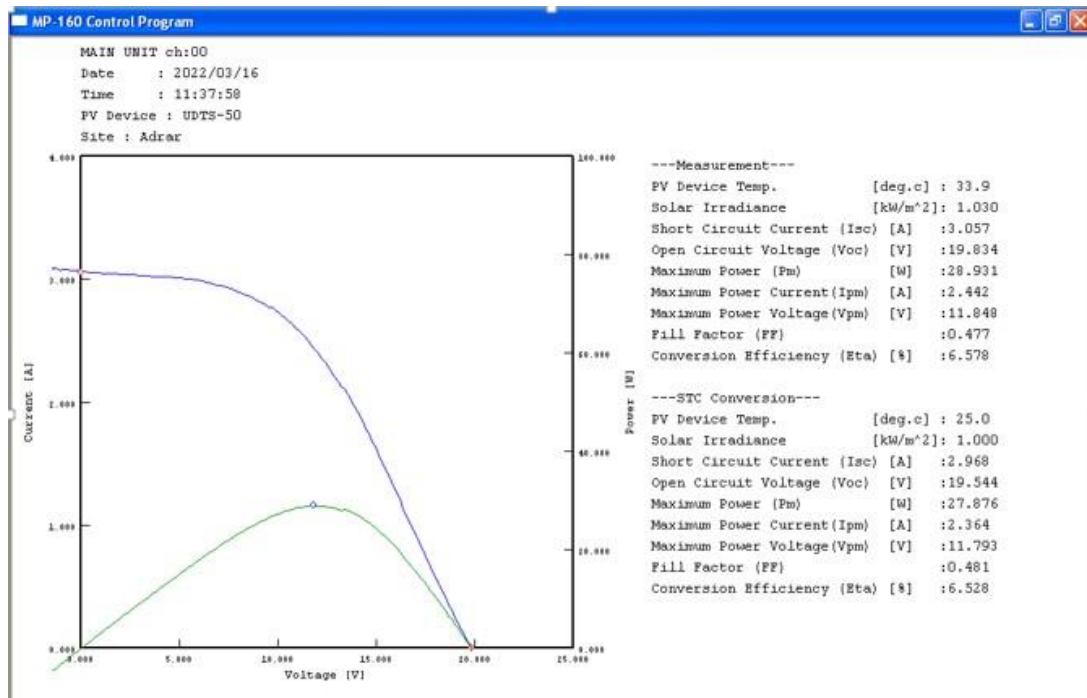


Figure III.19 : Résultats des caractéristiques courant-tension I-V et puissance du PV UDT5-50 affiché par le traceur MP-160.

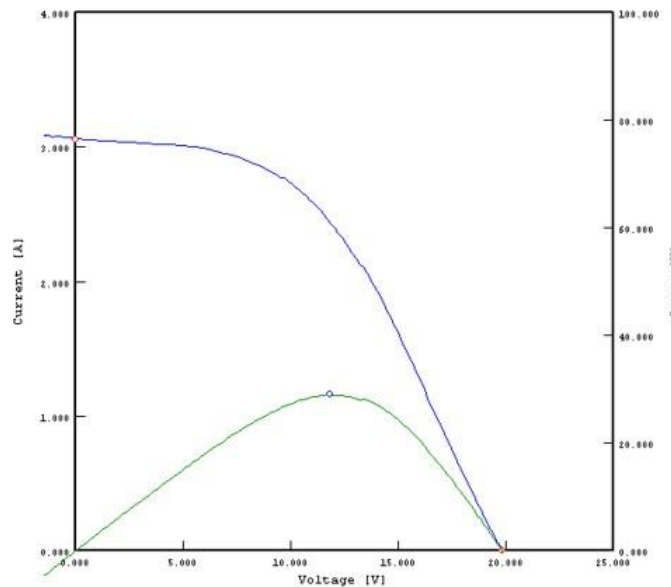


Figure III.20 : Zoom de caractéristiques courant-tension I-V et puissance.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés une étude expérimentale détaillée d'un capteur hybride photovoltaïque thermique PVT avec chicanes, ce capteur qui a été réalisé au sein de l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien, Grâce à ces résultats expérimentaux nous avons constaté que :

- L'ajout des chicane provoque l'obstruction et la perturbation du passage de fluide caloporteur (l'air) et par conséquent un accroissement de la température des éléments du capteur, une augmentation de 64 à 86% de rendement thermique du capteur hybride PVT par rapport au capteur hybride PVT simple.
- Un écart de température de l'air à l'entrée et à la sortie du capteur PVT à air atteint 17,91°C dans l'intervalle de temps entre 11h :00 et 15h :00.
- L'ajout d'un ventilateur au-dessous du panneau photovoltaïque diminue sa température avec un écart de 11°C.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

La croissance de la population et de l'activité industrielle ont entraîné une augmentation significative de la consommation mondiale d'énergie. Pour répondre aux demandes énergétiques, les combustibles fossiles d'aujourd'hui génèrent de grandes quantités de gaz nocifs, causant des ravages sur les écosystèmes. Le réchauffement climatique est un grave problème qui menace la survie de l'homme et des autres espèces. La crise énergétique est un obstacle à la croissance économique dans de nombreux pays. L'un des moyens les plus efficaces de résoudre ce problème est d'utiliser des énergies renouvelables au lieu des énergies fossiles.

Les énergies renouvelables sont donc une alternative viable aux combustibles fossiles de plusieurs manières : elles sont généralement moins nocives pour l'environnement, ne libèrent pas de gaz à effet de serre et n'ont pas d'effets secondaires graves. Ils sont infinis et permettent une fabrication décentralisée adaptée aux ressources et aux demandes locales. Enfin, ils vous procurent beaucoup d'énergie d'indépendance. PV/T système est une combinaison entre un module photovoltaïque et un capteur solaire thermique, ce système est appelé capteur hybride.

Le capteur solaire est un composant essentiel dans l'utilisation de l'énergie solaire ; il capte le rayonnement solaire et le convertit en chaleur via l'effet de serre en utilisant des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques n'est pas convertie en électricité et provoque une augmentation de leur température et réduit en conséquence leur efficacité électrique. La température des capteurs photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. Cette chaleur extraite peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également convertir l'énergie solaire en courant à l'aide de cellules solaires, qui sont des matériaux semi-conducteurs.

Il existe de nombreuses configurations de capteurs solaires hybrides dans la littérature, qui peuvent être classées en fonction du type de fluide caloporteur utilisé : PV/T à eau, PV/T à air et PV/T bi fluide, ces études sont très intéressantes et ils ont données des bons résultats et ceci prouve que ces systèmes hybride PVT est sujet actuel et en améliorations.

Dans le cadre de ce travail, on a entrepris une étude et Réalisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique plan à air destiné aux applications domestiques. L'objectif de cette étude est d'améliorer ses performances énergétiques et l'efficacité thermique. Les performances thermiques et électriques seront examinées dans cette recherche. Les résultats

obtenus, mettent en évidence l'influence des obstacles dans l'absorbeur sur les températures de différentes composantes de capteur et sur leur rendement thermique, cela nous a permis de conclure que :

- En termes d'aspect thermique, des paramètres tels que la température du module photovoltaïque, les températures d'entrée et de sortie du flux d'air, la température ambiante, l'intensité solaire, l'efficacité thermique et le débit sont étudiés en profondeur afin de déterminer le potentiel de combiner le module photovoltaïque et le capteur thermique.
- L'emploi d'un absorbeur modifié avec des obstacles doté d'une chaleur spécifique, une conductivité thermique et une absorptivité élevée améliore les performances du système PVT.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- Une bonne isolation qui possède une épaisseur et une chaleur spécifique élevées, ainsi qu'une faible conductivité thermique améliore les performances du capteur hybride PVT.
- L'écart de température à l'entrée et à la sortie du capteur PVT à air, qui est important à propos de $17,91^{\circ}\text{C}$ signifie dans l'intervalle de temps entre 11 heures et 15 heures.
- La comparaison entre le capteur hybride PVT simple et le capteur hybride PVT modifié permet de constater que le rendement thermique lorsqu'on a utilisé le capteur hybride avec des chicane et mieux que l'utilisation du capteur hybride avec absorbeur simple.
- Le capteur modifié donne un rendement thermique max de valeur de 86 % et une amélioration de 22%.

Perspectives

Suite aux travaux effectués au cours de ce mémoire, diverses perspectives peuvent être envisagées, nous avons pu retenir quelques points en suggestions :

- Effectuer des tests correspond aux quatre saisons pour voir la rentabilité de notre système PVT ;
- L'ajout d'une chambre séchage à notre système PVT et l'utiliser à la maison pour sécher les légumes et fruits ;

- Une analyse économique du capteur solaire PVT doit être effectuée afin d'estimer le coût de séchage des légumes et fruits et les délais de récupération de l'investissement, en utilisant les méthodes proposées dans la littérature ;
- L'amélioration des performances du capteur solaire hybride PVT par la modification de la géométrie et la position des chicane (obstacles étudiés au chapitre 3) dans l'absorbeur et en rendant ce capteur mobile et portable afin de faciliter son déplacement ;
- L'amélioration du système de refroidissement du panneau photovoltaïque pour augmenter son rendement ;
- L'utilisation des différents types de matériaux pour l'absorbeur pour avoir une bonne efficacité thermique ;
- La modélisation de notre système PVT est indispensable pour faire une comparaison théorique et expérimentale.

Annexe

Gisement Solaire

A.1.Introduction

La quantité d'énergie solaire qui atteint une surface particulière est directement proportionnelle à sa direction et à l'emplacement du soleil. Afin de tirer le maximum d'énergie du soleil, le récepteur doit être orienté le plus près possible des faisceaux lumineux. Par conséquent, comprendre la position du soleil en fonction du temps est essentiel. [63].

Le rayonnement solaire incident à la surface de la terre est le résultat d'interactions complexes de l'énergie entre l'atmosphère et la surface. Le rayonnement solaire varie dans le temps et dans l'espace. Un réseau de stations de surveillance solaire équipées de Pyranomètres et de dispositifs de collecte de données est généralement créé dans les zones concernées pour collecter ces informations. Cependant, en particulier dans les pays en développement, le nombre de ces stations dans le réseau est souvent insuffisant pour fournir des données de rayonnement solaire aux emplacements ciblés. Des méthodes d'estimation du rayonnement solaire basées sur des données météorologiques plus facilement accessibles sont nécessaires. [64].

A.2. Description du soleil

Toute l'énergie de la planète provient du soleil. Cela est vrai pour les sources d'énergie non renouvelables d'origine fossile, comme les hydrocarbures produits par photosynthèse, ainsi que pour les sources d'énergie renouvelables, comme l'énergie solaire, la géothermie, la biomasse...etc. [63] [65].

Les principales caractéristiques du soleil sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau A.1 : Caractéristiques principales du soleil [63]

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989.10^{30}$ kg
Masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
Diamètre	$13,92.10^5$ km
Distance du centre de la voie lactée	$2,5.10^{47}$ km
Vitesse	217 km/s
Température superficielle	5770 k
Puissance rayonnée	$3,83.10^{23}$ kw

On distingue trois régions particulières pour la structure du soleil qui illustré dans la figure suivante [63] [66] [67]

- 1- L'intérieur du soleil : le noyau, la zone radiative et la zone convective sont les trois zones qui composent l'intérieur du soleil. Il représente 40% de la masse du soleil et a une épaisseur de 25.10^4 kilomètres. Il a une température de plusieurs millions de degrés Fahrenheit et une pression d'un milliard d'atmosphères.
- 2- La photosphère : est une couche opaque de 300 kilomètres d'épaisseur. Sa température est de l'ordre de quelques millions de degrés et son épaisseur chute rapidement jusqu'à une température dite de surface d'environ 4500 degrés Celsius.
- 3- La chromosphère et la couronne solaire : C'est une zone de faible densité avec des matériaux très dilués qui ressemble à l'atmosphère du soleil. Le rayonnement rayonné est relativement faible et très élevé dans cette strate (environ un million de degrés).

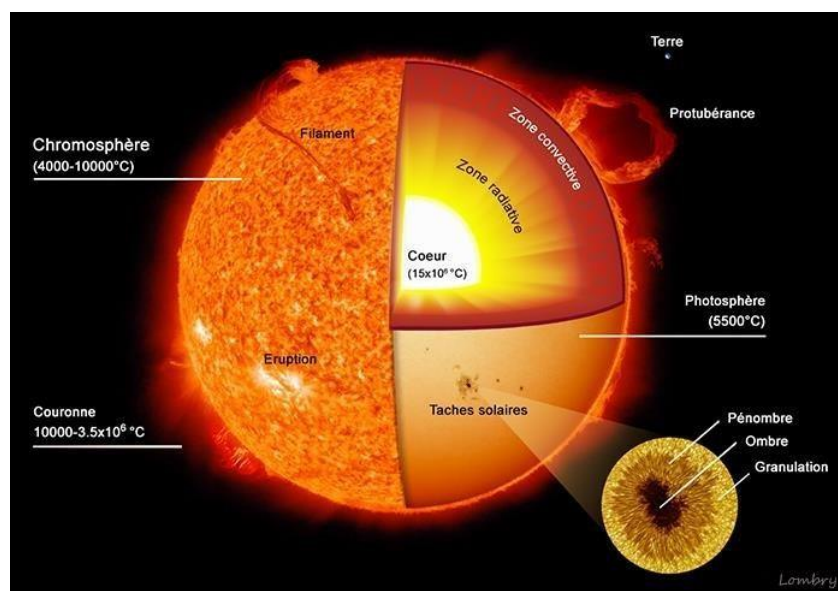


Figure A.1 : Structure du soleil

A.3. La constante solaire

La constante solaire représente le flux solaire moyen sur un plan perpendiculaire à la direction des rayons et placé en dehors de l'atmosphère terrestre. Sa valeur moyenne est retenue à 1367 W/m² [68].

A.4. Données Astronomiques

A. 4. a. La latitude

Permet de trouver la distance angulaire entre deux points quelconques par rapport à l'équateur [69].

A. 4. b. La longitude

L'angle formé par le méridien du lieu et le méridien origine des longitudes (qui passe par la ville de GREENWICH) [69].

A.4. c. La déclinaison du soleil (δ)

C'est l'angle généré par la direction du soleil et le plan équatorial de la terre. Selon la loi périodique de Cooper (1969), cet angle fluctue avec les saisons comme suit [70] [71] :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(284 + J)\right) \quad (\text{A.1})$$

J : représente le nombre du jour à compter à partir du 1er Janvier jusqu'au jour de calcul.

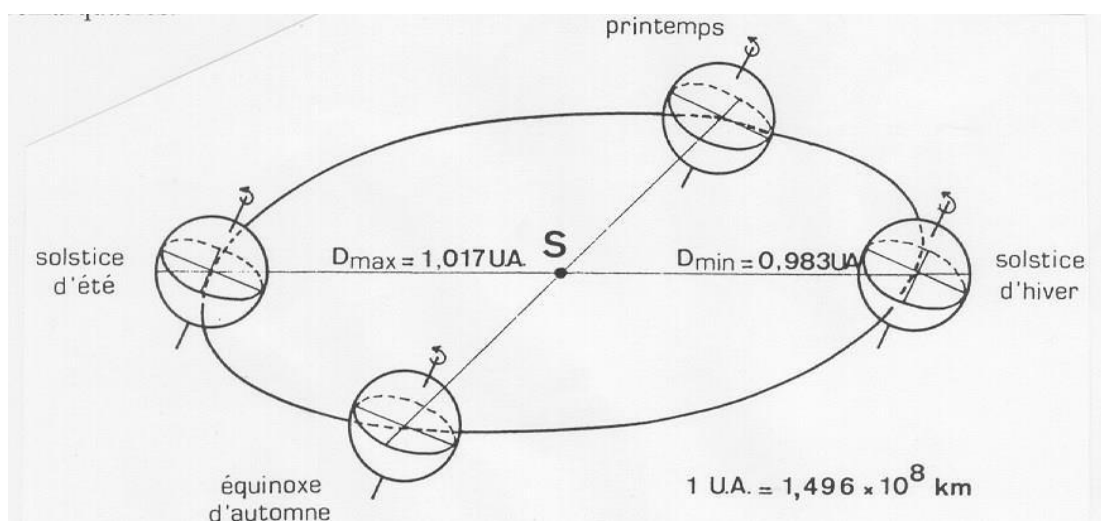


Figure A.2. Mouvement de rotation de la terre [69]

A.4. d. L'angle horaire (ω)

La rotation quotidienne de la terre autour de son axe le détermine. L'arc de trajectoire solaire entre le soleil et le plan méridien du point [69] est mesuré.

$$\omega = 15(TSV - 12)$$

L'angle H vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vraie.

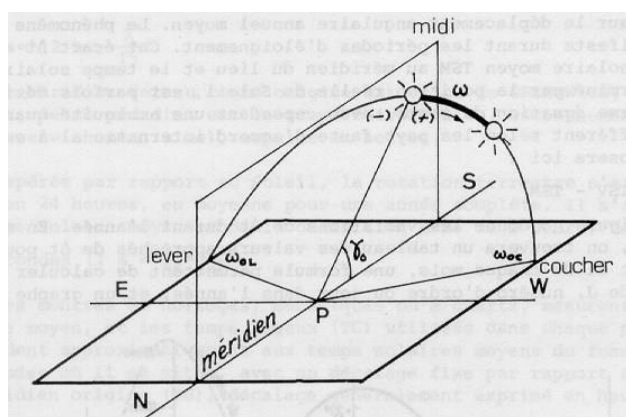


Figure.A.3. L'angle horaire du soleil [69]

A.5. Détermination du Temps solaire

A.5. a. Le temps solaire vrai (TSV)

L'angle horaire ω est représenté par le temps solaire réel à un instant donné. Ça commence à 12h. [72].

$$TSV = 12 + \omega \quad (\text{Si } \omega \text{ en h}) \quad (\text{A.2})$$

A.5. b. Le temps solaire moyen (TSM)

On peut donner par l'équation suivante :

$$TSV - TSM = ET \quad (\text{min}) \quad (\text{A.3})$$

Tel que :

Et : représente l'équation du temps (min), elle est donnée par la relation :

$$ET = 9.87 \times \sin(2J) - 7.53 \times \cos(J) - 1.5 \sin(J) \quad (\text{A.4})$$

$$J = \frac{360}{365}(J - 81) \quad (\text{A.5})$$

J : est le nombre du jour compté à partir de premier janvier.

A.5. c. Le temps universel (TU)

Le temps civil moyen du méridien de Greenwich est utilisé pour déterminer le temps universel.

Pour un lieu se situant à la longitude L :

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (\text{h}) \quad (\text{A.6})$$

A.5. d. Le temps local (TL)

C'est le temps local lu sur les horloges.

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{h}) \quad (\text{A.7})$$

Δ : Le décalage horaire.

A.6. Les coordonnées horizontales

Le plan de l'horizon astronomique et la verticale du site produisent la référence horizontale. La hauteur h et l'azimut a sont les coordonnées dans ce repère. (Figure A.4).

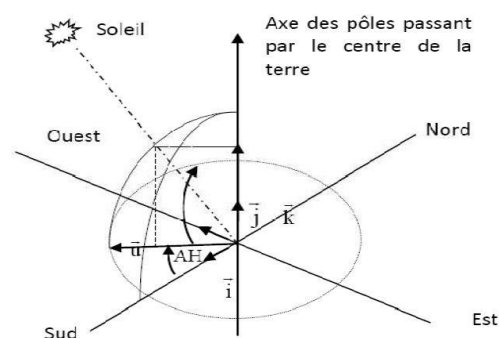


Figure A.4 : Repère équatorial [69].

a. La hauteur du soleil (h)

C'est l'angle généré par la direction et la projection du soleil sur le plan horizontal. Il est notamment comparable à :

0° au lever et au coucher astronomiques du soleil, 90° à midi temps solaire vrai.

φ est la latitude du lieu.

$$\sin(h) = \cos(d) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (\text{A.8})$$

Figure A.4. Repère horizontal [69]

b. L'azimut du soleil (a)

C'est l'angle confiné la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction Sud.

$$\sin(a) = \frac{\cos(d) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{A.9})$$

A.7. L'orientation d'un plan

Un plan quelconque est défini par deux angles α , γ

γ est la hauteur du plan. Angle formé par la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal.

α est l'azimut du plan c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud. L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{A.10})$$

A.8. L'angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence, ou i est l'angle formé entre la direction du soleil et la normale du plan. La connaissance des cosinus directeurs du rayon incident et de la normale en coordonnées horizontales selon la liaison suivante détermine cet angle.

$$\cos(i) = \sin(a - \alpha) \cos(\gamma) \cos(h) - \sin(\gamma) \sin(h) \quad (\text{A.11})$$

En coordonnées horaires :

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\alpha) \cos(\gamma) \cos(d) \sin(h) + \cos(\alpha) \cos(\gamma) (\cos(\omega) \cos(d) \sin(\varphi) - \\ & \sin(d) \sin(\varphi)) + \sin(\gamma) (\cos(\omega) \cos(d) \cos(\varphi) + \sin(d) \sin(\varphi)) \end{aligned} \quad (\text{A.12})$$

Références bibliographiques

- [1] M. schanaus. F.A. peuser, K.H.remmers, *Installations solaires thermiques : conception et mise en oeuvre*. 2005.
- [2] A.BENTAMRE, "Etude d'un système Aérogénérateur utilisé pour la production d'Énergie Electrique," Université de Ghardaia, 2016.
- [3] YACINE Fouad, "Etude des nouvelles générations de cellules photovoltaïques," Université Des Sciences et de le Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf (USTO.MB), 2011. [Online]. Available: <http://10.1.66.160:8080/handle/123456789/93>
- [4] M. G. et S. M. Benard R., *Le rayonnement solaire conversion thermique et applications*, 2ème édit. 1980.
- [5] E. Erdil, M. Ilkan, and F. Egelioglu, "An experimental study on energy generation with a photovoltaic (PV)-solar thermal hybrid system," *Energy*, vol. 33, no. 8, pp. 1241–1245, 2008, doi: 10.1016/j.energy.2008.03.005.
- [6] "Capteurs solaires hybrides PV-T." <https://www.cooltec.ch/hybride-pvt-faq.html>.
- [7] GHELLAB Amel, "MODELISATION ET OPTIMISATION DES CAPTEURS SOLAIRES HYBRIDES," Université des frères Mentouri Constantine, 2018.
- [8] A. Fudholi *et al.*, "Review of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector," *Int. J. Electr. Comput. Eng.*, vol. 9, no. 1, p. 126, 2019, doi: 10.11591/ijece.v9i1.pp126-133.
- [9] D. Boureima, M. K. Thierry Sikoudouin, O. Emmanuel, H. Koami Soulemane, and B. Dieudonné Joseph, "Theoretical Study of a Thermal Photovoltaic Hybrid Solar Collector," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 43, pp. 1–9, 2018, doi: 10.17485/ijst/2018/v11i43/132133.
- [10] A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, and F. A. Sachit, "Technology progress on photovoltaic thermal (PVT) systems with flat-plate water collector designs: A review," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 59, no. 1, pp. 107–141, 2019.
- [11] G. L. Jin *et al.*, "Evaluation of single-pass photovoltaic-thermal air collector with rectangle tunnel absorber," *Am. J. Appl. Sci.*, vol. 7, no. 2, pp. 277–282, 2010, doi: 10.3844/ajassp.2010.277.282.
- [12] J. H. Herbert Zondag, Joakim Bystrom, "PV–thermal collectors going commercial," *IEA SHC Task 35*, 2008.
- [13] A. Ibrahim, M. Y. Othman, M. H. Ruslan, S. Mat, and K. Sopian, "Recent advances in flat plate photovoltaic/thermal (PV/T) solar collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1. pp. 352–365, 2011. doi: 10.1016/j.rser.2010.09.024.
- [14] A. Ricaud and P. Roubeau, "'Capthel', a 66% efficient hybrid solar module and the 'Ecothel' co-generation solar system," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 1994, vol. 1, pp. 1012–1015. doi: 10.1109/wcpec.1994.520132.
- [15] Elazari A., "Multi solar system: solar multi module for electrical and hot water supply

- for residentially building,” Vienna, Austria, 1998.
- [16] B. J. Bosanac M, Soerensen B, Katic I, Soerensen H, Nielsen B, “Photovoltaic/thermal solar collectors and their potential in Denmark,” 2003.
- [17] H. W. Zondag, HA, Bakker M, “PVT Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology,” 2005. [Online]. Available: www.pvtforum.org
- [18] P. Ooshaksaraei, K. Sopian, S. H. Zaidi, and R. Zulkifli, “Performance of four air-based photovoltaic thermal collectors configurations with bifacial solar cells,” *Renew. Energy*, vol. 102, pp. 279–293, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2016.10.043.
- [19] A. F, “Solar Heating – What Is It? How Does It Work?,” 2014. <https://www.heatwithsolar.com.au/solar-heating-how-does-it-work/> 11/03/2022
- [20] A. Kumar, P. Baredar, and U. Qureshi, “Historical and recent development of photovoltaic thermal (PVT) technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 1428–1436, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.044.
- [21] H. A. Zondag, D. W. de Vries, W. G. J. van Helden, R. J. C. van Zolingen, and A. A. van Steenhoven, “The yield of different combined PV-thermal collector designs,” *Sol. Energy*, vol. 74, no. 3, pp. 253–269, 2003, doi: 10.1016/S0038-092X(03)00121-X.
- [22] T. T. Chow, G. Pei, K. F. Fong, Z. Lin, A. L. S. Chan, and J. Ji, “Energy and exergy analysis of photovoltaic-thermal collector with and without glass cover,” *Appl. Energy*, vol. 86, no. 3, pp. 310–316, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2008.04.016.
- [23] U. Kiran, S., Devadiga, “Performance analysis of hybrid PV/ thermal systems,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng*, vol. 3, pp. 80–86, 2003.
- [24] P. Dupeyrat, C. Ménézo, M. Rommel, and H. M. Henning, “Efficient single glazed flat plate photovoltaic-thermal hybrid collector for domestic hot water system,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 7, pp. 1457–1468, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.04.002.
- [25] R. Liang, J. Zhang, L. Ma, and Y. Li, “Performance evaluation of new type hybrid photovoltaic/thermal solar collector by experimental study,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 75, pp. 487–492, 2015, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.09.075.
- [26] M. A. Farideh Yazdanifard, Ehsan Ebrahimnia-Bajestan, “Investigating the performance of a water-based photovoltaic/thermal (PV/T) collector in laminar and turbulent flow regime,” *Renew. Energy*, vol. Volume 99, p. Pages 295-306, 2016.
- [27] J. K. T. Y. Tripanagnostopoulos, S. Tselepis, M. Souliotis, “DESIGN ASPECTS OF HYBRID PVT/WATER SOLAR SYSTEMS,” in *19th European Solar Energy Conference and Exhibition*, 2004.
- [28] A. G. Tiwari, G.N., “Photovoltaic Thermal (PVT) systems and its Applications,” *2nd Int. Conf. Green Energy Technol.*, [Online]. Available: 10.1109/ICGET.2014.6966678
- [29] S. Singh and S. Agrawal, “Parameter identification of the glazed photovoltaic thermal system using Genetic Algorithm-Fuzzy System (GA-FS) approach and its comparative study,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 105, pp. 763–771, 2015, doi: 10.1016/j.enconman.2015.08.027.

- [30] S. Agrawal and G. N. Tiwari, "Energy and exergy analysis of hybrid micro-channel photovoltaic thermal module," *Sol. Energy*, vol. 85, no. 2, pp. 356–370, 2011, doi: 10.1016/j.solener.2010.11.013.
- [31] K. E. Amori and M. A. Abd-ALRaheem, "Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors," *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 402–414, 2014, doi: 10.1016/j.renene.2013.09.047.
- [32] K. E. Amori and H. M. Taqi Al-Najjar, "Analysis of thermal and electrical performance of a hybrid (PV/T) air based solar collector for Iraq," *Appl. Energy*, vol. 98, pp. 384–395, 2012, doi: 10.1016/j.apenergy.2012.03.061.
- [33] B. Agrawal and G. N. Tiwari, "Optimizing the energy and exergy of building integrated photovoltaic thermal (BIPVT) systems under cold climatic conditions," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 2, pp. 417–426, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.06.011.
- [34] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, and A. Behzadmehr, "Exergetic performance assessment of a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Energy Build.*, vol. 42, no. 11, pp. 2184–2199, 2010, doi: 10.1016/j.enbuild.2010.07.011.
- [35] F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, and M. Mahdavi Adeli, "An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 7, pp. 2328–2339, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.001.
- [36] K. Pottler, C. M. Sippel, A. Beck, and J. Fricke, "Optimized finned absorber geometries for solar air heating collectors," in *Solar Energy*, 1999, vol. 67, no. 1–3, pp. 35–52. doi: 10.1016/S0038-092X(00)00036-0.
- [37] M. Wolf, "Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences," *Energy Convers.*, vol. 16, no. 1–2, pp. 79–90, 1976, doi: 10.1016/0013-7480(76)90018-8.
- [38] L. W. Florschuetz, "Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors," *Sol. Energy*, vol. 22, no. 4, pp. 361–366, 1979, doi: 10.1016/0038-092X(79)90190-7.
- [39] S. J. Hayter and R. L. Martin, "Photovoltaics for Buildings - Cutting-Edge PV," *Util. Photovolt. Gr. UPEX'98 Conf. Proceedings, Sept. 1998, San Diego, Calif. USA.*, no. November, 1998.
- [40] M. Afrand, A. Shahsavari, P. T. Sardari, K. Sopian, and H. Salehipour, "Energy and exergy analysis of two novel hybrid solar photovoltaic geothermal energy systems incorporating a building integrated photovoltaic thermal system and an earth air heat exchanger system," *Sol. Energy*, vol. 188, pp. 83–95, 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.05.080.
- [41] K. Bot, L. Aelenei, M. Da Glória Gomes, and C. S. Silva, "Performance assessment of a building integrated photovoltaic thermal system in mediterranean climate - A numerical simulation approach," *Energies*, vol. 13, no. 11, 2020, doi: 10.3390/en13112887.
- [42] A. Kasaeian, Y. Khanjari, S. Golzari, O. Mahian, and S. Wongwises, "Effects of forced convection on the performance of a photovoltaic thermal system: An experimental

- study," *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 85, pp. 13–21, 2017, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2017.02.012.
- [43] A. Maafi, "A survey on photovoltaic activities in Algeria," *Renew. Energy*, vol. 20, no. 1, pp. 9–17, 2000, doi: 10.1016/S0960-1481(99)00096-8.
- [44] Abdelhak RAZAGUI ; Sabiha KHEDER ; Salima OUALI, *Algerian Renewable Energy Source ATLAS*, 1er editio. 2019.
- [45] SAADI SOUAD, "Effet des paramètres opérationnelles sur les performances d'un capteur solaire plan," Université MENTOURI DE CONSTANTINE, 2010.
- [46] N. Hamani, A. Moumami, N. Moumami, A. Saadi, and Z. Mokhtari, "Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra," *Rev. des Energies Renouvelables*, vol. 10, pp. 2–215, 2007.
- [47] C. S. Rajoria, S. Agrawal, G. N. Tiwari, and G. S. Chaurasia, "Exergetic and enviroeconomic analysis of semitransparent PVT array based on optimum air flow configuration and its comparative study," *Sol. Energy*, vol. 122, pp. 1138–1145, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.10.020.
- [48] C. Good, I. Andresen, and A. G. Hestnes, "Solar energy for net zero energy buildings - A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic-thermal (PV/T) systems," *Sol. Energy*, vol. 122, pp. 986–996, 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.10.013.
- [49] M. T. Sarniak, "The efficiency of obtaining electricity and heat from the photovoltaic module under different irradiance conditions," *Energies*, vol. 14, no. 24, 2021, doi: 10.3390/en14248271.
- [50] F. Z. Ferahta, S. Bougoul, M. Médale, and C. Abid, "Influence of the air gap layer thickness on heat transfer between the glass cover and the absorber of a solar collector," *Fluid Dyn. Mater. Process.*, vol. 8, no. 3, pp. 339–352, 2012, doi: 10.3970/fdmp.2012.008.339.
- [51] H. S. Dheyab, M. S. M. Al-Jethelah, T. A. Yassen, and T. K. Ibrahim, "Experimental study of the optimum air gap of a rectangular solar air heater," *J. Adv. Res. Fluid Mech. Therm. Sci.*, vol. 59, no. 2, pp. 318–329, 2019.
- [52] A. DEGIOVANNI, "Transmission de l'énergie thermique - Conduction, Technique de l'Ingénieur," *Technique de l'Ingénieur*, 1999.
- [53] J.-P. P. Jacques HUETZ, *Notions de transfert thermique par convection, Techniques de l'ingénieur*. 1990.
- [54] G. G. SFEIR Antoine, *Ingénierie des systèmes solaires : applications à l'habitat*. 1981.
- [55] M. Y. Othman, S. A. Hamid, M. A. S. Tabook, K. Sopian, M. H. Roslan, and Z. Ibarahim, "Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study," *Renew. Energy*, vol. 86, pp. 716–722, 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.08.061.
- [56] B. S. Romdhane, "The air solar collectors: Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 1, pp. 139–149, 2007, doi: 10.1016/j.solener.2006.05.002.

- [57] N. M. Phu, P. B. Thao, and N. Van Hap, "Effective efficiency assessment of a solar air heater having baffles spaced with different successive ratios," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 28, 2021, doi: 10.1016/j.csite.2021.101486.
- [58] J. Hu, X. Sun, J. Xu, and Z. Li, "Numerical analysis of mechanical ventilation solar air collector with internal baffles," *Energy Build.*, vol. 62, pp. 230–238, 2013, doi: 10.1016/j.enbuild.2013.03.015.
- [59] E. K. Akpınar and F. Koçyiğit, "Energy and exergy analysis of a new flat-plate solar air heater having different obstacles on absorber plates," *Appl. Energy*, vol. 87, no. 11, pp. 3438–3450, 2010, doi: 10.1016/j.apenergy.2010.05.017.
- [60] E. K. Akpınar and F. Koçyiğit, "Experimental investigation of thermal performance of solar air heater having different obstacles on absorber plates," *Int. Commun. Heat Mass Transf.*, vol. 37, no. 4, pp. 416–421, 2010, doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2009.11.007.
- [61] B. I. BOURGUEBA Djaoued, "Simulation numérique dU stockage De l'énergie solaire par chaleur latente," Université Abou Baker Belkaid-TLEMEN, 2014.
- [62] M. C. and A. M. M. Sadok, "Performance Analysis of Power Photovoltaic Installation," in *World Renewable Energy Congress*, 1998, no. N° 1691-95.
- [63] Bernard Jacques, *Energie solaire - Calculs et optimisation - Génie énergétique, Niveau B*, 2e édition. 2011.
- [64] T. A. T. Hussein, "Estimation of Hourly Global Solar Radiation in Egypt Using Mathematical Model," *Misr J. Agric. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 2033–2047, 2010, doi: 10.21608/MJAE.2010.105401.
- [65] Z. Şen, *Solar energy fundamentals and modeling techniques: Atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. 2008. doi: 10.1007/978-1-84800-134-3.
- [66] Jean-Michel Chassériaux; J M Chassériaux, *Conversion thermique du rayonnement solaire*, Dunod. 1984.
- [67] S. M. BERNARD Roger, MENGUY Gilbert, *Le rayonnement solaire : conversion thermique et applications*. 1983.
- [68] A. Ricaud, "Gisement solaire et transferts énergétiques," *Master Energies Renouvelables Univ.*, pp. 50–54, 2011.
- [69] Michel Daguinet, *Les séchoirs solaires, théorie et pratique*. 1985.
- [70] J. A. Duffie, W. A. Beckman, and J. McGowan, *Solar Engineering of Thermal Processes*, vol. 53, no. 4. 1985. doi: 10.1119/1.14178.
- [71] J.P. Holman, *Heat Transfer*, Tenth Edit. 2010.
- [72] Yunus Cengel, *Heat Transfer: A practical approach*, 2nd editio., vol. 37, no. 9. 2006. doi: 10.5408/0022-1368-4.2-2.83.