

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : GENIE MECANIQUE

Spécialité : ENERGETIQUE

Par : ASMAOUI Hicham
SEBIANE Dris

Sujet

Développement d'un système de stockage thermique avancé pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires thermique

Soutenu publiquement, le 19 / 06 / 2025, devant le jury composé de :

M SAIM RACHID
M GUELLIL HOCINE
M KORTI. A NABIL
Mme SARI. H HIND

Professeur
MCA
Professeur
MAA

Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen
Univ. Tlemcen

Président
Directeur de mémoire
Co- Directeur de mémoire
Examineur

ملخص

تُجري هذه الدراسة التجريبية مقارنةً بين أداء المجمع الشمسي الهوائي المزود بشفرات وآخر بدونها، باستخدام مصدر حرارة صناعي في مختبر جامعة أبي بكر بلقايد بتلمسان (ETAP). وتُظهر النتائج التأثير الإيجابي للشفرات على الكفاءة الحرارية للمجمع. كما أوليت عناية خاصة لزاوية ميل الماص للحرارة بالنسبة للشفرات، حيث بينت القياسات التي أُجريت بالأدوات الموصوفة في البروتوكول التجريبي أن الزاوية المثلى هي 45° .

بعد ذلك، نُفذت دراسة ثانية في ظروف حقيقية على المجمع المزود بزاوية ميل 45° . ثم تم دمج مبادل حراري يحتوي على مادة البارافين (مادة متغيرة الطور) ضمن النظام، ما ساعد على تقليل تقلبات درجة الحرارة واستقرار حرارة المخرج. وقد أدت هذه الإضافة إلى تحسين ملحوظ في تنظيم الحرارة داخل المجمع الشمسي.

الكلمات المفتاحية: المجمع الشمسي الهوائي، الشفرات، الإشعاع الشمسي، دراسة تجريبية، المواد متغيرة الطور (MCP)، الكفاءة الطاقية.

Abstract

This experimental study compares the performance of an air-based solar collector with and without fins, using an artificial heat source in the laboratory of Abou Bekr Belkaïd University in Tlemcen (ETAP). The results demonstrate the positive impact of fins on the thermal efficiency of the collector. Particular attention was given to the inclination angle between the absorber and the fins, revealing that the optimal angle is 45°.

Subsequently, a second study was carried out under real outdoor conditions on the solar air heater equipped with 45° inclined fins. A heat exchanger containing paraffin (a phase change material, PCM) was integrated into the system, which helped reduce temperature fluctuations and stabilize the outlet temperature and improved the thermal regulation of the solar collector.

Keywords: Air solar collector, fins, solar radiation, experimental study, Phase Change Materials (PCM), energy efficiency.

Résumé

Cette étude expérimentale compare les performances d'un capteur solaire à air avec et sans ailettes, en utilisant une source de chaleur artificielle dans le laboratoire de l'Université Abou Bekr Belkaïd à Tlemcen (ETAP). Les résultats démontrent l'impact positif des ailettes sur l'angle d'inclinaison entre l'absorbeur et les ailettes, révélant que l'angle optimal est de 45°.

Ensuite, une seconde étude en conditions réelles a été menée sur le capteur équipé d'ailettes inclinées à 45°. Un échangeur de chaleur contenant de la paraffine (matériau à changement de phase) a été intégré au système, qui a pu réduire les fluctuations et stabiliser la température de sortie et a permis d'améliorer significativement la régulation thermique du capteur solaire.

Mots clés: Capteur solaire à air, ailettes, rayonnement solaire, étude expérimentale, Matériaux à changement de phase (MCP), efficacité énergétique.

Remerciements

Je remercie en premier lieu Dieu tout puissant de m'avoir donné la force et la volonté d'achever ce travail, et pour nous guider et nous aider à persévérer dans nos études et à rencontrer des enseignants attentifs.

*Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu voir le jour sans l'aide et l'encadrement de monsieur « **GUELLIL HOCINE** » et de monsieur « **KORTI. A NABIL** ». Nous les remercions pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, sa rigueur et leur disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.*

*Nous voudrions remercier Monsieur **SAIM RACHID** en étant président du jury, et Madame **SARI HASSOUN Hind** d'avoir accepté d'examiner notre mémoire et ont travaillé avec nous pour assurer le bon déroulement de celui-ci.*

*Nous tenons à exprimer notre gratitude à **EMBARAK NOUR EDDINE** et le remercier pour ces conseils et son aide, ainsi que son soutien moral qui nous a donné le courage de mener à bien ce projet.*

J'adresse mes remerciements également à l'ensemble des enseignants et au personnel de l'université Aboubakr Belkaid Tlemcen pour la qualité de l'enseignement et des connaissances transmises tout au long de ma formation.

Nous tenons également à remercier tous ceux qui nous ont aidé et soutenu de près ou de loin, mes camarades, amis et ma famille, dont le soutien moral et les encouragements m'ont été d'une grande aide.

Dédicace

"رب اشرح لي صدري * ويسر لي أمري * واحلل عقدة من لساني * يفقهوا قولي"

Je dédie ce modeste travail

Au meilleur des pères et à ma très chère maman qu'ils trouvent en moi la source de leur fierté, qui ne cessent de me donner avec amour le nécessaire pour que je puisse arriver à ce que je suis aujourd'hui.

Que dieu les protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je puisse vous combler de bonheur.

À mes sœurs et mes frères

À toute ma famille

*Et à toutes mes amis, et surtout à ma proche amis **EMBARAK NOUR EDDINE** Je le remercie sincèrement pour son aide dans ce travail.*

*Et mon binôme **ASMAOUI HICHEM** pour son entente et sa sympathie, qui m'a supporté et m'a fait confiance tout au long de ce travail.*

À tous ceux qui me sont chers, aux personnes qui m'aidé et encouragé de près ou de loin, qui étaient toujours à mes côtés et qui m'ont accompagné durant mon chemin d'études.

Merci à vous.

SEBIANE DRIS

Dédicace

En témoignage d'amour et d'affection, je dédie ce modeste travail avec une grande fierté à tous ceux qui me sont chers

*Ma très chère mère **Fayza**, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, Pour toute son assistance et sa présence dans ma vie.*

*Mon très cher père **Mohamed**, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie.*

Que Dieu vous protège et que la réussite soit toujours à ma portée pour que je suis puisse vous combler de bonheur.

*Mes chères frères **Youcef** et **Abdel khalek** et ma belle-sœur **Amina** puisse Dieu vous donne santé, bonheur et réussite.*

ASMAOUI HICHEM

Table des matières

ملخص.....	i
Abstract	ii
Résumé	iii
Remerciements	iv
Dédicace	v
Dédicace	vi
Table des matières	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xii
Nomenclatures	xiii
Introduction générale	1

Chapitre I: Recherche bibliographique

I.1	Introduction.....	5
I.2	Capteur solaire	5
I.3	Différents types d'un capteur solaire thermique plan	6
I.3.1	Capteurs plans non vitrés.....	6
I.3.2	Capteurs plans vitrés	7
I.3.3	Capteur solaire plan à eau	8
I.3.4	Capteur solaire plan à air	8
I.4	L'absorbeur.....	9
I.5	Condition de fonctionnement pour le capteur solaire	9
I.6	Étude bibliographique.....	10
I.7	Conclusion	31

Chapitre II: Procédure expérimentale

II.1	Introduction.....	33
II.2	Présentation du dispositif expérimental	33
II.2.1	Description du capteur solaire Thermique	34

II.2.2 Principe de fonctionnement du capteur	35
II.3 Étude Procédure expérimentale	35
II.4 Réalisation d'une source thermique artificielle	37
II.5 Instruments des mesures utilisés	40
II.5.1 Mesure du rayonnement solaire.....	40
II.5.2 Mesure de débit d'air	41
II.5.3 Contrôleur de tension et de courant.....	42
II.5.4 Ventilateur centrifuge	43
II.5.5 Station météorologique automatique (Automatic Weather Station).....	44
II.5.6 Mesure des températures	45
II.5.7 DAQ Assistant	46
II.5.8 Multimètre.....	47
II.6 Description du logiciel LabVIEW.....	48
II.6.1 Présentation de l'interface	49
II.7 Protocole expérimental.....	52
II.8 Échangeur	53
II.8.1 Propriétés de paraffine	54
II.8.2 Avantages des paraffines	54
II.9 Résistance	55
II.10 Analyse théorique	58
II.10.1Energie Q_{out}	58
II.10.2Efficacité énergétique	58
II.11 Conclusion	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III: Résultat et discussion

III.1 Introduction.....	60
III.2 Comportement du capteur avec et sans ailettes	60
III.2.1 Expérience (a) : Absorbeur lisse sans ailettes	60

III.2.2	Expérience (b) : Inclinaison des ailettes à 30°	62
III.2.3	Expérience (c) : inclinaison des ailettes à 45°	62
III.2.4	Expérience (d) : inclinaison des ailettes à 60°.....	62
III.3	Capteur solaire hybride à ailettes et avec un stockage thermique	67
III.4	Conclusion	75

Liste des figures

Chapitre I

Fig.I. 1:	Chauffage solaire à air	6
Fig.I. 2:	Capteurs plans non vitré.....	7
Fig.I. 3:	Capteur plan vitré	7
Fig.I. 4:	Capteur solaire plan à eau	8
Fig.I. 5:	Collecteur d'air solaire étudié	11
Fig.I. 6:	Composition d'une boîte solaire avec et sans ailettes	11
Fig.I. 7:	Plaque de l'absorbeur avec les ailettes	12
Fig.I. 8:	Coefficients de transfert de chaleur du collecteur solaire	13
Fig.I. 9:	Installation expérimentale : (a) photographie de l'installation expérimentale et (b) représentation schématique des SAH	14
Fig.I. 10:	(a) Avec et sans système TES (b) V ondulé avec système TES (c) Tube rempli de MCP	16
Fig.I. 11:	Absorbeur du système T SAH, b) Vue 3D de l'absorbeur tubulaire [12].....	17
Fig.I. 12:	Vue expérimentale du SAH actuel [13].....	18
Fig.I. 13:	Assemblage schématique du système SAH et vue de face du collecteur [14]	19
Fig.I. 14:	Types de plaques d'absorption [14].....	20
Fig.I. 15:	Géométrie générale des ailettes ondulées fixées des deux côtés de l'absorbeur (supérieur et inférieur)	21
Fig.I. 16:	Configuration de l'absorbeur avec des chicanes en forme	22
Fig.I. 17:	Types de plaques absorbantes et vue des plaques.....	23
Fig.I. 18:	Modèle expérimental en schéma.....	23
Fig.I. 19:	Vues en coupe des capteurs avec plaque plate, ondulée et trapézoïdale	24
Fig.I. 20:	Principales parties du collecteur de type C1 configuration	25
Fig.I. 21:	Schéma TSAH et disposition expérimentale	27
Fig.I. 22:	SAH avec deux absorbeurs différents.....	28
Fig.I. 23:	Configuration expérimentale du collecteur solaire.....	29

Fig.I. 24: Vue photographique de l'installation expérimentale et les détails.....	31
--	----

Chapitre II

Fig II. 1: Forme ondulée d'ailettes	35
Fig II. 2: Processus de peinture.....	35
Fig II. 3: Forme finale des ailettes	36
Fig II. 4: Absorbeur plat en noir mate	36
Fig II. 5: Capteur solaire à ail	36
Fig II. 6: Inclinaison des ailettes.....	37
Fig II. 7: Fixation des ailettes	37
Fig II. 8: Source thermique artificielle	38
Fig II. 9: Distance entre le vitrage	38
Fig II. 10: Vue de la source de chaleur et l'absorbeur fonctionnent en parallèle.....	38
Fig II. 11: Inclinaison des ailettes à 30°	39
Fig II. 12: Inclinaison des ailettes à 45°	39
Fig II. 13: Inclinaison des ailettes à 60°	39
Fig II. 14: Solarimètre (Amprobe Solar-100).....	40
Fig II. 15: Thermo-anémomètre digital 9160SI	42
Fig II. 16: Contrôleur de tension et d'ampérage	43
Fig II. 17: Ventilateur centrifuge	44
Fig II. 18: Entrée d'air	44
Fig II. 19: Station météorologique automatique.....	45
Fig II. 20: Capteur type K avec têtes plates.....	46
Fig II. 21: Module d'acquisition NI avec les capteurs de température.....	47
Fig II. 22: Multimètre	48
Fig II. 23: Interface LabVIEW (face-avant).....	49
Fig II. 24: Block diagram.....	50
Fig II. 25: Boucle while	50
Fig II. 26: Réaction d'un fichier d'enregistrement des mesures	51
Fig II. 27: Banc expérimental	53
Fig II. 28: Échangeur rempli de paraffine	53
Fig II. 29: Paraffine brute	54
Fig II. 30: Granulés de paraffine.....	54
Fig II. 31: Résistance utilisée.....	55
Fig II. 32: Emplacement de l'échangeur	56
Fig II. 33: Position de résistance.....	56
Fig II. 34: Photos des matériels utilisés dans les expériences.....	57

Fig II. 35: Banc d'essai utilisé	57
---	----

Chapitre III

Fig. III. 1 : Évolution temporelle des températures des capteurs (a) sans ailettes et avec ailettes inclinées à 30° (b), 45° (c) et 60° (d)	61
Fig. III. 2 : Évolution de la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du capteur pour différentes configurations d'un capteur solaire	63
Fig. III. 3: Évolution temporelle de la chaleur utile entre l'entrée et la sortie de l'air pour différentes configurations d'un capteur solaire.....	65
Fig. III. 4: Évolution temporelle du rendement thermique (η_{th}) pour l'absorbeur sans ailettes et avec ailettes selon les inclinaisons de 30°, 45° et 60°	66
Fig. III. 5: Variation de la radiation solaire et de la température ambiante au cours de la ...	68
Fig. III. 6: Évolution temporelle des différentes températures mesurées dans le capteur solaire hybride avec ailettes à double passage dans des conditions réelles	69
Fig. III. 7: Variation des températures à travers l'échangeur de chaleur du capteur solaire hybride à double passe avec des ailettes.....	70
Fig. III. 8: Évolution de la chaleur utile en fonction du temps pour le capteur solaire hybride	72
Fig. III. 9: Évolution de la température de résistance et de l'efficacité thermique du capteur solaire hybride au cours de la journée 23/04/2025.....	73

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II. 1 . Caractéristiques techniques d'un solarimètre	41
Tableau II. 2. Caractéristiques techniques de l'anémomètre	42
Tableau II. 3. Caractéristiques techniques du contrôleur de tension et d'ampère	43
Tableau II. 4. Caractéristiques techniques de la station météorologique automatique	45
Tableau II. 5. Propriétés de paraffine utilisée	54

Nomenclature

C_p : Capacité thermique massique du fluide [$J/kg \cdot K$]

\dot{m} : Débit massique du fluide [kg/s]

ΔT : Différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de la chambre [$^{\circ}C$]

Q_{tot} : Énergie entrant dans le capteur solaire [W]

Q_{out} : Énergie sortie du capteur solaire [W]

$P_{éle}$: Puissance électrique [W]

I : Rayonnement solaire [W/m^2]

A_c : Surface du capteur [m^2]

T_{out} : Température de l'air à la sortie [$^{\circ}C$]

T_{in} : Température de l'air à l'entrée [$^{\circ}C$]

λ : Conductivité thermique [$W/m.K$]

ρ_s : Masse Volumique à l'état solide [kg/m^3]

ρ_l : Masse Volumique à l'état liquide [kg/m^3]

L_f : Enthalpie de fusion [kJ/kg]

*Introduction
générale*

Introduction générale

Les sources d'énergie ont une importance capitale dans l'avancée de l'évolution technologique et industrielle de notre siècle, l'augmentation de la demande en énergie chaque année justifie la nécessité d'explorer d'autres sources d'énergie alternatives, en particulier les énergies renouvelables, avec un accent particulier sur l'énergie solaire la question de l'énergie a toujours été centrale pour l'humanité et la société, le comportement humain est fortement influencé par la disponibilité ou l'absence d'énergie.

Depuis 25 ans, nous sommes témoins d'une crise énergétique globale, aujourd'hui intensifiée par la fluctuation du coût du baril de pétrole qui provoque une augmentation des prix des énergies conventionnelles (électricité, etc.), afin de contrer le coût élevé et la pollution causée par les énergies conventionnelles, il est essentiel d'opter pour des sources d'énergie renouvelables, en particulier l'énergie solaire.

Cette énergie propre peut être exploitée de manière efficace dans divers systèmes thermiques par son rayonnement, qu'elle soit directe ou diffusée dans l'atmosphère, est transformée en diverses formes d'énergie: l'énergie dérivée des aliments, l'énergie associée au mouvement, l'énergie liée à la chaleur, l'énergie exploitée pour l'électricité ou l'énergie stockée dans la biomasse, on peut classer les applications de l'énergie solaire en trois principales catégories, le chauffage et le refroidissement, la génération d'électricité et les procédés chimiques.

Dans le cadre de la prise de conscience croissante à l'échelle mondiale de l'incertitude énergétique et de la nécessité d'agir contre le réchauffement climatique, il est essentiel d'exploiter progressivement d'autres formes d'énergie renouvelables et non polluantes. Par conséquent, dans plusieurs pays, différentes formes d'énergies renouvelables jouent un rôle de plus en plus crucial dans leur composition énergétique.

D'après le rapport du Réseau Mondial d'Énergie Renouvelable (REN21), en 2013, les sources d'énergie renouvelables constituaient 13,4 % du mix énergétique de l'UE, 12,9 % de celui des États-Unis et 20 % de celui de la Chine ; la moyenne globale étant près de 19 %. [1]

En Algérie, l'essor socio-économique, la démographie croissante et l'amélioration du niveau de vie ont engendré une demande accrue en électricité et en gaz naturel, qui progresse d'environ 10 % chaque année, en moyenne, presque l'intégralité du pays bénéficie de 3000 heures d'ensoleillement chaque année. Grâce à son emplacement, l'Algérie bénéficie d'un vaste espace solaire, parmi les plus étendus au monde. [2]

L'essor récent des systèmes thermiques basés sur les énergies renouvelables a engendré une multitude de recherches et de résultats dans ce domaine, l'évolution constante et l'amélioration des capteurs solaires thermiques constituent une part significative de notre quotidien. Les capteurs solaires plans constituent des catégories très bénéfiques et offrent une solution pour la conversion d'énergie dans les applications thermiques.

Ce travail a pour objectif d'étudier, à travers une approche expérimentale, le développement d'un système de stockage thermique avancé destiné à améliorer les performances des capteurs solaires thermiques à double passage. L'étude se structure en deux phases principales

Une évaluation comparative en laboratoire visant à identifier la configuration la plus performante parmi quatre modèles de capteurs solaire: un capteur plan de référence, ainsi que trois capteurs équipés d'ailettes inclinées selon des angles de 30°, 45° et 60°. L'objectif était de déterminer la configuration offrant la meilleure efficacité thermique et la température de sortie d'air la plus élevée.

Une validation en conditions réelles qui consiste à exploiter, en conditions réelles (extérieur), la configuration optimale identifiée celle avec les ailettes inclinées à 45°. Cette phase visait à évaluer plusieurs paramètres clés : l'efficacité du capteur, la température de l'air en sortie, ainsi que la durée de stockage thermique. Pour renforcer les performances du système, une résistance électrique a été intégrée au capteur, ainsi qu'un échangeur de chaleur rempli de matériau à changement de phase (MCP), en l'occurrence de la paraffine. La deuxième phase de l'étude

Méthodologie et structure du travail

Pour bien mener cette étude, le travail est organisé en trois chapitres distincts :

Chapitre 1 : Revue bibliographique

Une synthèse des connaissances actuelles sur les capteurs solaires plans, incluant les avancées récentes et les travaux antérieurs dans le domaine du solaire thermique. Cette revue établit le cadre théorique et justifie les innovations proposées.

Chapitre 2 : Approche expérimentale

La description de la méthodologie expérimentale adoptée pour la conception et la réalisation du capteur solaire à air. Ce chapitre présente également les équipements utilisés, les dimensions et le schéma du montage expérimental, ainsi que les techniques de mesure et les paramètres étudiés.

Chapitre 3 : Analyse des résultats

Une interprétation approfondie des données expérimentales, comparant les performances des capteurs plans et à ailettes (30°, 45°, 60°). L'objectif est d'identifier la configuration optimale pour maximiser le rendement énergétique, tout en évaluant l'impact du stockage par MCP sur la régulation thermique.

Portée de l'étude

Cette recherche contribue à l'amélioration des systèmes solaires thermiques en proposant des solutions concrètes pour augmenter leur efficacité et leur stabilité, avec des applications potentielles dans le chauffage urbain ou agricole. Les résultats obtenus ouvrent également des pistes pour des études futures sur l'intégration de matériaux à changement de phase dans les énergies renouvelables.

Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1 Introduction

Les sources d'énergie ont une importance capitale dans l'avancée de l'évolution technologique et industrielle de notre siècle. L'augmentation de la demande en énergie chaque année justifie la nécessité d'explorer d'autres sources d'énergie alternatives, en particulier les énergies renouvelables, avec un accent particulier sur l'énergie solaire.

L'énergie solaire correspond à l'énergie émise par les radiations solaires, cette énergie est la source de toutes les formes de production énergétique, elle est classée parmi les énergies renouvelables et est suffisante pour être convertie en d'autres formes comme exemples d'énergie, on peut citer la chaleur et l'électricité.

Actuellement, le transfert thermique est considéré comme l'une des caractéristiques les plus importantes des capteurs solaires. L'objectif principal de cette recherche est d'augmenter l'efficacité des capteurs solaires afin de rendre leur utilisation économiquement viable, la majeure partie des recherches se concentre sur l'amélioration des capteurs solaires en termes de performance thermique, prenant en compte tous les facteurs qui affectent leur fonctionnement, l'optimisation des performances thermiques des capteurs solaires se base sur un ensemble de méthodes notamment le choix de formes adéquates et de paramètres de conception tels que l'épaisseur du canal, le choix de la matière absorbante, la position de l'absorbeur et le simple ou double vitrage.

I.2 Capteur solaire

Le capteur ou le collecteur solaire plan est un dispositif d'échange thermique qui transforme l'énergie solaire en chaleur de haute température, cette chaleur issue de sa transformation est exploitable pour diverses applications thermiques, telles que le chauffage de l'eau domestique et des espaces ou encore le séchage de produits agricoles, leur mode d'opération repose sur le phénomène de l'effet de serre qui se produit entre la plaque transparente et l'absorbeur chaque élément contribue de manière significative à la conversion possible de l'énergie solaire en rayonnement.

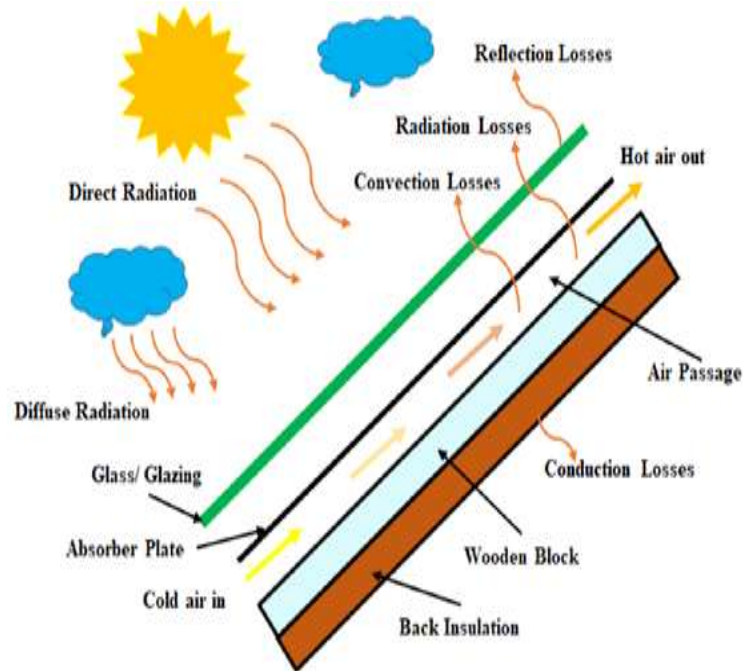


Fig.I. 1: Chauffage solaire à air [3]

I.3 Différents types d'un capteur solaire thermique plan

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques, allant des principaux aux plus avancés, chacun étant conçu pour un usage spécifique.

I.3.1 Capteurs plans non vitrés

Sont des appareils solaires thermiques employés pour réchauffer un fluide caloporteur (habituellement de l'eau ou de l'air) sans la nécessité d'une vitre protectrice, on les utilise essentiellement dans des applications de chauffage à faible température, telles que le réchauffement de l'eau pour les piscines ou le chauffage de l'air dans les systèmes de ventilation. Ils sont moins chers à produire et à mettre en place que d'autres types de capteurs solaires.



Fig.I. 2: Capteurs plans non vitrés

I.3.2 Capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont des dispositifs solaires thermiques conçus pour capter et diffuser l'énergie solaire à un fluide de transfert thermique (eau, air ou antigel), tout en maintenant des températures plus élevées que les capteurs non vitrés grâce à une isolation supérieure. Le vitrage avant du capteur aide à minimiser les pertes thermiques par convection et rayonnement, ce qui optimise la performance énergétique du système, on les emploie souvent pour produire de l'eau chaude domestique et pour réchauffer les bâtiments, la production d'eau chaude et d'autres usages thermiques.

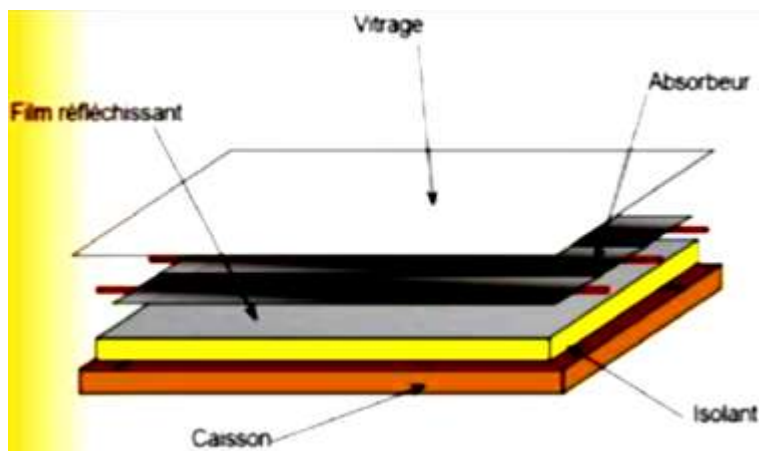


Fig.I. 3: Capteur plan vitré [4]

I.3.3 Capteur solaire plan à eau

Les capteurs solaires thermiques à eau utilisent à transformer l'énergie solaire en chaleur, en faisant passer de l'eau ou un fluide caloporteur au travers de tubes en boucle fermée. Pour optimiser leur efficacité, les capteurs thermiques à eau sont constitués de tubes en circuit fermé qui contiennent de l'eau ou, plus souvent, un liquide caloporteur.

Ces capteurs sont utilisés dans les systèmes de chauffage d'eau solaires individuels pour générer de l'eau chaude d'usage de façon durable en exploitant l'énergie solaire.

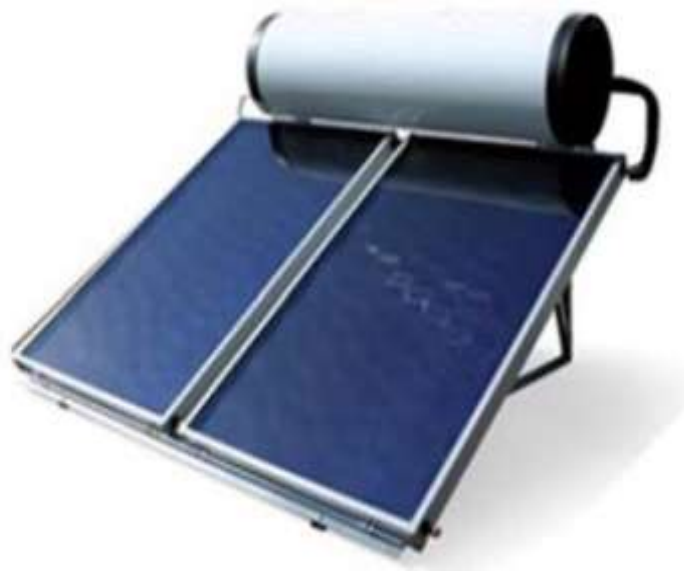


Fig.I. 4: Capteur solaire plan à eau

I.3.4 Capteur solaire plan à air

Les capteurs solaires plans transforment l'énergie solaire captée par rayonnement en énergie thermique utilisable grâce à un fluide de transfert thermique en circulation qui transporte cette énergie par convection à travers la surface d'échange thermique. Un capteur solaire plan à air constitue un dispositif qui capte l'énergie solaire, afin de la transformer, en utilisant de l'air, pour son application dans le chauffage d'un local ou le séchage d'un produit.

I.4 Absorbeur

L'élément clé du capteur solaire est l'absorbeur, il s'agit d'une surface composée d'un corps noir qui capte le rayonnement solaire global à courtes longueurs d'onde et le transforme en chaleur. [5]

En général, il s'agit d'un corps noir qui capte l'ensemble des rayonnements dans le spectre visible, ultraviolet et une infime portion de l'infrarouge, un absorbeur devrait présenter les caractéristiques suivantes : un coefficient d'absorption favorable, une conductivité thermique efficace et une bonne ténacité à la corrosion. [6]

I.5 Conditions de fonctionnement pour le capteur solaire

On observe que l'optimisation du rendement des capteurs solaires est tributaire des conditions météorologiques et des méthodes mises en œuvre, ces éléments sont significatifs dans les recherches concernant le collecteur. On peut dériver les conditions suivantes:

- Flux solaire incident** : le flux solaire global qui arrive est la source d'énergie majeure pour l'opération du capteur; sa valeur fluctue entre 0 et 1200 W/m².

- L'angle d'inclinaison** : cet angle varie de 35° à 45°, ce critère aide à maximiser le rayonnement et garantit une diffusion optimale de la chaleur dans le flux d'air.

- Positionnement du capteur** : l'orientation vers le sud, sans ombre durant la journée, est privilégiée pour maximiser la capture du rayonnement solaire.

- Dimension du collecteur** : mesure 2 m de long et 1 m de large ; les scientifiques ont observé que cette dimension assure une distribution uniforme des températures à l'extérieur.

- Section de circulation d'air (lame d'air)** : habituellement de 5cm ou 10cm entre l'absorbeur et la vitre, elle facilite le flux d'air tout en permettant l'ajout d'obstacles tels que des chicanes.

- Les barrières (obstacles)** : ce sont des structures métalliques disposées sur l'absorbeur lisse ou sur la plaque transparente. Il s'agit de perfectionner la gestion du flux

d'air et d'aider à optimiser les performances thermiques et dynamiques du collecteur.

- **Matériau de stockage** : l'usage de la chaleur latente et sensible d'un matériau de stockage thermique vise à utiliser l'énergie durant les heures sans soleil par exemple sable, pierre et MCP.

- **Ventilateur** : contrôle de l'air ambiant à l'intérieur pour la convection forcée qui joue un rôle crucial dans le transfert thermique.

- **La peinture noir mat** : le recours à une peinture noir mat permet d'obtenir des valeurs considérables pour le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ε de l'absorbeur.

I.6 Étude bibliographique

Plusieurs chercheurs ont recommandé d'introduire une rugosité artificielle sur la surface de l'absorbeur afin d'optimiser le transfert thermique dans les capteurs solaires à air. De nombreux chercheurs précurseurs dans ce domaine mènent des expériences en employant diverses méthodes. Les rugosités géométriques présentes sur la surface de l'absorbeur sont étudiées. Ces conceptions présentent les meilleures propriétés de transfert thermique, mais elles s'accompagnent également de pertes d'énergie.

Foued Chabane et al ont mené une étude expérimentale sur l'efficacité thermique d'un capteur solaire à air à flux unique équipé de cinq ailettes. Ils ont employé des ailettes longitudinales sur la face inférieure de la plaque de l'absorbeur afin d'accroître l'échange thermique sur la base de données allant jusqu'en octobre 2023. Ils ont également analysé l'impact du flux massique d'air sur la température de sortie, le transfert thermique en fonction de l'épaisseur du capteur solaire et l'efficacité thermique. Des expériences ont été réalisées pour deux débits massiques d'air de 0,012 et 0,016 kg,s⁻¹. L'efficacité des capteurs solaires à air varie grandement en fonction du rayonnement solaire, du débit massique et de la géométrie de surface. Des collecteurs ainsi que l'emploi d'ailettes situées à l'arrière de la plaque d'absorbeur ont été pris en compte. Par conséquent, avec

un transfert de chaleur amélioré vers le flux d'air, l'efficacité du capteur solaire d'air a été démontrée comme étant supérieure. [7]

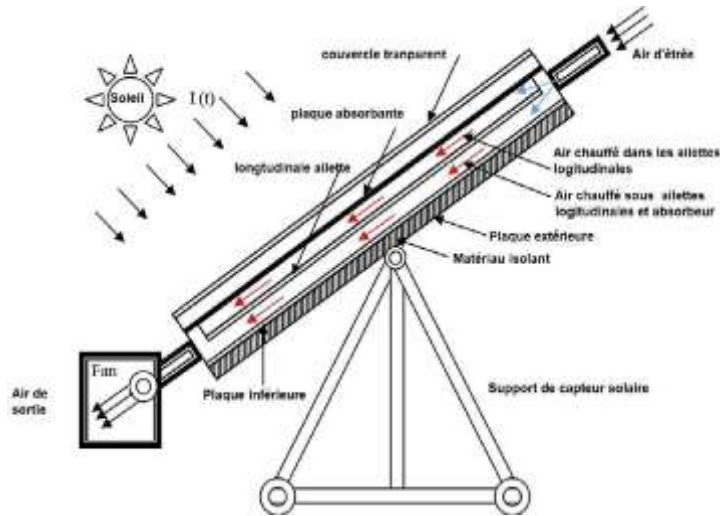


Fig.I. 5: Collecteur d'air solaire étudié [5]

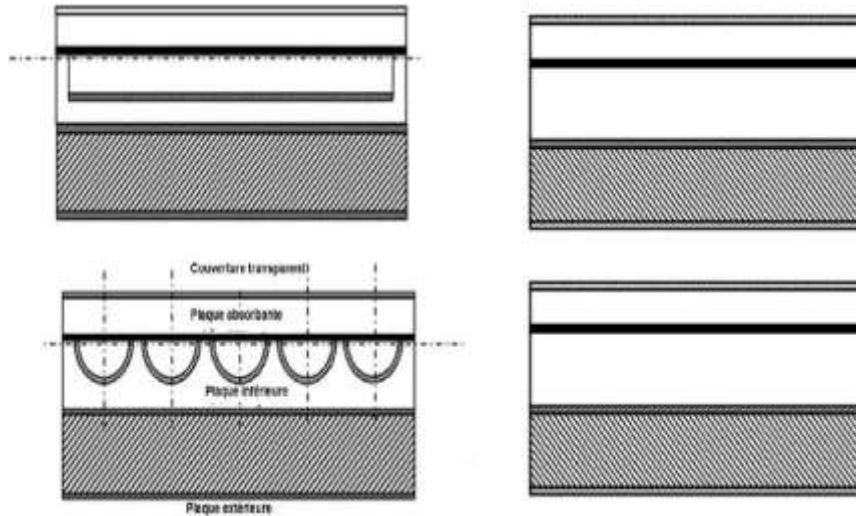


Fig.I. 6: Composition d'une boîte solaire avec et sans ailettes [7]

Mohammadi et Sabzpooshani ont envisagé l'opportunité d'optimiser l'efficacité thermique d'un chauffe-solaire à air en employant des ailettes et des chicanes sur la plaque de l'absorbeur. L'évaluation a été basée sur l'analyse de l'énergie et de l'efficacité. L'étude a été réalisée dans trois situations : une plaque d'absorbeur simple, une plaque

d'absorbeur équipée d'ailettes, et une plaque d'absorbeur avec ailettes et déflecteurs. Cette étude a découragé l'emploi d'ailettes et de chicanes lors du processus de recyclage externe à débit élevé et taux de recyclage. Toutefois, en tant que solution appropriée, il a été fortement conseillé de ne fixer les ailettes à la plaque de l'absorbeur lors du recyclage externe qu'à un débit massique élevé et un taux de recyclage étant donné. Puisqu'il se manifeste par une amélioration appréciable de l'efficacité avec une hausse négligeable des activités de pompage nécessaires. [8]

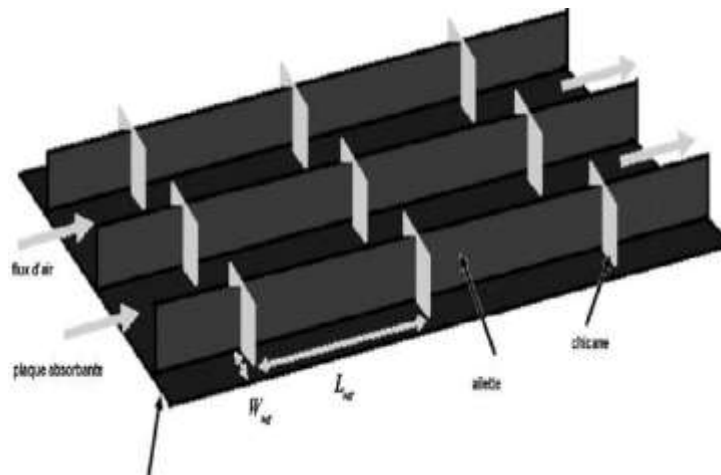


Fig.I. 7: Plaque de l'absorbeur avec les ailettes [8]

Damook, Qubeissi et al ont réalisé que l'avancé collecteur d'air solaire est couramment employé dans l'étude du séchage. Cette recherche présente un nouveau bilan énergétique stationnaire et une équation d'exergie pour un type inédit de collecteur d'air solaire à double canal, intégrant des ailettes et des matériaux à changement de phase (MCP), en accord avec les premières et deuxièmes lois thermodynamiques. Utiliser la technique de l'inversion matricielle pour résoudre les équations mathématiques du bilan énergétique. Les prévisions ont été réalisées avec des débits massiques allant de 0,01 kg/sec à 0,15 kg/sec et sous un éclairage solaire variant de 425 à 1000 W/m². On a évalué et estimé les impacts des niveaux de radiation solaire et des indices de qualité de l'air sur l'efficacité énergétique, l'efficacité exergetique ainsi que le potentiel d'amélioration. Le collecteur suggéré affiche une performance énergétique optimale de 73% à un flux

massique d'air de 0,15 kg/sec. L'exergie est à peu près de 2,5 à 4,2% pour une irradiation solaire maximale de 1000 W/m², et le potentiel d'amélioration le plus faible et le plus fort se situe entre 980 et 2287 W pour une irradiation solaire de 425 à 1000 W/m². [9]

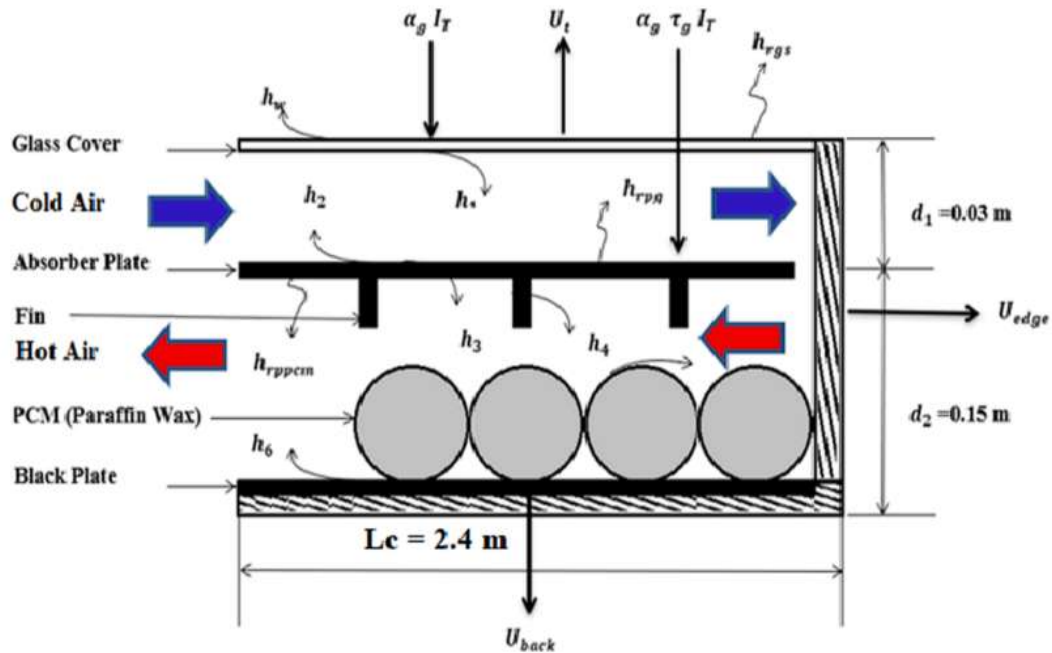


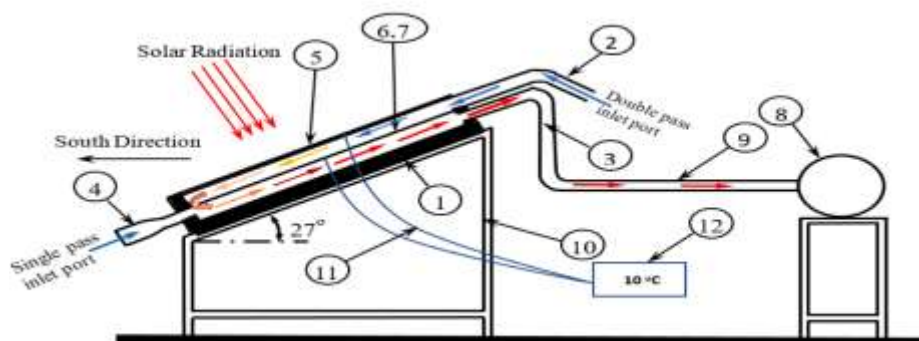
Fig.I. 8: Coefficients de transfert de chaleur du collecteur solaire [9]

Nassr Fadhil Hussein, Sabah T. Ahmed, Ali L. Ekaid ont intéressés à l'efficacité d'un réchauffeur solaire à air doté d'un absorbeur tubulaire récemment conçu avec des tubes parallèles voisins a été analysée expérimentalement à travers diverses méthodes, notamment énergétiques, exergétiques, relatives aux temps de récupération énergétique, exergé-économiques et écologiques. De plus, l'impact de l'emploi de matériaux poreux sur les performances thermiques des tubes a été examiné et mis en comparaison avec celui des réchauffeurs à air à plaque plate fonctionnant à des taux d'écoulement massique d'air de 0,075, 0,05 et 0,025 kg/s pour les cycles simples et doubles. L'analyse indique que le chauffage tubulaire présente un avantage en matière de consommation d'énergie plus important, une température de diffusion de l'air, une performance énergétique et exégétique ainsi qu'une diminution de l'énergie perdue inférieure comparativement au chauffage plat. L'emploi de matières poreuses et de circuits doubles contribue à rehausser

la température de l'air sortant de 3,4 °C pour le système de chauffage à air tubulaire et de 17,7 °C pour le système de chauffage à air plat, avec un débit de 0,025 kg/s. De plus, le recours à des matériaux poreux dans un système de chauffage tubulaire à 0,075 kg/s a permis d'améliorer l'efficacité énergétique de 3,5% et 8,9% pour le passage simple et double, respectivement, et l'efficacité exégétique de 8,2% et 0,9% pour le passage double. Le chauffage tubulaire a une capacité de pompage d'air plus élevée que le chauffage plat, cependant, cette valeur est assez basse pour ne pas influencer l'énergie nette utile du tube. En définitive, les chauffe-air tubulaires surpassent en efficacité les chauffe-air plats en termes de critères tels que le temps de récupération d'énergie, le coût énergétique, l'économie d'exploitation et l'impact environnemental. [10]



(a)



(b)

Fig.I. 9: Installation expérimentale : (a) photographie de l'installation expérimentale et (b) représentation schématique des SAH [10]

Ganesh Kumar Poongavanam, Vigneswaran et al ont mené une recherche vise à une enquête expérimentale sur la performance d'un chauffe-air solaire utilisant des matériaux à changement de phase en combinaison avec des plaques absorbentes en V-Ondulée. Cette approche de grenailage est appliquée pour interrompre l'épaisseur de la couche limite du matériau de la plaque d'absorption, ce qui augmentera l'absorbance du matériau. Cette étude intègre l'analyse de quatre plaques d'absorbants distinctes, à savoir (i) Plaque V- Ondulée. (ii) Plaque V- Ondulée. Avec sablage, incorporant MCP (iii) Plaque V- Ondulée. Avec sablage, incluant NEPCM (0,6 %) (iv) Plaque V- Ondulée.

Avec sablage, incluant NEPCM (0,9 %). Dans cette étude, la cire de paraffine a été choisie comme MCP de base, et les MWCNT ont été dispersés dans le MCP de base avec différentes fractions massiques. Le matériau à changement de phase nano-amélioré avec une concentration de 0,9 % en poids a montré que la chaleur latente de fusion et de solidification a connu une augmentation significative. Cette amélioration a entraîné une augmentation maximale de 12,5 % pour la fusion et de 8,2 % pour la solidification, atteinte à 0,9 % de MWCNTs par rapport à la cire de paraffine. Les rendements exergétiques moyens de la plaque V- Ondulée atteignent une efficacité de 1,023 %, la V-Ondulée avec MCP enregistre 1,357 %, la V- Ondulée avec 0,6 % de NEPCM atteint 1,698 %, et la V- Ondulée avec 0,9 % de NEPCM atteint la plus haute efficacité à 2,167 %. L'amélioration significative de l'efficacité exergétique observée dans les configurations NEPCM avec des fractions volumiques de 0,6 % et 0,9 % est principalement attribuée à deux facteurs clés, à savoir une conductivité thermique améliorée et de meilleures propriétés de transfert de chaleur. L'indice de durabilité maximal pour le design en V-Ondulée avec 0,9 % de NEPCM se situe dans la plage de 1,014 à 1,037. La valeur moyenne de "Nu" de 27,5 a été obtenue dans des conditions de débit massique de 0,02 kg/s et l'ajout de 0,9 % de MWCNTs dispersés dans de la cire de paraffine. [11]



Fig.I. 10: (a) Avec et sans système TES (b) V ondulé avec système TES (c) Tube rempli de MCP [11]

Abdulkareem, A. H., & Al-Farhany, K. A. (2024) ont effectué dans cet article l'évolution de manière expérimentale du rendement d'un chauffe-air solaire (CAS) avec un absorbeur tubulaire tout récemment élaboré, incluant des tubes adjacents parallèles connus sous le nom de chauffe-air solaire tubulaire (CAST), du point de vue énergétique, exergetique et écologique. Une comparaison des performances entre le T SAH et le chauffe-air solaire à plaque plate (F SAH) est effectuée en fonction de différents débits massiques d'air (MFRs) de 0,075, 0,05 et 0,025 kg/s. Les essais pour les deux réchauffeurs sont réalisés en se servant de deux configurations de circulation de flux : le passage simple (SP) et le passage double (DP). Les données indiquent que l'usage du SP T SAH en lieu et place du SP F SAH permet d'atteindre une amélioration optimale des efficacités thermiques et exergetiques de 133 % et 330 % respectivement, à un débit massique d'air de 0,025 kg/s. On observe que l'accroissement du flux massique d'air entraîne une hausse notable de l'efficacité thermique, tandis qu'il provoque une diminution de l'efficacité exergetique. Même si T SAH est plus performant que F SAH, le gain observé avec DP F SAH en utilisant la configuration de flux DP est supérieur à celui de DP T SAH. [12]

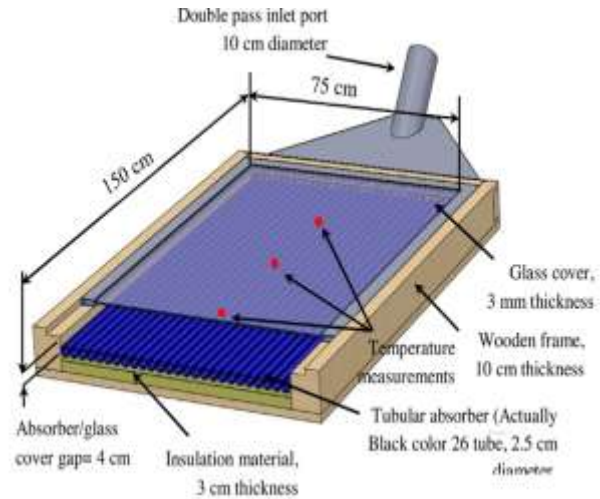


Fig.I. 11: Absorbeur du système T SAH.

b) Vue 3D de l'absorbeur tubulaire [12]

Hu, Y., Heiselberg, P.K., Johra, H., et Guo, R (2020) ont réalisé que face à un ensoleillement variable, il est difficile d'obtenir des températures de l'air plus hautes sur une longue durée en recourant aux chauffe-air solaires (CAS). Cette recherche porte sur l'amélioration du transfert thermique d'un SAH en utilisant un absorbeur doté d'un matériau à changement de phase (MCP). L'absorbeur proposé dans le SAH est en feuille d'aluminium et il dispose de tubes multifonctionnels de stockage de chaleur, inclinés et organisés en disposition alternée, encapsulés avec un MCP. Des tests ont été effectués en employant de la paraffine commerciale comme matériau à changement de phase (MCP) à des flux d'air variables de 0,01 kg/s, 0,02 kg/s et 0,03 kg/s. Les résultats sont mis en comparaison avec un système d'absorption à un seul absorbeur. Le système de stockage de chaleur (SAH) génère une température aérienne et une efficacité énergétique supérieure à celle de l'absorbeur simple. Pour les absorbeurs intégrés utilisant MCP et les simples, la température de l'air a atteint respectivement 64 °C et 58 °C lorsque le débit d'air était de 0,01 kg/s. À une vitesse de 0,03 kg/s avec MCP, le coefficient moyen de

transfert thermique du SAH est de 27,7 W/m K, soit 252 % supérieur à celui de l'absorbeur unique. Le SAH proposé présente une meilleure efficacité énergétique grâce à une absorption d'énergie utile plus importante et une diminution de la perte de chaleur. Pour le système d'absorption de chaleur (SAH) avec l'absorbeur suggéré et l'absorbeur standard, le rendement énergétique optimal est respectivement de 77,7 % et 62,5% à un débit de 0,03 kg/s. [13]



Fig.I. 12: Vue expérimentale du SAH actuel [13]

Hikmet Esen a étudié expérimentalement l'analyse de l'énergie et de l'exergie d'un chauffe-air solaire à double flux avec différents obstacles sur les plaques absorbentes. Des tests de performance des collecteurs ont été effectués à Elazığ, Turquie, en utilisant des thermocouples de type T pour évaluer les températures de l'air et ambiantes. L'introduction d'obstacles dans les conduits aérobiens s'est avérée être un élément essentiel pour optimiser l'efficacité du collecteur, selon les résultats. Toutefois, l'efficacité du collecteur est fortement affectée par la forme, les dimensions, la direction et la disposition des obstacles. Pour le Type I, le Type II, le Type III et le Type IV, les

taux de rendement moyens étaient respectivement de 38 %, 43 %, 45 % et 41 %. Le Type-III, qui représente une forte turbulence, a surpassé le Type-II, qui correspond à une turbulence modérée, le Type IV, caractérisé par peu de turbulence et le Type I, qui ne présente aucune turbulence (sans obstacles). L'efficacité optimale est le niveau moyen du collecteur sous toutes les conditions d'opération. La recherche a aussi démontré que l'efficacité du dispositif de collecte s'accroît avec l'augmentation du flux massique d'air et de la radiation solaire I. L'analyse d'exergie a révélé que le Type I présentait la plus forte perte d'exergie (74,35%), alors que le Type III, avec chaque plaque d'absorbeur décalée, affichait la plus faible (39,03%). L'efficacité du second principe, ou l'efficacité exégétique de chaque SAH, a été déterminée. En général, le plus bas est obtenu dans le Type I tandis que le maximum se retrouve dans le Type III. [14]

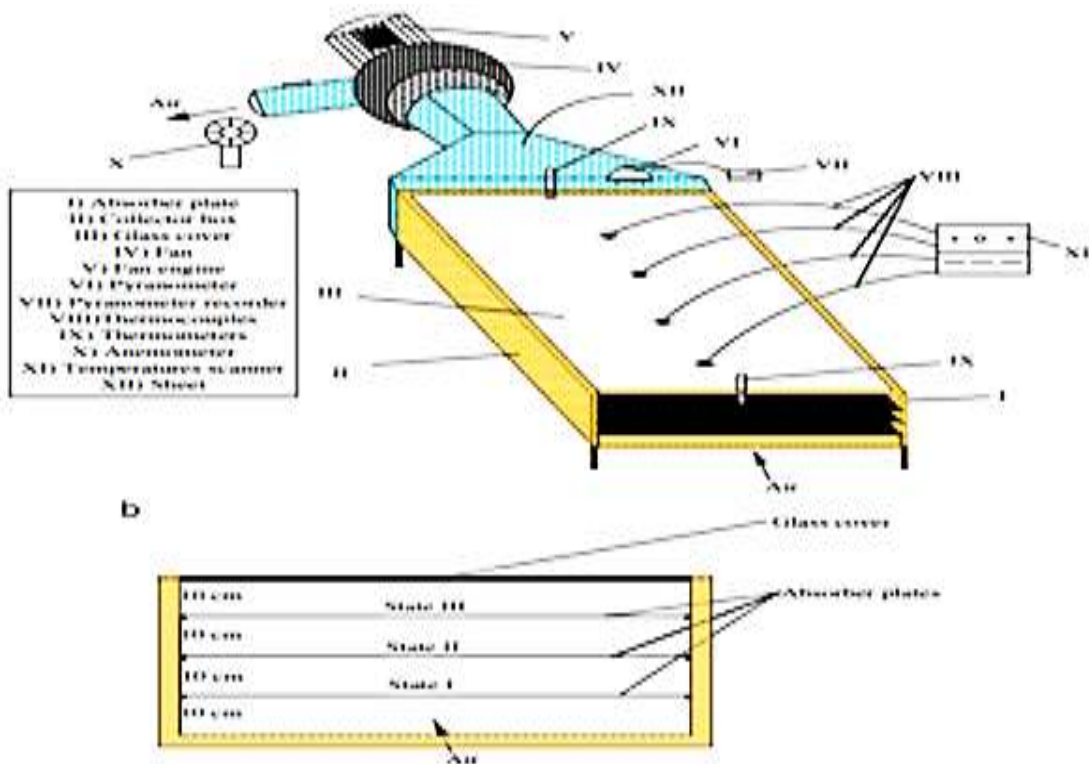


Fig.I. 13: Assemblage schématique du système SAH et vue de face du collecteur [14]

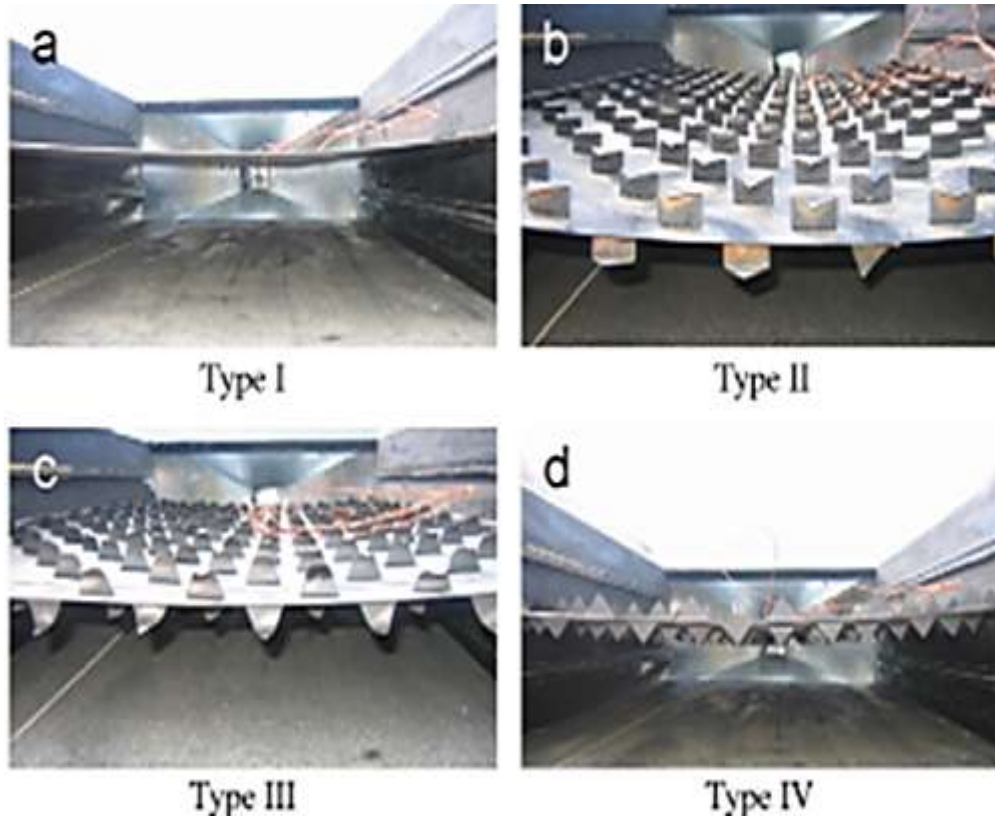


Fig.I. 14: Types de plaques d'absorption [14]

Jalal M. Jalil, Rasha F. Nothim, and Mustafa M. Hameed ont fait l'étude numérique d'un chauffe-air solaire à double passage avec absorbeur à ailettes ondulées, les ailettes sont fixées aux surfaces supérieure et inférieure de l'absorbeur. Trois arrangements d'ailettes ondulées (3, 5 et 7 ailettes) ont été étudiés avec un absorbeur plan en modifiant l'intensité du rayonnement solaire (500, 600, 700 et 800 W/m²), le débit massique d'air étant de 0,009 kg/s. Les résultats des absorbeurs à ailettes ondulées sont comparés avec ceux des absorbeurs plans et l'amélioration de l'efficacité thermique a atteint 57 %, 65 % et 70 % pour 3 ondulations (I = 800 W/m²), 5 ondulations (I = 800 W/m²) et 7 ondulations (I= 400 W/m²) respectivement. [15]

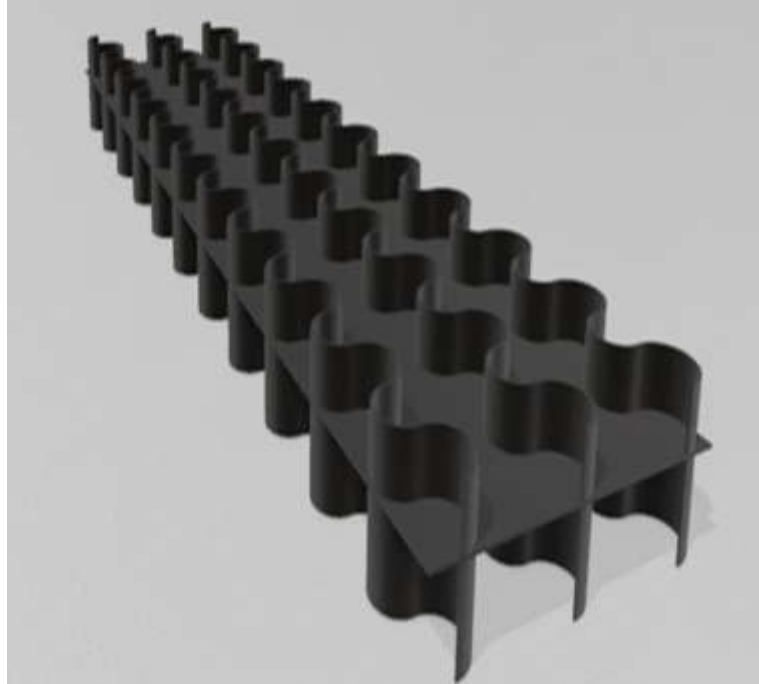


Fig.I. 15: Géométrie générale des ailettes ondulées fixées des deux côtés de l'absorbeur (supérieur et inférieur) [15]

BAISSI Mohamed Tahar (2019) dans son étude, il a exploré l'amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air en mettant en usage une rugosité artificielle sur la plaque d'absorption. Il a mené des études tant numériques qu'expérimentales dans le but d'approfondir la connaissance des propriétés de transfert de Chaleur et flux de fluides sont observés en présence de chicanes en forme d'aile delta courbées sur la longueur, utilisées pour créer une rugosité artificielle. [16]



Fig.I. 16: Configuration de l'absorbeur avec des chicanes en forme d'aile delta courbée longitudinalement [16]

Ozgen et al ont intéressés à un système d'intégration d'une plaque absorbante en aluminium dans le canal à double entrée d'un capteur solaire à air plan a été examiné. On a créé trois types distincts de plaques absorbantes, à savoir le type I (boîtes en zigzag décalées), le type II aligné dans l'ordre et le type III sans boîtes sur la plaque absorbante référez-vous à la Figure 1.35. Des essais ont été réalisés pour des flux massiques d'air de 0,03 kg/s et de 0,05 kg/s. Les données indiquent que le meilleur rendement a été enregistré pour le type I à 0,05 kg/s. Cette méthode optimise considérablement l'efficacité du collecteur en améliorant la vitesse du fluide et en augmentant le coefficient de transfert thermique entre la plaque absorbante et l'air. [17]

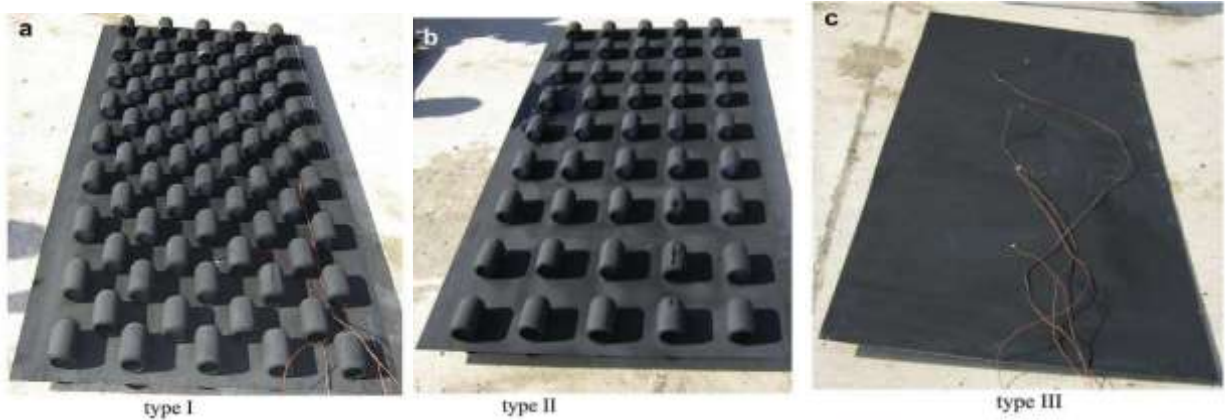


Fig.I. 17: Types de plaques absorbantes et vue des plaques absorbantes dans la boîte collectrice [17]

A. Labed et al ont examiné une étude théorique et expérimentale a été conduite sur les performances d'un capteur solaire plan à air, en utilisant un nouveau type de rugosité artificielle. Ils ont suggéré un modèle avec des rugosités artificielles disposées dans le flux d'air en mouvement afin de créer une Flux turbulent entre le dispositif d'absorption et la plaque du bas. Ils ont découvert que l'installation de ce genre de chicanes accroît le transfert thermique.

Il est cependant indéniable que ces obstacles entraînent des pertes de charge par rapport à un canal lisse. [18]

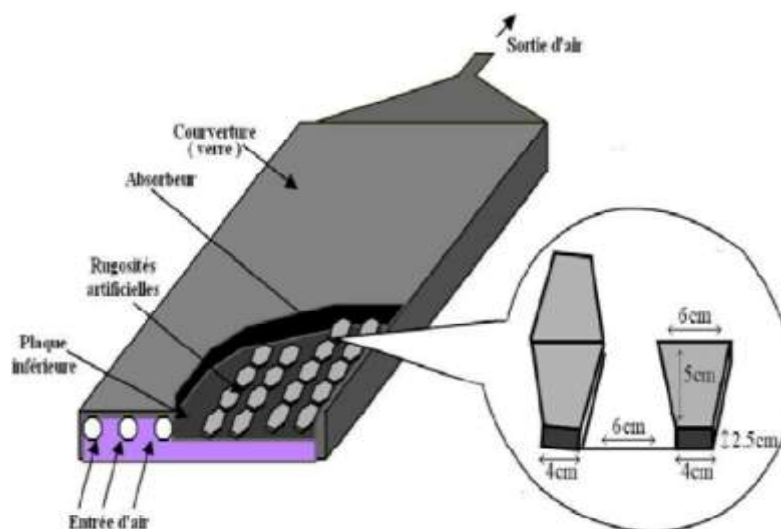


Fig.I. 18: Modèle expérimental en schéma [18]

Selçuk Darici et Anil Kilic ont présenté une étude expérimentale pour évaluer les performances thermiques des collecteurs solaires d'air dotés de plaques d'absorbeur trapézoïdales ondulées et plates. La recherche a été effectuée à trois vitesses de courant d'air distinctes, dans le cadre des conditions météorologiques de Konya, en Turquie. L'intention était d'examiner l'impact du flux d'air et de la configuration de la surface de l'absorbeur sur la performance thermique. Les observations ont révélé que le dispositif de captage avec la plaque d'absorbeur ondulé trapézoïdal présentait une performance thermique quotidienne moyenne de 14 à 21% plus élevée comparativement au dispositif avec la plaque d'absorbeur plane, ceci étant dû à une zone de transfert thermique plus étendue et des effets de turbulence accrus dans l'écoulement. Le panneau de collecte, qui inclut une plaque d'absorbeur ondulée à forme trapézoïdale, présentait également une performance supérieure en ce qui concerne l'échauffement de l'air à l'intérieur du collecteur. Le rendement thermique journalier moyen du capteur solaire d'air avec plaque d'absorbeur trapézoïdale ondulée a atteint 63% pour un flux d'air de 0,044 kg/s. La recherche a déterminé que les panneaux solaires aériens dotés de plaques d'absorption trapézoïdales ondulées pourraient être de source thermique significative pour le réchauffement des espaces et le séchage de différentes productions agricoles à des températures réduites. [19]

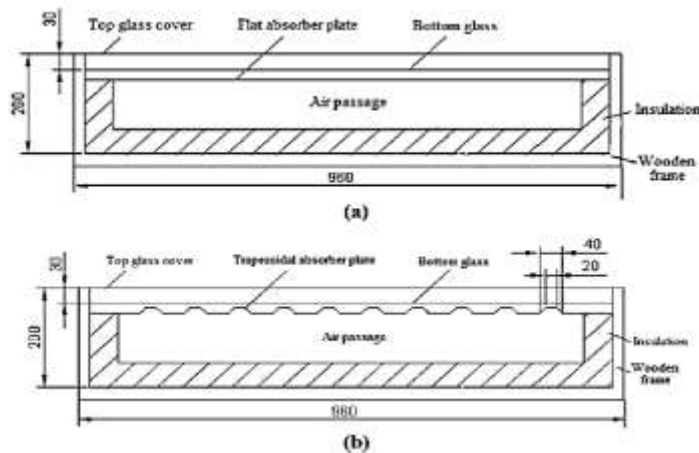


Fig.I. 19: Vues en coupe des capteurs avec plaque plate, ondulée et trapézoïdale [19]

Ali Daliran, Yahya Ajabshirchi ont entrepris une étude un échangeur de chaleur de type collecteur à air plat capte l'énergie solaire radiée et la convertit en chaleur. On a examiné théoriquement et expérimentalement l'efficacité thermique de deux types de capteurs solaires, le modèle C1 (sans ailettes) et le modèle C2 (avec ailettes), tous les deux dotés d'une surface de 1 mètre carré, dans des conditions de convection forcée. Pour générer des turbulences dans le courant d'air, des ailettes de forme rectangulaire sont attachées à la plaque arrière du conduit d'air. Pour évaluer la température atmosphérique, 17 détecteurs thermiques (LM35) ont été élaborés, parmi lesquels 11 sont installés sur le panneau absorbant et les 6 autres sur le panneau arrière, pour produire le flux d'air dans cette recherche, un ventilateur avec un débit massique constant de 0,033 kg/s a été employé. Les observations indiquent que l'usage d'ailettes dans le courant d'air non seulement diminue le nombre de Nusselt de 19,67 à 16,23, mais provoque aussi une hausse du coefficient de transfert thermique de la plaque absorbante vers le flux d'air grâce à la réduction du diamètre hydraulique et à la création de turbulences dans le flux d'air, diminuant ainsi les déperditions thermiques globales et augmentant la température de l'air sortant. Les rendements thermiques estimés à 30% et 51% pour les modèles expérimentaux avec et sans ailerons, ainsi que de 33% et 55% pour les recherches théoriques, paraissent globalement cohérents. [20]

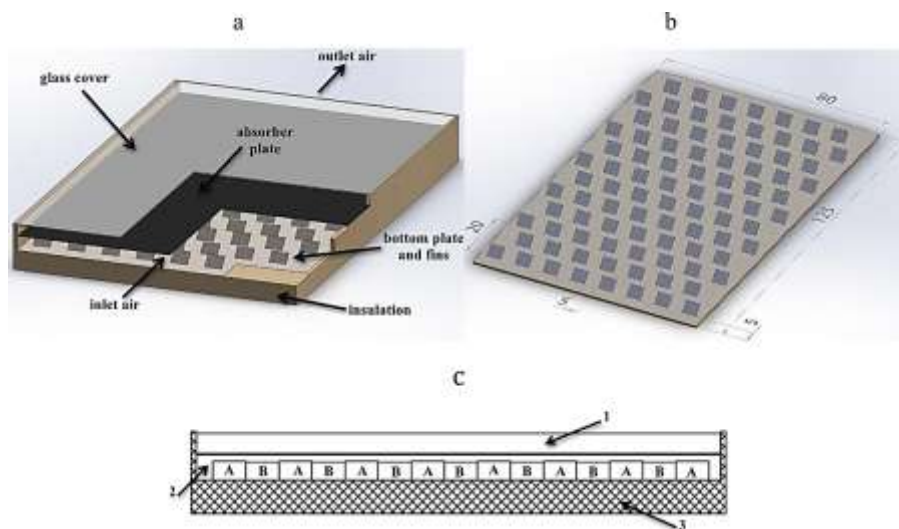


Fig.I. 20: Principales parties du collecteur de type C1 configuration des ailettes sur la plaque arrière [20]

Rahul Kumar a, Sujit Kumar Verma b, g, Naveen Kumar Gupta b ont réalisé la texture de la plaque absorbante peut augmenter l'efficacité du chauffage solaire à air. Pour optimiser l'efficacité des chauffages solaires d'air en forme triangulaire, cette recherche présente les conclusions d'une analyse comparative entre l'utilisation de nervures rugueuses et lisse sur des plaques absorbantes. Les deux techniques emploient une peinture noire intégrant des nanoparticules de graphène, qui est appliquée sur des plaques absorbantes. On a eu recours à des techniques numériques et expérimentales pour examiner l'impact de la rugosité de surface sur le coefficient de friction et les performances en termes de transfert thermique. Modélisation 3D effectuée grâce au logiciel ANSYS 14.5 et à l'aide du modèle RNG Turbulence, k- ϵ pour traiter les équations maîtresses en situation de turbulence. Selon les données expérimentales, il a été démontré que les plaques lisses transforment la chaleur en travail utile avec une efficacité moyenne de 4,82 et 4,46 fois supérieure à celle des plaques rugueuses. Dans le chauffage à air solaire, la longueur du passage atténue le dégradé de température observé dans les données de simulation. L'impact de la rugosité des nervures en V sur les propriétés du transfert thermique et du coefficient de friction est considérablement plus important que la fluctuation du rapport de rugosité (P/e) et du nombre de Reynolds (Re). Des résultats améliorés ont été confirmés grâce à des observations expérimentales soutenues par la modélisation et la simulation, indiquant que la rugosité de la surface de l'absorbeur de tuyau triangulaire joue un rôle déterminant. [21]

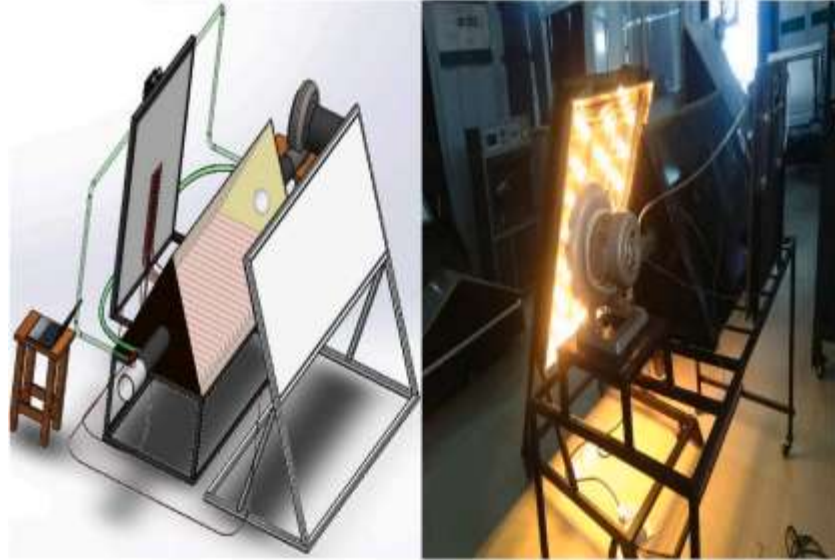


Fig.I. 21: Schéma TSAH et disposition expérimentale [21]

Arvind Kumar Singh, Abhishek Saxena ont fait cette recherche a pour objectif d'analyser les performances thermiques d'un chauffage à air solaire en utilisant deux types de plaques absorbantes distinctes dans deux configurations différentes. Les expérimentations ont eu lieu dans le contexte climatique estival de la cité de Moradabad, en Inde. En somme, approximativement quatre modèles de chauffage à air solaire ont été élaborés. Des essais expérimentaux ont été conduits en employant des absorbeurs à plaques de graisse et des absorbeurs à configuration en dents de scie (avec et sans matériaux à changement de phase testés) afin d'évaluer leur rendement thermique. Il faut mentionner que trois débits massiques distincts (0,01 kg/s, 0,02 kg/s et 0,03 kg/s) ont été mis en œuvre pour examiner le coefficient de transfert thermique, l'efficacité instantanée et l'efficacité quotidienne. L'analyse indique que le modèle 4 surpasse tous les autres testés, présentant une température moyenne d'échappement approximativement de 46 °C après le coucher du soleil. À un débit de 0,03 kg/s, nous obtenons une efficacité quotidienne moyenne améliorée d'environ 63%. Les systèmes à stockage d'énergie thermique de type plaque dentelée sans matériaux à changement de phase montrent une efficacité supérieure d'environ 23% par rapport aux systèmes traditionnels, et environ 19% supérieure par rapport aux SAH classiques exploités avec des matériaux à

changement de phase. Globalement, le système optimisé est adapté aux applications à température intermédiaire, comme le séchage agricole ou le chauffage intérieur. [22]

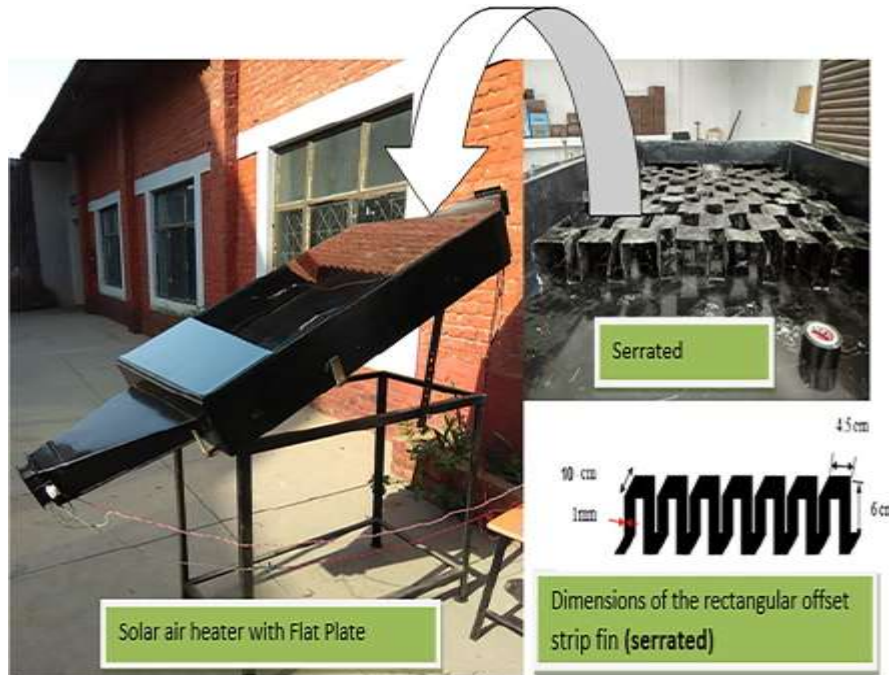


Fig.I. 22: SAH avec deux absorbeurs différents [22]

Ayaraman Muthukumaran, Ramalingam Senthil ont donné que les dispositifs solaires à plaque plate convertissant l'énergie sont des systèmes de simplicité, cependant leur rendement est plutôt faible dû au transfert thermique limité entre l'absorbeur et l'air. L'augmentation de la surface de contact côté absorbeur et de la turbulence locale de l'air constitue une méthode passive d'amélioration du transfert thermique. Cet article scientifique introduit un tube en cuivre à double fonction qui joue le rôle de surface d'absorption prolongée et de stockage thermique. Les absorbeurs sont élaborés en tant que bobines hélicoïdales et tubes droits à espacement régulier, garnis de glycérine et de paraffine de niveau commercial. On a comparé l'efficacité thermique et exergetique d'une configuration modifiée de chauffage solaire d'air à celle d'un collecteur classique doté d'un absorbeur standard, sans stockage d'énergie. Les données expérimentales indiquent

que les dispositifs solaires en tube hélicoïdal à double flux, utilisant de la paraffine, surpassent les collecteurs traditionnels à tube droit en termes d'efficacité thermique. Sous paraffine, le rendement thermique et le rendement exergetique de la bobine hélicoïdale s'élèvent respectivement à 29,86% et 1,11%, avec un débit d'air de 0,0076 kg/s et une température maximale de l'air atteignant 59 °C. L'air conserve sa température pendant une période brève dans l'absorbeur de stockage thermique, même postérieurement au coucher du soleil. Ainsi, l'incorporation du stockage thermique dans le capteur solaire permet de conserver la chaleur durant les périodes sans soleil, ce qui renforce la capacité de stockage d'énergie et assure une température uniforme sur l'absorbeur. De plus, les analyses environnementales et économiques assurent un délai de récupération bas d'environ 2,4 ans pour les collecteurs à tubes hélicoïdaux intégrés MCP. Ce design simple et peu coûteux de l'absorbeur est avantageux pour différentes utilisations dans le séchage solaire et le chauffage des espaces. [23]

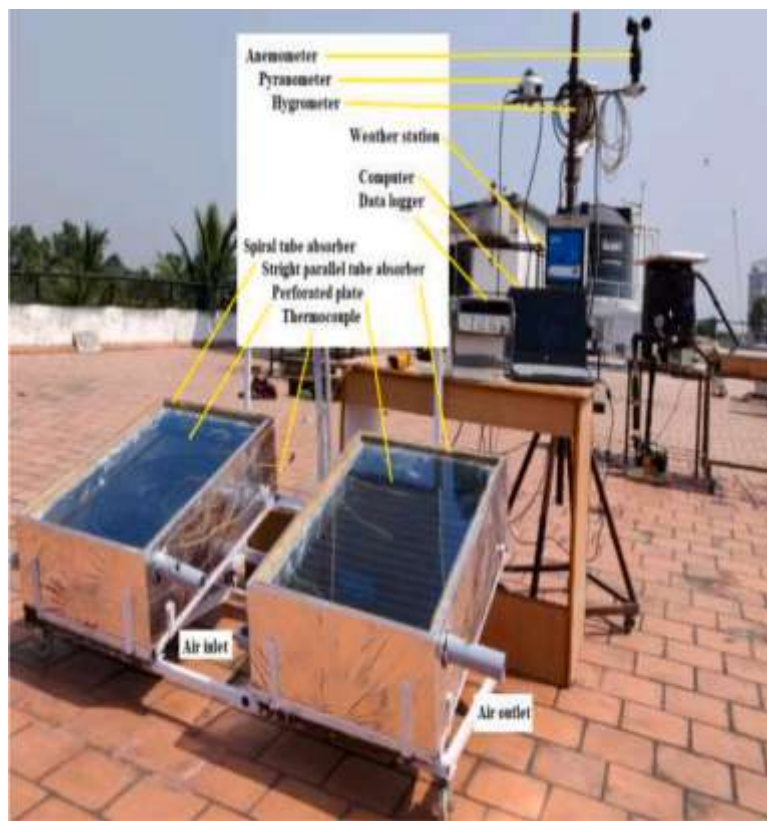


Fig.I. 23: Configuration expérimentale du collecteur solaire [23]

Paramasivam Balakrishnan, Elumalai Vengadesan ont réalisé que les systèmes de chauffage d'air solaires (SAH) transforment l'énergie solaire en chaleur et sont employés dans le secteur de la transformation alimentaire ainsi que dans les solutions de chauffage pour les espaces commerciaux, du fait que l'énergie solaire est sans coût. Dans cette recherche expérimentale, les performances thermiques du chauffage solaire à air ont été progressivement optimisées grâce à l'utilisation de divers éléments de rugosité sur l'absorbeur. Cette étude se penche sur les coins triangulaires dans trois configurations (linéaire, en serpent et en grappe). Une comparaison des performances thermiques a été réalisée entre une SAH et un absorbeur classique. On a observé une hausse maximale de 19 °C de la température de l'air pour les SAH qui présentent une forme en coin dans un diagramme. L'absorbeur des éléments rugueux à structure graphique atteint une température de surface de 76,8°C et présente un coefficient moyen de déperdition thermique de 4,43 W/m²·K. Le recours à des coins à structure groupée pour l'absorption de chaleur utile augmente celle-ci de 33 %, 17,9 % et 6,6 % par rapport au SAH utilisant des coins à structure simple, en ligne et en serpent. L'efficacité thermique maximale et l'efficacité exergétique maximale de la SAH utilisant des éléments structuraux en grappes sont, respectivement, de 70,4% et 1,64%. La performance thermique moyenne des configurations en ligne, en serpentine et en grappe est supérieure de 13,3%, 25,3% et 35,6% respectivement par rapport aux SAH avec des absorbeurs traditionnels. Le modèle de la SAH suggéré affiche un indice de durabilité de 1,01 et une période de retour sur investissement plus courte, témoignant d'une viabilité économique et écologique. [24]

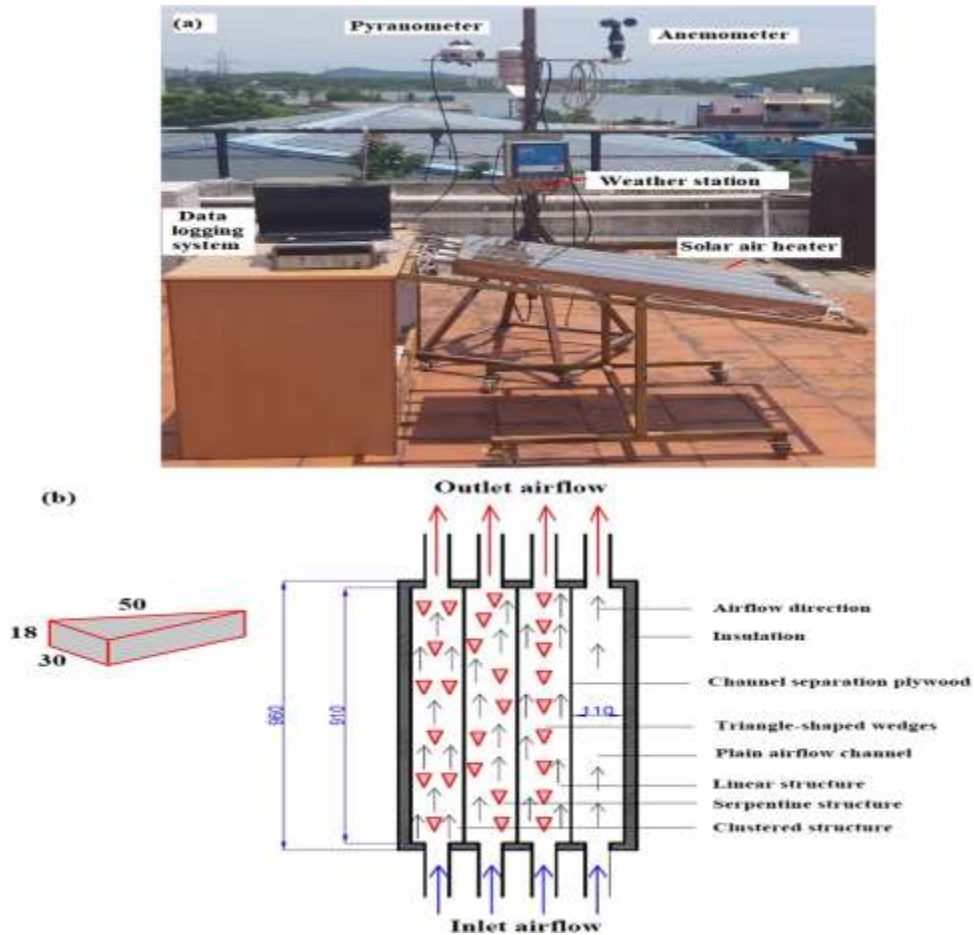


Fig.I. 24: Vue photographique de l'installation expérimentale et les détails dimensionnels du collecteur solaire et des coins [24]

I.7 Conclusion

Ce chapitre comporte deux sections. Une première section où nous avons présenté les capteurs solaires plans en illustrant leurs types et leurs fonctionnements à différentes catégories ainsi que les facteurs affectant leur rendement.

Dans la deuxième partie, nous allons résumer les travaux et les expériences menées par des recherches publiées sur les dispositifs convertisseurs des capteurs solaires plan à air avec obstacles (chicanes, ailettes, etc.) au cours des dernières années, ainsi que les principaux résultats obtenus pour améliorer les performances thermiques et dynamiques de ces capteurs solaires.

Chapitre II

Procédure expérimentale

II.1 Introduction

Le développement des énergies renouvelables représente aujourd'hui un enjeu majeur à l'échelle mondiale. Dans ce contexte, les capteurs solaires thermiques jouent un rôle croissant dans la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ces dispositifs peuvent être utilisés pour chauffer de l'eau ou de l'air, répondant ainsi à une diversité de besoins énergétiques, notamment dans les secteurs résidentiels, industriels et agricoles.

Cependant, les capteurs solaires à air présentent généralement des rendements thermiques plus faibles que ceux à liquide, en raison notamment des faibles capacités thermiques et densités de l'air. Afin de pallier ces limitations, de nombreuses études se sont orientées vers l'amélioration de la conception des capteurs, en particulier à travers la modification de la géométrie de la surface absorbante.

Parmi les stratégies adoptées, l'ajout d'ailettes sur la plaque absorbante s'est révélé être une solution efficace. En augmentant la surface d'échange thermique et en favorisant les transferts de chaleur par convection, les absorbeurs à ailettes permettent d'améliorer significativement les performances thermiques du système.

La conception de ces absorbeurs repose sur plusieurs paramètres clés, tels que le choix des matériaux, la géométrie des ailettes, leur orientation ainsi que les stratégies d'optimisation mises en œuvre. Diverses configurations ont ainsi été explorées dans la littérature afin de maximiser le transfert thermique et l'efficacité globale des capteurs solaires à air.

II.2 Présentation du dispositif expérimental

Dans ce chapitre, nous utilisons un capteur solaire à double passage qui avait fait l'objet de plusieurs travaux et que nous allons essayer de l'optimiser encore. Ce capteur sous forme d'un banc d'essai, est réalisé au laboratoire de recherche ETAP de l'université de Tlemcen.

II.2.1 Description du capteur solaire Thermique

Le capteur solaire étudié présente une forme rectangulaire avec des dimensions de 170 cm de longueur et 64 cm de largeur. Il est conçu selon une configuration à double passage de l'air, avec deux canaux distincts. Un canal inférieur et un canal supérieur séparés par une plaque absorbante centrale. L'ensemble des surfaces internes du capteur est peint en noir mat, afin d'optimiser l'absorption du rayonnement solaire et de réduire au minimum les pertes thermiques.

Pour garantir une exposition maximale au rayonnement solaire tout au long de l'expérience,

où il poursuit son échauffement au cours du second passage, avant d'être évacué.

La structure inférieure du capteur est réalisée en bois, un matériau choisi pour ses propriétés isolantes, limitant ainsi les pertes de chaleur.

et
renforcé mécaniquement par une cornière en aluminium.

L'ensemble du capteur est consolidé par

est
assurée par un second orifice placé dans la partie supérieure. Cette dernière est amovible, ce qui facilite l'installation d'un échangeur de chaleur pour des expériences complémentaires. Le capteur est également équipé de deux ouvertures circulaires en aluminium de 80 mm de diamètre intérieur, servant respectivement à l'admission et à l'évacuation de l'air.

II.2.2 Principe de fonctionnement du capteur

Le capteur solaire à air fonctionne en absorbant une partie du rayonnement solaire, convertissant cette énergie en chaleur et augmentant ainsi la température de l'absorbeur.

Le rayonnement solaire traversant la vitre et absorbe par une plaque noire (absorbeur) qui augmente sa température par effet de serre. Cette chaleur est transférée à l'air.

II.3 Étude Procédure expérimentale

L'objectif de cette expérience est d'optimiser les performances thermiques de l'absorbeur solaire. Pour ce faire, des modifications structurelles ont été apportées à la plaque d'absorption, notamment par l'intégration d'ailettes, dans le but d'améliorer l'efficacité thermique globale et les caractéristiques de transfert de chaleur. En effet, la pose d'ailettes sur la surface absorbante est reconnue comme l'une des méthodes les plus efficaces pour accroître les échanges thermiques entre l'absorbeur et le flux d'air circulant.

choisie pour ses propriétés proches de celles d'un corps noir, ce qui permet de maximiser l'absorption énergétique (Fig. II.2).



Fig II. 1: Forme ondulée d'ailettes



Fig II. 2: Processus de peinture



Fig II. 3: Forme finale des ailettes

- **But :** Dans ce travail, nous comparons deux modèles d'absorbeur. Le premier, servant de référence. C'est un absorbeur plat (Fig. II.4). Le second modèle se distingue . Chaque elles (Fig. II.6). L'étude porte principalement sur l'effet de l'inclinaison de ces ailettes, analysée pour (Fig. II.7).



Fig II. 4: Absorbeur plat en noir mate



Fig II. 5: Capteur solaire à ail



Fig II. 6: Inclinaison des ailettes



Fig II. 7: Fixation des ailettes

Les ailettes, dont les propriétés physiques sont connues, ont été fixées sur la plaque absorbante conformément à la configuration illustrée en Fig. II.7. Elles sont montées entre la plaque supérieure du capteur à air chaud et le vitrage. La plaque a été peinte en noir afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire.

II.4 Réalisation d'une source thermique artificielle

Pour chauffer le capteur solaire, une source thermique artificielle a été conçue en respectant les dimensions du panneau. Cette source est composée de trois blocs en plaques de plâtre (type BA13), chacun supportant 12 lampes halogènes de 100 W. Ainsi, l'ensemble comprend un total de 36 lampes. Le dessous de chaque bloc est recouvert de feuilles d'aluminium, qui servent à réfléchir la lumière et à maintenir une intensité de rayonnement constante d'environ 500 W/m^2 (Fig. II.8).

Afin d'assurer une irradiation uniforme et efficace sur le capteur, la source lumineuse a été positionnée à une distance optimale de 30 cm au-dessus du vitrage, et

inclinée parallèlement à la surface du panneau solaire (Fig. II.9). Cette disposition permet de simuler de manière réaliste un rayonnement solaire constant lors des expérimentations.



Fig II. 8: Source thermique artificielle



Fig II. 9: Distance entre le vitrage et la source thermique artificielle



Fig II. 10: Vue de la source de chaleur et l'absorbeur fonctionnent en parallèle

Chapitre II: Procédure expérimentale

L'étape suivante consiste à réaliser de différentes expériences sur le capteur d'air (Fig II.10).

La première expérience a été réalisée à l'aide d'un capteur solaire à absorbeur plat. Dans la seconde, la troisième et la quatrième expérience, sont ajoutées des ailettes espacées de 12 cm du vitrage et inclinées respectivement de 30, 45 et 60° par rapport à l'absorbeur (Fig. II.11, 12 et 13)



Fig II. 11: Inclinaison des ailettes à 30°



Fig II. 12: Inclinaison des ailettes à 45°



Fig II. 13: Inclinaison des ailettes à 60°

II.5 Instruments des mesures utilisés

Parmi les instruments de mesure utilisés, nous avons :

II.5.1 Mesure du rayonnement solaire

- **Solarimètre :** (Amprobe Solar-100). C'est un instrument scientifique qui mesure la puissance du rayonnement solaire reçu en un point donné, il mesure la quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface pendant une période donnée (Fig II.14), utilise l'effet photovoltaïque pour mesurer l'éclairement solaire. Il convertit le rayonnement solaire en une tension proportionnelle, qui est ensuite affichée en watts par mètre carré (W/m^2). [25]



Fig II. 14: Solarimètre (Amprobe Solar-100)

Tableau II. 1 .Caractéristiques techniques d'un solarimètre [25]

Caractéristiques techniques du solarimètre	
Affichage : écran LCD qui affiche la mesure en temps réel	Unités de mesure : Watt par mètre carré (W/m^2) et BTU par heure par pied carré (BTU/h.ft ²)
Intervalle de mesure: généralement de 0 à 2000 (W/m^2).	Alimentation : des piles ou une batterie rechargeable.
Précision : $\pm 5\%$ à $\pm 10\%$	Résolution : généralement de 1 W/m^2

II.5.2 Mesure de débit d'air

- **Débitmètre / Thermo-anémomètre digital 9160SI :** Le thermo-anémomètre digital 9160SI (Fig. II.15) est un appareil portable conçu pour mesurer avec précision la vitesse de l'air à l'aide d'une hélice intégrée. Il affiche les résultats dans plusieurs unités : mètres par seconde (m/s), nœuds, kilomètres par heure (km/h) et pieds par minute (ft/min). Doté d'un écran rétroéclairé, il assure une lecture facile et claire, même en conditions de faible luminosité. Grâce à sa polyvalence et sa précision, cet instrument est particulièrement adapté aux contrôles de ventilation, aux études de flux d'air et aux analyses environnementales. [26]



Fig II. 15: Thermo-anémomètre digital 9160SI

Tableau II. 2. Caractéristiques techniques de l'anémomètre [26]

Caractéristiques techniques de l'anémomètre	
Plage de mesure : de vitesse du vent 0.4 à 30 km/h, m/min, miles/h.	Plage de mesure de température : 0 à 60°C
Plage de mesure de température : de 0 à 60 °C	Débit volumique : 0,001 à 100 m ³ /min

II.5.3 Contrôleur de tension et de courant

Le contrôleur de tension et d'intensité WANPTEK KPS3010D (Fig. II.15) est une alimentation à courant continu réglable, capable de délivrer une tension allant jusqu'à 30 volts et un courant maximal de 10 ampères. Cet appareil est conçu pour un usage polyvalent dans divers contextes tels que les laboratoires, les établissements d'enseignement et les environnements industriels. Il permet un contrôle précis des paramètres électriques, ce qui le rend particulièrement adapté aux tests, expérimentations et alimentations de dispositifs électroniques. [27]



Fig II. 16: Contrôleur de tension et d'ampérage

Tableau II. 3. Caractéristiques techniques du contrôleur de tension et d'ampère [27]

Caractéristiques techniques du contrôleur de tension et d'ampérage WANPTEK KPS3010D	
Tension de sortie : 0-30 volts	Courant de sortie : 0-10 ampères
Affichage : écran LCD à deux chiffres	Tension d'entrée : 220V \pm 10% 50Hz / 60Hz
Dimensions : 215 mm x 110 mm x 165 mm	Poids : 2,8 kg

II.5.4 Ventilateur centrifuge

Un ventilateur de dimensions 10 cm \times 9 cm (Fig. II.16) est intégré à l'entrée du banc d'essai afin de générer un débit d'air contrôlé. Sa vitesse de rotation est réglée à l'aide du contrôleur de tension et d'intensité, permettant d'ajuster précisément le flux d'air en fonction des besoins expérimentaux.



Fig II. 17: Ventilateur centrifuge



Fig II. 18: Entrée d'air

II.5.5 Station météorologique automatique (Automatic Weather Station)

Elle est utilisée pour mesurer automatiquement plusieurs paramètres météorologiques, sans intervention humaine directe. Cette station est équipée de capteurs électroniques permettant de collecter des données telles que la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse et la direction du vent, ainsi que la pression atmosphérique (Fig. II.18). Ci-dessous sont présentés les différents composants de l'appareil ainsi que leurs fonctions. [28]

Tableau II. 4. Caractéristiques techniques de la station météorologique automatique [28]

Composants	Fonction
Anémomètre à godets (en haut)	Mesure la vitesse du vent.
Girouette (intégrée à l'anémomètre)	Indique la direction du vent
Abri ventilé (cylindre à lamelles)	Protège les capteurs de température et d'humidité du rayonnement solaire.
Boîtier blanc rectangulaire	Héberge des capteurs, un transmetteur de données.



Fig II. 19: Station météorologique automatique

II.5.6 Mesure des températures

- **Thermocouples :** Les thermocouples utilisés pour la mesure de température dans cette installation sont de type K (Fig. II.19). Ce type de capteur est reconnu pour sa large plage de mesure, allant de -200 °C à 1250 °C , ce qui le rend particulièrement

adapté aux environnements thermiques variés. Dans le cadre de cette expérience, plusieurs thermocouples ont été judicieusement positionnés : à l'entrée et à la sortie du capteur, sur la plaque absorbante, ainsi qu'au niveau de la couverture. Cette disposition permet un suivi précis de l'évolution des températures aux différents points critiques du système.



Fig II. 20: Capteur type K avec têtes plates

II.5.7 DAQ Assistant

Assistant est un système d'acquisition de données (DAQ) développé par National Instruments (NI) qui facilite la configuration et le codage des missions d'acquisition et de génération de données avec les matériels NI-DAQmx, qui utilise un périphérique d'acquisition pour transmettre un signal électrique conditionné à un ordinateur (LabVIEW) afin d'analyser et d'enregistrer les données dans un fichier Excel.

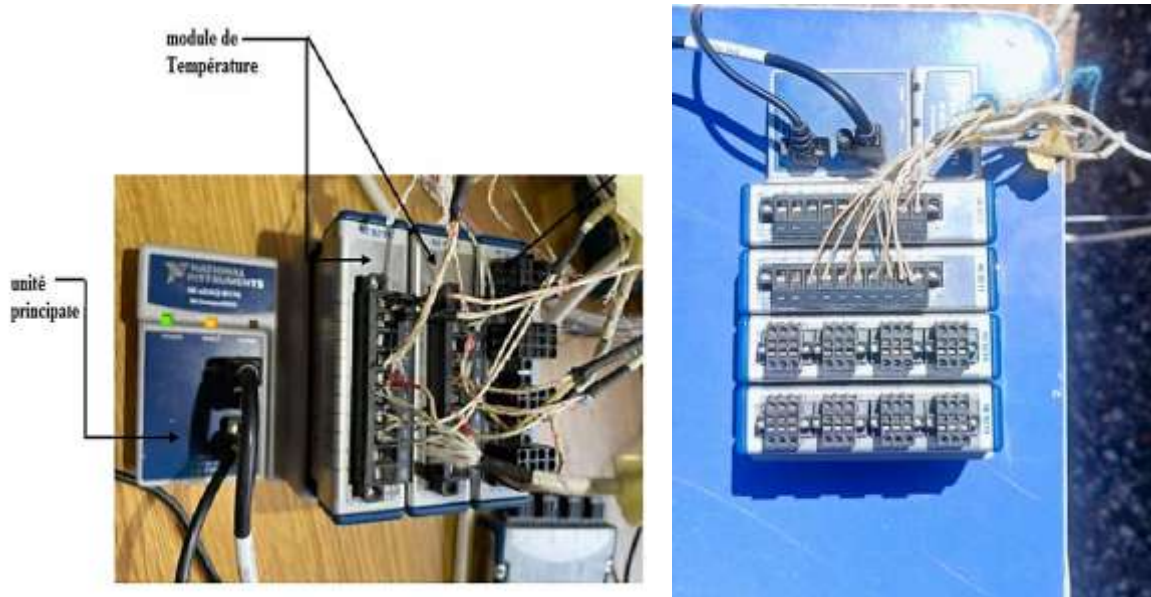


Fig II. 21: Module d'acquisition NI avec les capteurs de température

II.5.8 Multimètre

Un multimètre est un appareil électrique multifonction servant à mesurer la tension, le courant et la résistance dans un circuit, notamment la tension (Volt), le courant (Ampère) et la résistance (Ohm).

Les thermocouples sont connectés à l'enregistreur permettant l'affichage numérique des températures. Lors des expérimentations, le logiciel **LabVIEW** est utilisé pour assurer l'acquisition, l'enregistrement et la visualisation des données. Le système est relié à un ordinateur via une chaîne d'acquisition de données compatible avec les modules sur lesquels les capteurs thermiques étaient installés. Les capteurs sont directement connectés à l'interface de mesure sous LabVIEW, permettant un enregistrement continu des températures ainsi qu'un suivi en temps réel des courbes thermiques tout au long des expériences.



Fig II. 22: Multimètre

II.6 Description du logiciel LabVIEW

LabVIEW (contraction de *Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*) est une plateforme de conception et de programmation graphique développée par National Instruments, largement utilisée par les ingénieurs et les scientifiques pour les systèmes de mesure et de contrôle. Cet environnement de développement facilite l'intégration des matériels d'acquisition, offre des outils puissants pour le traitement des données ainsi que pour la création d'interfaces utilisateur personnalisées. Sa flexibilité et sa simplicité d'utilisation en font un choix privilégié dans de nombreux domaines scientifiques et industriels.

II.6.1 Présentation de l'interface

LabVIEW se compose de deux interfaces principales :

- **L'interface avant (front panel)**, dédiée à la gestion des données, à la visualisation et au contrôle interactif des variables et des instruments.

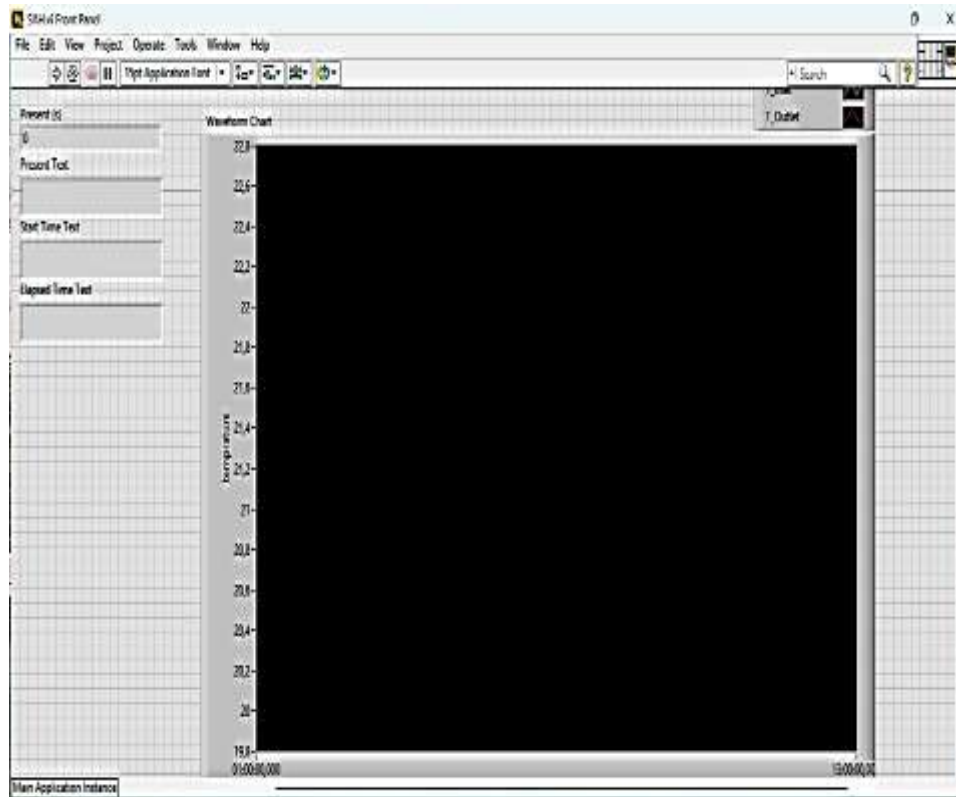


Fig II. 23: Interface LabVIEW (face-avant)

- **L'interface arrière (block diagram)**, qui permet la programmation graphique via des blocs fonctionnels interconnectés.

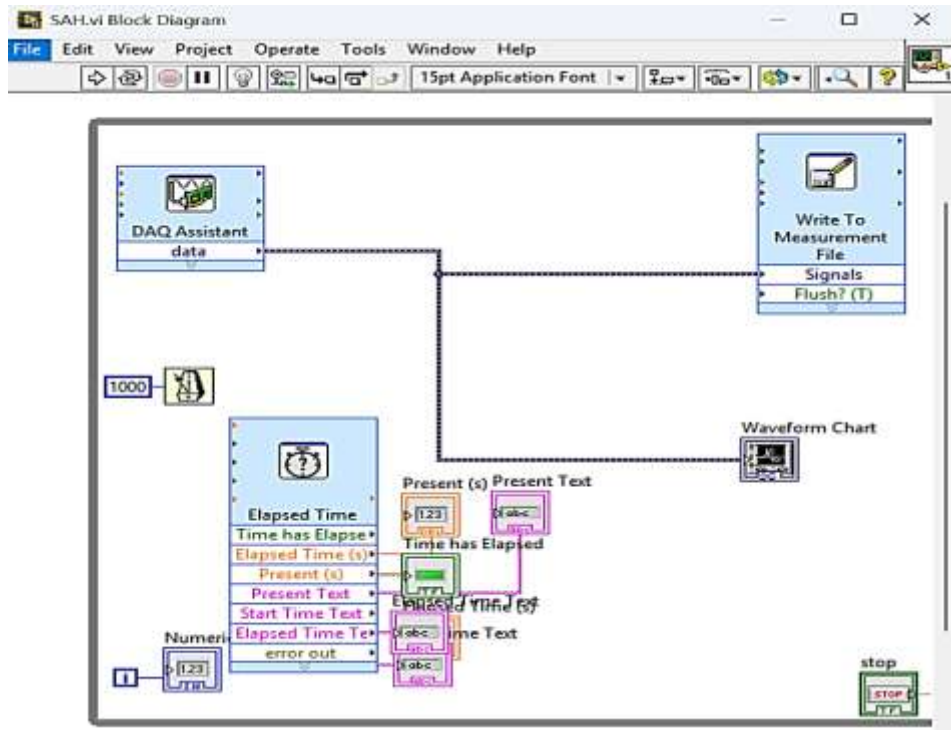




Fig II. 24: Block diagram

- **Boucle While :** La boucle while exécute un sous-programme de manière itérative, comptant les itérations à partir de zéro . Un terminal de condition,  recevant une valeur vraie, permet l'exécution du sous-programme.

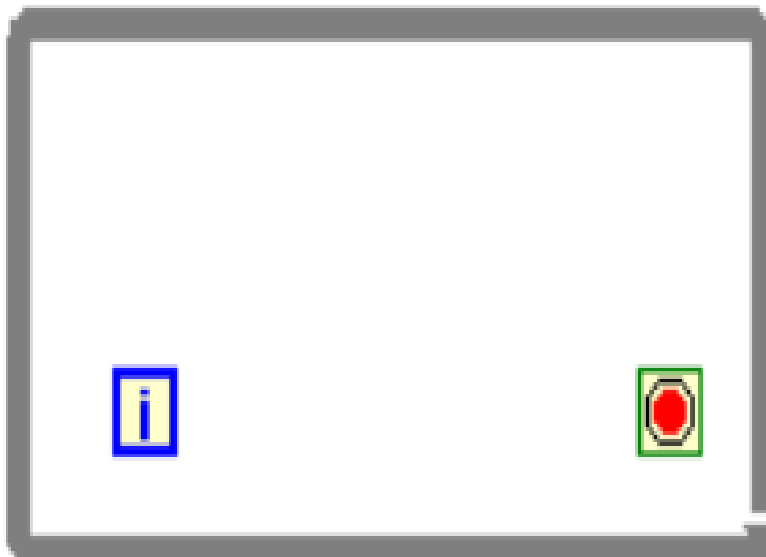


Fig II. 25: Boucle while

- **Enregistrer les données sur un fichier Excel :** Les données générées et analysées par le programme, incluant la date, l'heure, le temps et les températures de chaque thermocouple, sont enregistrées dans un fichier Excel.

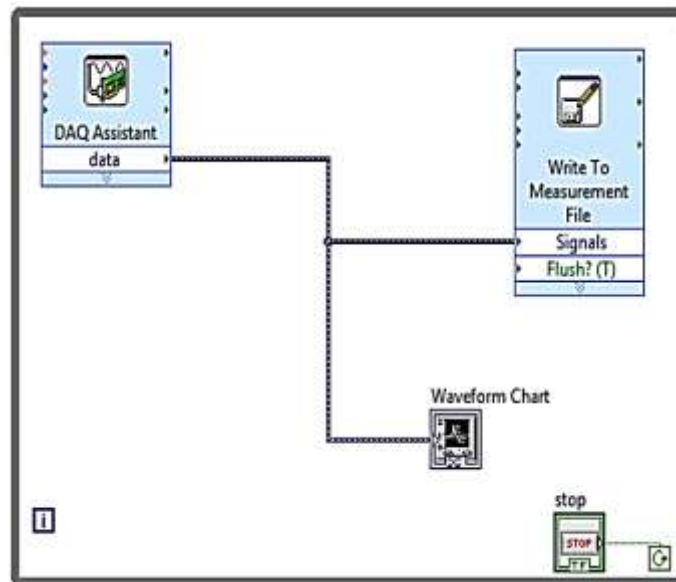


Fig II. 26: Réaction d'un fichier d'enregistrement des mesures

Pour assurer la fiabilité des mesures durant nos expériences, les thermocouples ont été disposés sur la surface supérieure de la plaque et positionnés de manière identique le long du capteur solaire, selon le schéma suivant :

- Un capteur placé à l'extérieur pour mesurer la température ambiante.
- Trois capteurs installés respectivement au début, au milieu et à l'extrémité de l'absorbeur.
- Deux capteurs mesurant la température intérieure et extérieure du capteur.
- Un capteur fixé sur le vitrage afin de mesurer la température intérieure du verre.
- Deux autres capteurs positionnés à l'extérieur, mesurant la température de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur.
- Un capteur placé à l'intérieur de l'échangeur pour mesurer la température du matériau à changement de phase (MCP), la paraffine.

- Deux thermocouples supplémentaires installés à l'entrée et à la sortie du conduit en U (U-turn).

Le débitmètre est installé à la sortie de l'extracteur pour mesurer le débit d'air pendant l'expérience. Deux sondes supplémentaires mesurent l'humidité et permettent de confirmer la précision des températures enregistrées à l'entrée et à la sortie du capteur.

Après avoir réglé et calibré les instruments de mesure, l'absorbeur a été exposé à la source thermique artificielle, positionnée parallèlement à une distance précise de la surface de l'absorbeur.

Les essais ont été réalisés à un débit d'air constant de 0,018 kg/s, contrôlé via le débitmètre et régulé à l'aide du contrôleur de tension et d'intensité WANPTEK KPS3010D.

II.7 Protocol expérimental

Nous avons sélectionné la configuration la plus performante afin de réaliser des tests en conditions réelles, sous le rayonnement solaire naturel. Pour stabiliser la température de l'air à la sortie du capteur solaire, une résistance électrique a été ajoutée en bas de la zone de circulation d'air du conduit en U (Fig. II.25).

Par ailleurs, pour prolonger l'utilisation de la chaleur lorsque le rayonnement solaire est absent ou faible, un système de stockage thermique a été intégré. Cet échangeur de chaleur, positionné avant la sortie d'air du capteur (Fig. II.25), sert de stockeur thermique et est rempli d'un matériau à changement de phase (MCP), utilisé comme moyen de stockage d'énergie thermique par chaleur latente.

L'objectif est d'étudier la durée pendant laquelle cette énergie thermique peut être conservée après le coucher du soleil, ainsi que la capacité du système à maintenir une température stable à la sortie du capteur lorsque le rayonnement est faible.

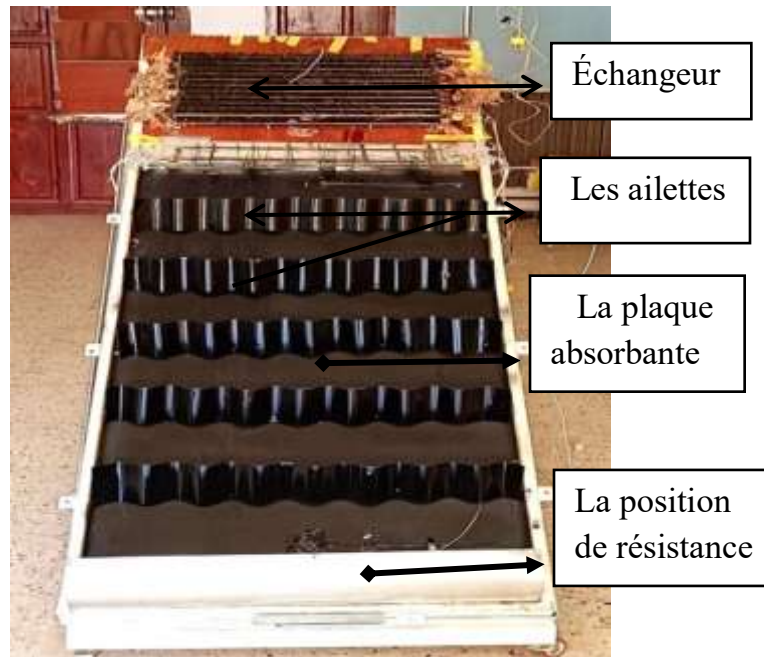


Fig II. 27: Banc expérimental

II.8 Échangeur

Nous avons placé à la sortie du capteur

thermique, rempli de paraffine utilisée comme matériau à changement de phase (MCP).

La paraffine a été choisie pour ses propriétés thermiques spécifiques,

stockage

latent.

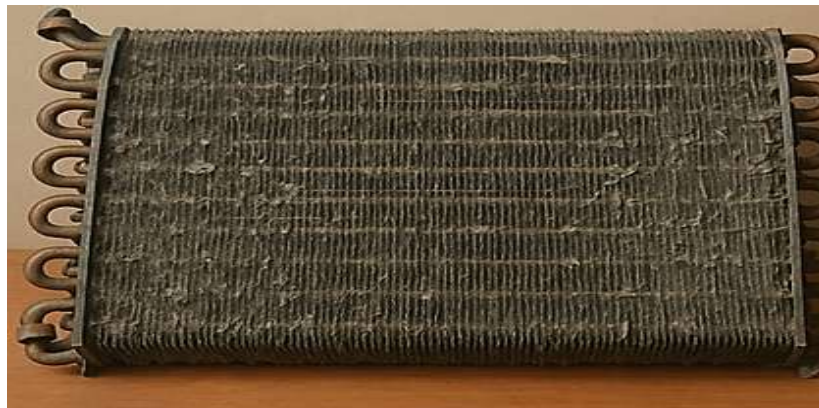


Fig II. 28: Échangeur rempli de paraffine

II.8.1 Propriétés de paraffine

La paraffine est particulièrement bien adaptée au stockage de l'énergie thermique, car elle est capable d'absorber et de restituer une grande quantité de chaleur lors de son changement d'état (fusion/solidification). Elle présente plusieurs avantages : elle est thermiquement stable, non toxique, économique et disponible avec différentes températures de fusion, généralement comprises entre 49 °C et 54 °C. Ces caractéristiques font de la paraffine une solution efficace, fiable et sécurisée pour le stockage de l'énergie thermique à base de chaleur latente.

Tableau II. 5. Propriétés de paraffine utilisée [29]

Symbole	ρ_s (kg/m ³)	ρ_l (kg/m ³)	L_f (kJ/kg)	λ (W/m·K)	C_p (kJ/kg·K)
Valeurs	912	769	183	0,2	2



Fig II. 29: Paraffine brute



Fig II. 30: Granulés de paraffine

II.8.2 Avantages des paraffines : [30]

- Haute conductivité thermique pour la charge et la décharge rapides.
- La pression de vapeur de fusion reste faible, même à haute température.
- L'enthalpie de fusion varie entre 180 et 230 kJ/kg.

Chapitre II: Procédure expérimentale

- Les paraffines sont écologiquement sans danger. Elles n'ont pas d'effets négatifs sur les plantes, les animaux, l'eau ou les micro-organismes.

La stabilisation de la température

est créée à la base de la zone de circulation d'air du capteur (l'endroit où l'air quitte le compartiment bas vers le compartiment haut du capteur. Ce

dispositif est basé sur l'effet Joule. Il est constitué des éléments suivants :

Deux barres

-

à travers le dispositif.

Ce système permet de maintenir une température d'air stable, en particulier lorsque l'ensoleillement est insuffisant ou variable.



Fig II. 31: Résistance utilisée

Chapitre II: Procédure expérimentale

Les expériences ont été réalisées entre le **15 et le 27 avril 2025**, durant des journées ensoleillées et sous des conditions climatiques favorables. Le premier jour a été consacré à la vérification et au test des instruments de mesure, notamment les thermocouples installés sur le capteur solaire, afin de garantir la fiabilité des données enregistrées en conditions réelles. Pour assurer une comparaison pertinente des performances thermiques, **deux journées aux conditions météorologiques similaires** ont été sélectionnées pour la conduite des expérimentations.



Fig II. 32: Emplacement de l'échangeur



Fig II. 33: Position de résistance

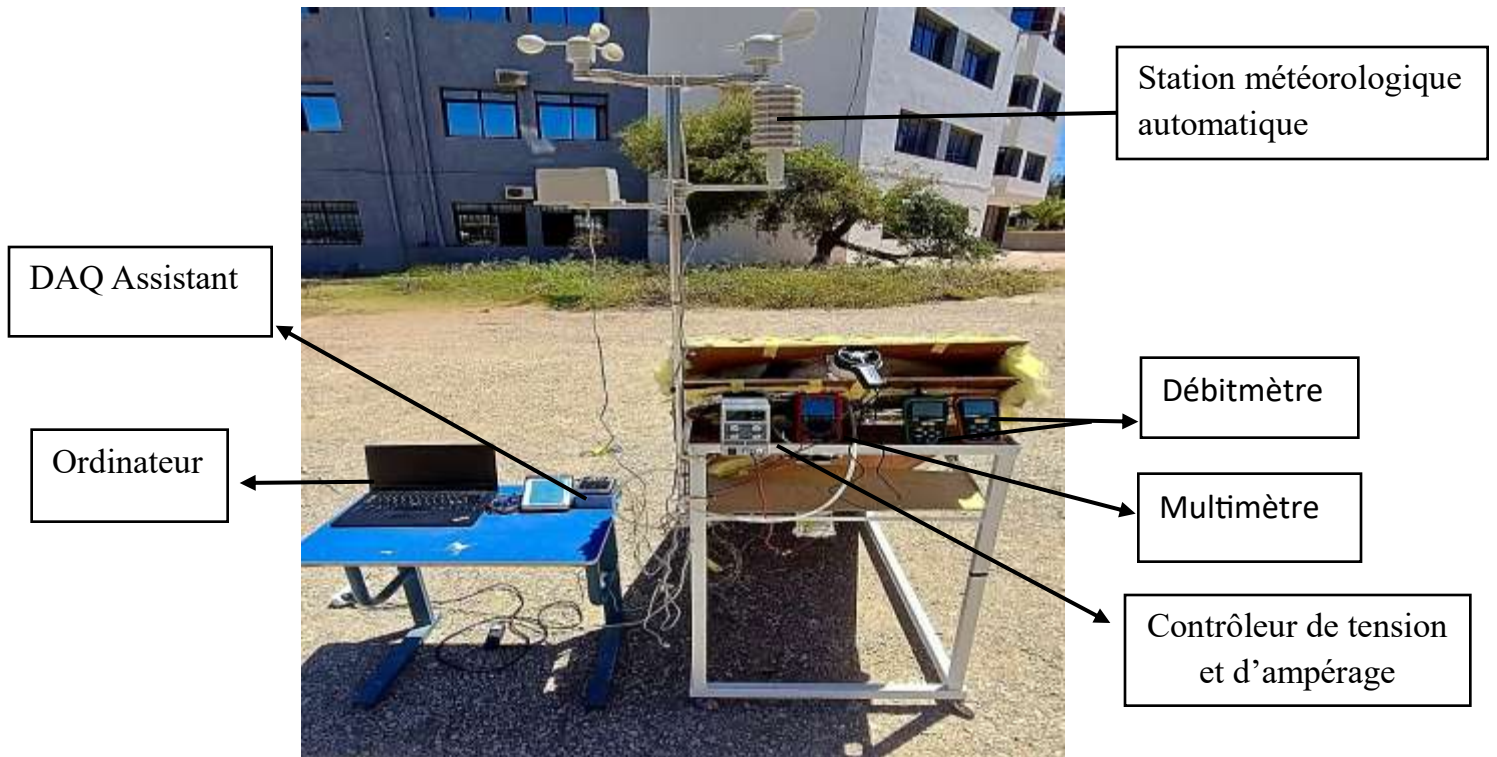


Fig II. 34: Photos des matériels utilisés dans les expériences

Fig II. 35: Banc d'essai utilisé

II.10 Analyse théorique

II.10.1 L'énergie Q_{out}

L'énergie Q_{out} sortie du capteur solaire est estimée par [28]

$$Q_{out} = \dot{m} c_p \Delta T \quad (1)$$

$$\Delta T = (T_{out} - T_{in}) \quad (2)$$

ΔT : Différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie de la chambre [K].

A_c : Surface du capteur [m^2].

$P_{éle}$: Puissance électrique [W].

Chapitre III

Résultats et discussion

III.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la réalisation de tests expérimentaux sur le capteur solaire plan sans et avec ailettes pour trois angles différents. Cette partie examine l'impact de différents angles d'ailettes (trois inclinaisons : 30, 45 et 60 degrés) L'analyse vise à identifier la géométrie des ailettes optimale pour maximiser l'efficacité énergétique du capteur. Les résultats et la discussion fournissent des informations précieuses pour la recherche future sur les capteurs solaires à air.

Les tests de performance de capteur solaire hybride avec stockage thermique à MCP ont été réalisés par un temps clair et ensoleillé, avec une inclinaison de capteur réglée à 45°. Afin de caractériser notre capteur solaire, les paramètres suivants ont été mesurés : la température des différents éléments du capteur, le débit d'air circulé, le rayonnement solaire et la température ambiante.

III.2 Comportement du capteur avec et sans ailettes

La figure. III.1 représente l'évolution temporelle des températures de l'absorbeur (en noir), de sortie (en bleu) et ambiante (en rouge) dans le capteur solaire pour quatre différentes expériences lors d'un premier essai.

III.2.1 Expérience (a) : Absorbeur lisse sans ailettes

La figure III.1.a représenté l'évolution des températures de l'absorbeur, à la sortie du capteur et celle de l'ambiance en fonction du temps. La température ambiante est stable durant l'expérience entre 17 et 18°C. Ceci confirme l'absence de perturbations thermiques externes significatives durant l'expérience. Initialement, la température de l'absorbeur augmente rapidement de 17 à 48 °C après 2 000 s (33 min), puis elle se stabilise autour de 52 °C après 3600 s (60 min). La température de sortie augmente quant à elle progressivement de 17 à 36 °C.

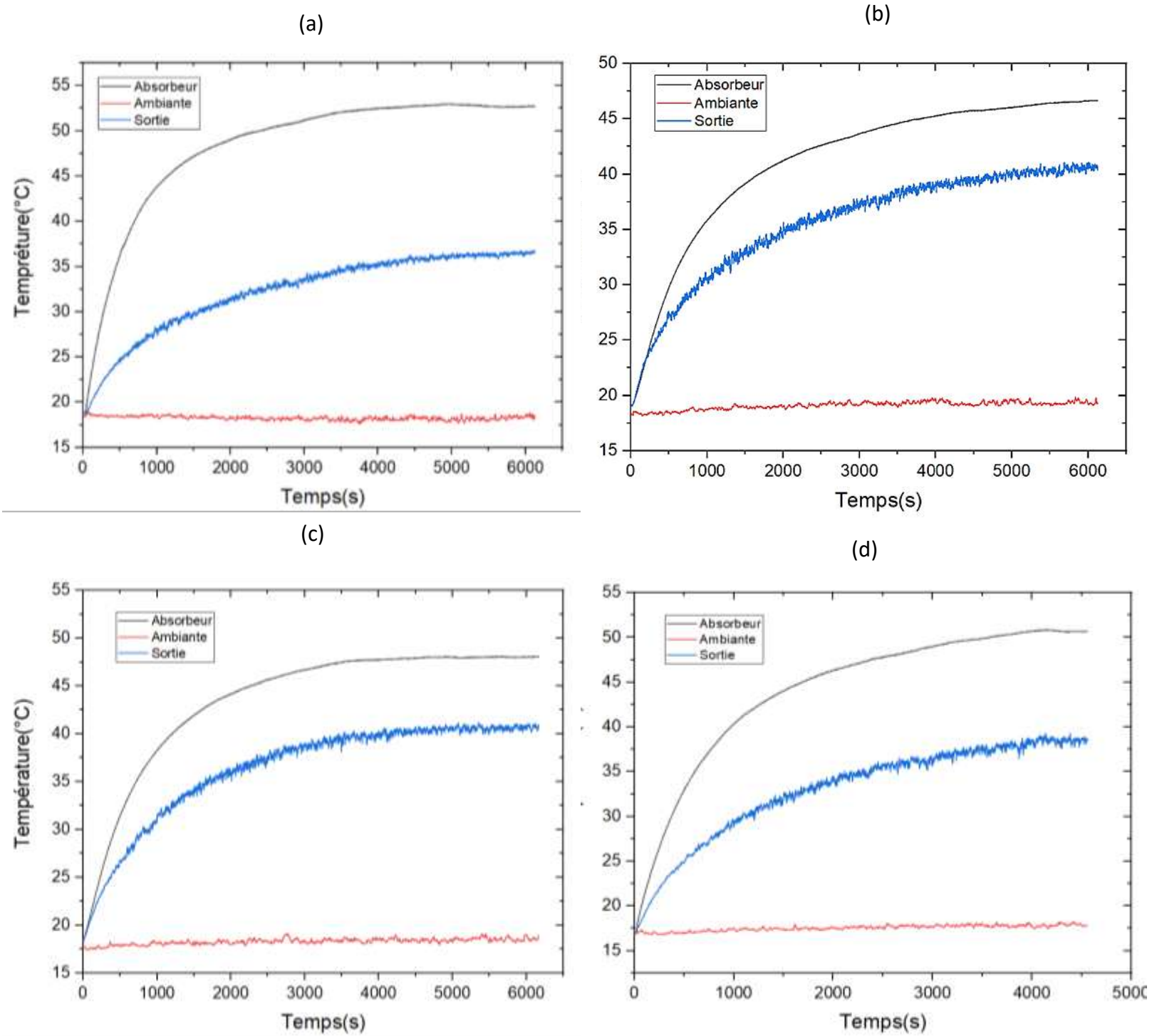


Fig. III. 1 : Évolution temporelle des températures des capteurs (a) sans ailettes et avec ailettes inclinées à 30° (b), 45° (c) et 60° (d)

III.2.2 Expérience (b) : Inclinaison des ailettes à 30°

La figure III.1.b illustre l'évolution thermique de l'absorbeur avec des ailettes inclinées à 30°, en fonction du temps, ainsi que les températures de l'air ambiant et de sortie du capteur. La température de l'absorbeur s'élève rapidement, passant de 17 °C à plus de 41 °C en 2000 secondes (soit 33 min), avant de se stabiliser autour de 50 °C après 3600 secondes (60 min). De son côté, la température de sortie progresse de manière continue, atteignant 40 °C. Elle dépasse de plus de 5 % celle mesurée avec un absorbeur sans ailettes, soulignant ainsi l'efficacité de ces dernières à accroître la surface d'échange thermique et, par conséquent, à améliorer le rendement thermique du capteur.

III.2.3 Expérience (c) : inclinaison des ailettes à 45°

La figure III.1.c illustre l'évolution des températures de l'absorbeur en fonction du temps, pour une configuration où les ailettes sont inclinées à 45°, ainsi que les températures de sortie et ambiante. On observe une montée rapide de la température de l'absorbeur au début de l'expérience, atteignant une stabilité autour de 48 °C après 3600 secondes (60 minutes). De son côté, la température de sortie augmente de manière exponentielle, pour se stabiliser à environ 42 °C après 4200 secondes (70 minutes). Cette valeur dépasse de plus de 10 % celle enregistrée avec un absorbeur plan, et de plus de 5 % par rapport à l'inclinaison à 30°. Ces résultats traduisent une amélioration notable du transfert thermique, rendue possible par l'orientation optimale des ailettes. Ainsi, l'inclinaison à 45° contribue significativement à l'élévation de la température de sortie du capteur solaire, soulignant son rôle crucial dans l'efficacité thermique du système.

III.2.4 Expérience (d) : inclinaison des ailettes à 60°

La figure III.1.d montre l'évolution de la température de l'absorbeur en fonction du temps pour une inclinaison des ailettes fixée à 60°. La température de l'absorbeur augmente progressivement de 17 °C à 50 °C. La température de sortie, bien que présentant un certain retard, commence à s'élever à partir de 1800 secondes (30 minutes),

passant de 17 °C à 34 °C, avant d'atteindre un maximum de 37 °C vers 4000 secondes. Cette valeur reste proche de celle obtenue avec un absorbeur plan, et inférieure de moins de 9 % à celle enregistrée avec une inclinaison de 45°. Ces résultats suggèrent que l'inclinaison à 60° est moins efficace en termes de transfert thermique comparée à l'angle de 45°, bien qu'elle reste supérieure à une configuration sans ailettes.

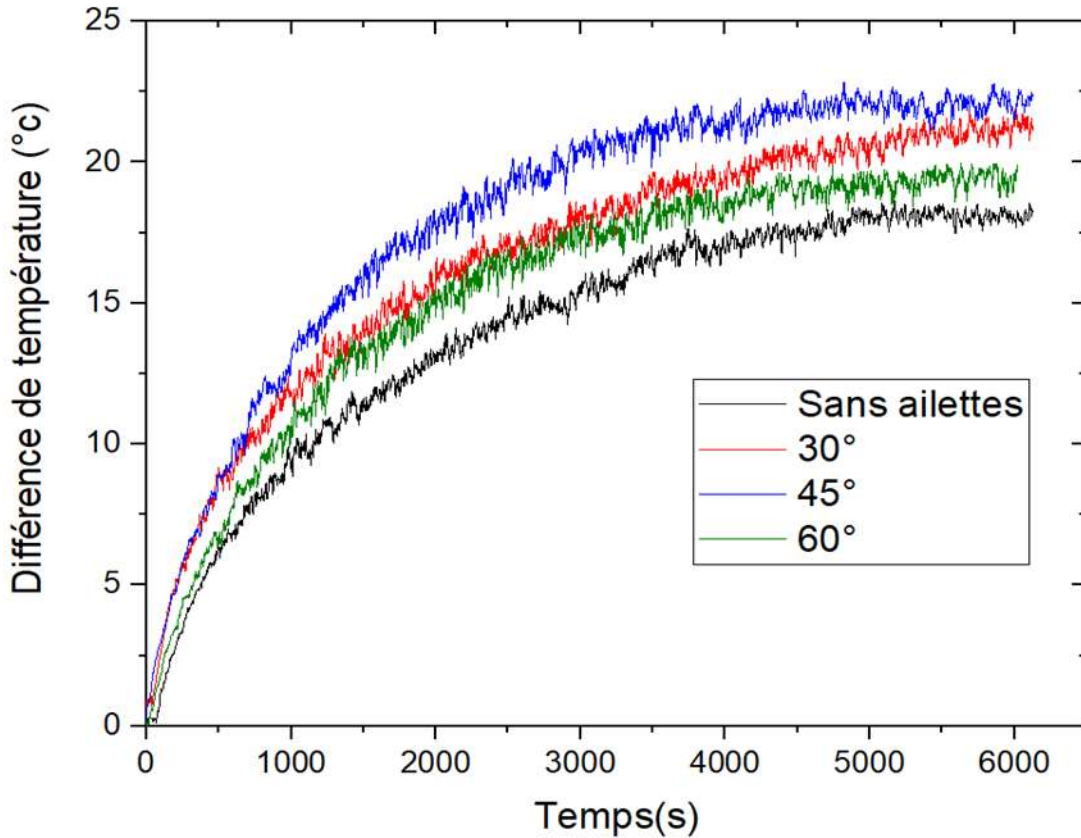


Fig. III. 2 : Évolution de la différence de température de l'air entre l'entrée et la sortie du capteur pour différentes configurations d'un capteur solaire

La figure III.2 présente l'évolution de la différence de température entre l'air entrant et sortant, en fonction du temps, pour différents types de capteurs solaires (avec et sans ailettes).

Pour l'ensemble des configurations, on observe une augmentation rapide de cette différence en début d'expérience, suivie d'un palier traduisant une stabilisation thermique

progressive. Cette tendance indique une montée en température initiale rapide, puis un ralentissement à mesure que le système atteint un équilibre thermique.

Parmi les cas testés, le capteur doté d'ailettes inclinées à 45° affiche la performance thermique la plus élevée, avec une différence de température atteignant $22,5^\circ\text{C}$. Il est suivi de près par les configurations à 30° (jusqu'à 21°C), à 60° (jusqu'à 20°C), puis le capteur sans ailettes, qui enregistre une différence maximale de 18°C .

Ces résultats mettent en évidence l'influence notable de l'inclinaison des ailettes sur l'efficacité thermique. L'angle de 45° se démarque comme le plus performant, optimisant le transfert de chaleur entre l'absorbeur et l'air circulant. À l'inverse, le capteur plat, dépourvu d'ailettes, présente les résultats les plus modestes.

Après environ 5000 secondes (soit environ 83 min), toutes les courbes tendent vers une stabilité, confirmant l'atteinte d'un régime quasi-stationnaire. L'inclinaison des ailettes apparaît donc comme un facteur déterminant pour améliorer les performances thermiques du capteur solaire, avec un angle de 45° offrant le meilleur compromis parmi les configurations étudiées.

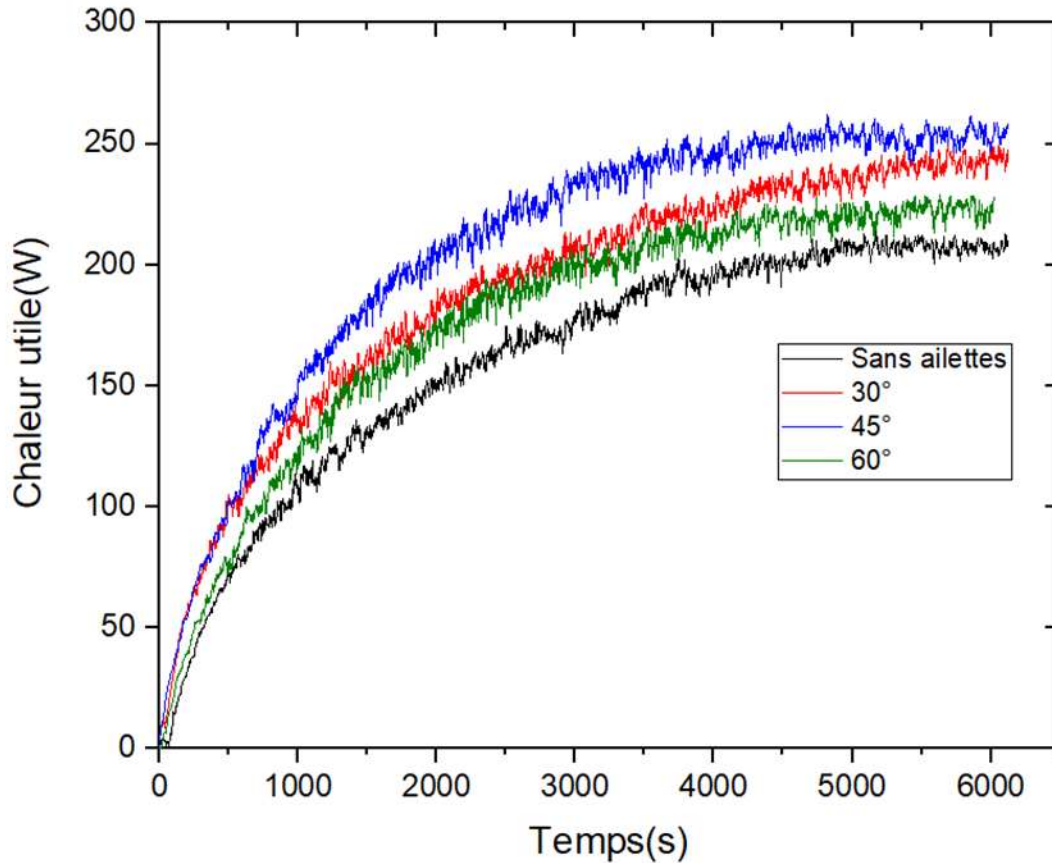


Fig. III. 3: Évolution temporelle de la chaleur utile entre l'entrée et la sortie de l'air pour différentes configurations d'un capteur solaire

Le graphique présente l'évolution de la chaleur utile en fonction du temps pour les quatre configurations du capteur solaire thermique : plaque sans ailettes, et plaque avec ailettes inclinées à 30°, 45° et 60°.

Dans toutes les configurations, la chaleur utile croît rapidement au début de l'expérience (similaire aux différences de températures), correspondant à la phase transitoire, avant de se stabiliser dans un régime stationnaire. Cette évolution reflète l'accumulation progressive d'énergie thermique par le système.

La configuration avec ailettes inclinées à 45° se distingue par la meilleure performance, atteignant à la fin une chaleur utile maximale de 260 W. Elle est suivie respectivement de 245, 225 W pour les inclinaisons de 30 et 60°. Le capteur sans ailettes est le moins performant, n'excédant pas 210 W.

Chapitre III: Résultats et discussions

L'angle de 45° semble optimal car il favorise une incidence plus perpendiculaire du rayonnement solaire, maximisant ainsi l'absorption d'énergie. À l'inverse, une inclinaison trop faible (surface plane) ou trop forte (60°) limite cette captation.

Ce graphique met en évidence l'importance de l'orientation des ailettes dans l'optimisation des performances thermiques. La chaleur utile extraite dépend également du débit d'air (constant dans cette expérience) et de la différence de température entre l'entrée et la sortie, elle-même influencée par l'intensité du rayonnement solaire.

Ainsi, un bon ajustement de l'inclinaison permet d'améliorer significativement l'efficacité énergétique des capteurs solaires thermiques.

Fig. III. 4: Évolution temporelle du rendement thermique (η_{th}) pour l'absorbeur sans ailettes et avec ailettes selon les inclinaisons de 30° , 45° et 60°

La figure III.4 montre l'évolution temporelle du rendement thermique pour quatre configurations : une plaque plate sans ailettes et trois

De plus, la configuration à 45° atteint son rendement maximal en seulement 58 minutes, ce qui est plus rapide que les autres inclinaisons et que le capteur sans ailettes.

Cette

les ailettes, favorisant un meilleur échange thermique et une température de sortie plus élevée.

III.3 Capteur solaire hybride à ailettes et avec un stockage thermique

Selon les résultats précédents effectués au laboratoire sous des conditions contrôlées, le capteur thermique équipé d'ailettes incurvées à 45° offrait les performances les plus élevées. Nous avons donc utilisé cette configuration pour le reste des expérimentations en conditions réelles, à l'extérieur sur le même capteur tout en lui ajoutant un stockeur thermique (discuté dans le chapitre précédent) pour une exploitation hybride. Les résultats obtenus sont représentés graphiquement sur la figure III.5, ci-après.

Le graphe de la figure III.5 monte l'évolution temporelle entre (08h40 jusqu'à 19h40) de l'irradiation solaire (en W/m^2) et de la température ambiante (en $^\circ C$). L'irradiation augmente nettement à partir de 09h00, en raison du lever du soleil, atteint un pic compris entre 12h40 et 13h20, avoisinant $1050 W/m^2$, puis décroît progressivement à partir de 16h40 pour atteindre zéro vers 19h40, marquant le coucher du soleil. Ce profil, en forme de parabole, est caractéristique d'un ensoleillement direct par ciel dégagé.

La température ambiante, quant à elle, suit une progression plus lente. Elle commence à s'élever vers 09h00, atteint un maximum autour de 26 à $27^\circ C$ entre 13h00 et 16h40, puis diminue progressivement jusqu'à environ $20^\circ C$ en fin de journée.

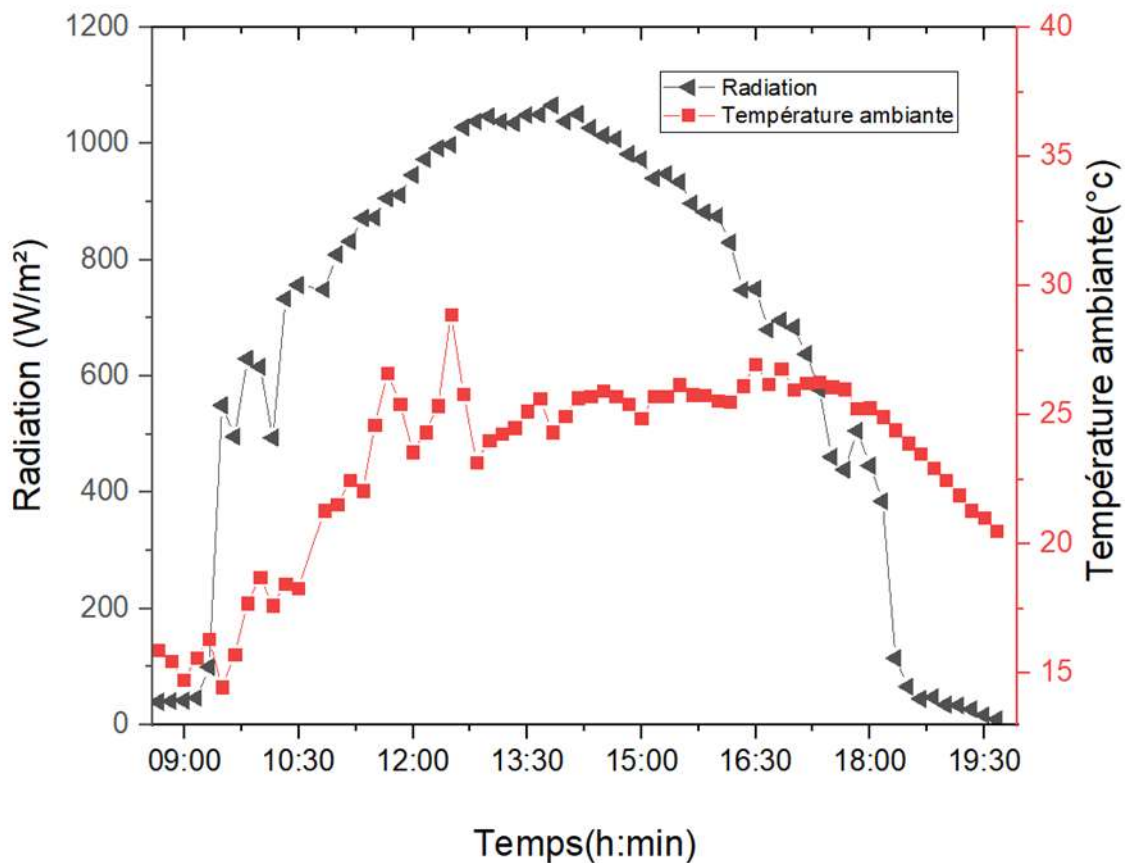


Fig. III. 5: Variation de la radiation solaire et de la température ambiante au cours de la journée 23/04/2025

La figure III.6 illustre l'évolution des différentes températures mesurées au sein du capteur solaire hybride à double passage, muni d'ailettes et équipé d'une résistance électrique, au cours de la journée expérimentale citée précédemment.

La température ambiante, oscille entre 16 $^{\circ}C$ le matin et un maximum de 27 $^{\circ}C$ en milieu de journée, avant de décroître progressivement en fin d'après-midi. Elle constitue naturellement la valeur la plus basse parmi toutes les mesures, reflétant les conditions environnementales extérieures.

La température du vitrage augmente rapidement dès les premières heures d'ensoleillement, atteignant une stabilisation stable entre 45 $^{\circ}C$ et 50 $^{\circ}C$ entre 10h00 à 17h00. Cette évolution s'explique par son exposition directe au rayonnement solaire et

son rôle de couverture transparente, qui favorise l'effet de serre tout en limitant les pertes thermiques.

Fig. III. 6: Évolution temporelle des différentes températures mesurées dans le capteur solaire hybride avec ailettes à double passage dans des conditions réelles

L'absorbeur affiche les températures les plus élevées parmi les éléments internes, atteignant entre

à l'intérieur du capteur.

La température de l'air en sortie montre une hausse progressive, amorcée par le rayonnement solaire dès 09h00, puis amplifiée par l'activation de la résistance électrique. Entre 10h30 et 18h00, elle se stabilise dans une plage de 54 à 56 °C, traduisant un

Chapitre III: Résultats et discussions

échange thermique efficace. Cette température, proche de celle de l'absorbeur, confirme les bonnes performances du système en matière de transfert de chaleur. Après 18h30, elle décroît rapidement en raison du déclin de l'irradiation solaire et de l'arrêt de la résistance, jusqu'à rejoindre la température ambiante, autour de 20 °C.

Enfin, la température

sentielle pour certaines applications thermiques exigeant une constance dans le flux d'air chauffé.

Fig. III. 7: Variation des températures à travers l'échangeur de chaleur du capteur solaire hybride à double passe avec des ailettes

Chapitre III: Résultats et discussions

Le graphique de la figure III.7 illustre l'évolution de trois températures distinctes au cours de la journée : la température du matériau à changement de phase (MCP), celle mesurée avant l'échangeur, et celle relevée après l'échangeur.

caractéristique d'un phénomène de changement d'état, durant lequel l'énergie thermique est stockée sous forme de chaleur latente. La stabilité de cette courbe confirme le rôle régulateur du MCP, qui permet d'absorber l'excès de chaleur tout en maintenant une température constante, contribuant ainsi à la gestion thermique du système.

Les températures mesurées avant

oleillement.

La courbe de la température

. Ces variations traduisent une absence de régulation thermique efficace, engendrant des hausses soudaines et instables de température. Ce comportement peut s'avérer problématique pour des systèmes sensibles, où la constance thermique est essentielle.

En revanche, la

du flux thermique. Cette constance est particulièrement bénéfique pour des applications telles que le chauffage ou le séchage, où la stabilité thermique est cruciale pour assurer des performances optimales et éviter les dégradations liées aux variations brusques.

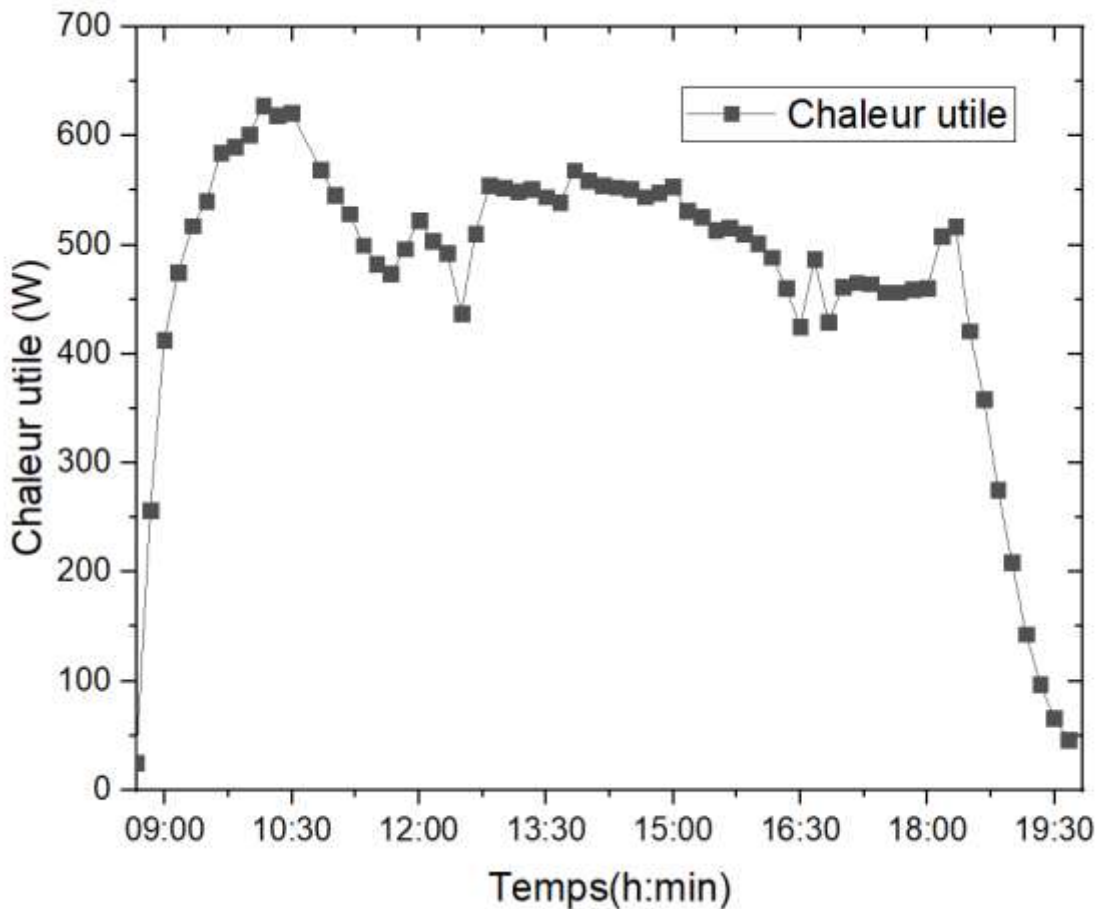


Fig. III. 8: Évolution de la chaleur utile en fonction du temps pour le capteur solaire hybride

Le graphique présente l'évolution de la chaleur utile générée par le système combinant le capteur solaire hybride et une résistance électrique, conçu pour atteindre des températures de sortie élevées.

Entre 08h40 et 10h30, une montée rapide de la chaleur utile est observée, passant d'environ 0 à 640 W. Cette augmentation traduit la mise en route efficace du système, soutenue par la hausse du rayonnement solaire et l'activation de la résistance électrique, permettant d'atteindre rapidement la température cible.

Entre 10h30 à 16h30, la chaleur utile se stabilise entre 450 et 620 W. Cette phase correspond à une production énergétique optimale, durant laquelle le capteur solaire

assure l'essentiel de l'apport thermique. La résistance intervient ponctuellement pour compenser les baisses éventuelles et garantir une température constante en sortie.

À partir de 16h30 jusqu'à 18h20, une légère diminution est observée, avec des valeurs oscillantes entre 450 et 520 W. Cette baisse progressive s'explique par la réduction naturelle de l'ensoleillement en fin de journée, tandis que la résistance continue à maintenir la température en apportant un complément énergétique.

Enfin, à partir de 18h20, la chaleur utile décroît lentement jusqu'à atteindre quasiment 0 W vers 19h50. Cette diminution marque l'arrêt du fonctionnement actif du système (capteur et résistance). Toutefois, la lenteur de cette chute souligne l'effet de stockage thermique, qui prolonge l'émission de chaleur malgré l'arrêt des sources d'énergie, assurant ainsi une transition thermique progressive.

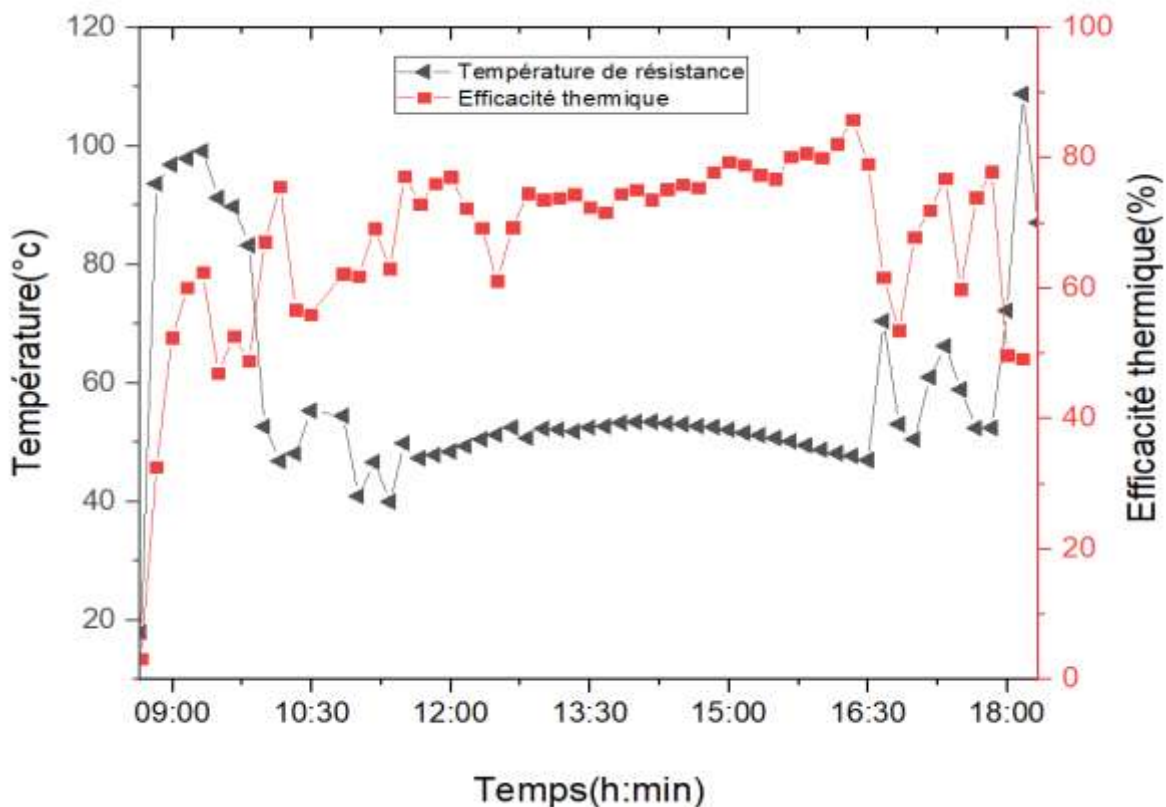


Fig. III. 9: Évolution de la température de résistance et de l'efficacité thermique du capteur solaire hybride au cours de la journée 23/04/2025

Chapitre III: Résultats et discussions

La température aux alentours de la résistance connaît une montée rapide en début de matinée, entre 08h40 et 09h20, atteignant des valeurs proches de 100 °C. Elle chute ensuite brutalement pour se stabiliser entre 48 et 53 °C de 10h00 à 16h30. Cette stabilisation s'explique par l'arrêt automatique de la résistance durant la période de fort ensoleillement, où l'apport solaire est suffisant pour maintenir la température de sortie sans assistance électrique. En fin de journée, entre 16h30 et 18h00, des pics ponctuels apparaissent, atteignant brièvement des valeurs de 66 à 70 °C, puis jusqu'à 108 °C. Ces hausses soudaines traduisent l'activation intermittente de la résistance électrique, qui intervient pour compenser la baisse du rayonnement solaire et maintenir une température de sortie adéquate.

d'une bonne performance globale du capteur solaire pendant la période d'ensoleillement optimal. Quelques baisses ponctuelles de l'efficacité sont observées, principalement dues à l'apport complémentaire de la résistance électrique, qui modifie le bilan énergétique global. Après 16h30, des fluctuations plus marquées apparaissent, liées à la diminution du rayonnement solaire. La résistance se réactive alors automatiquement pour maintenir la température de l'air, ce qui impacte l'efficacité globale du système.

Le capteur solaire à double passage démontre ainsi une bonne performance thermique, comme en témoigne la température atteinte par l'absorbeur, culminant à 73 °C. Cette valeur illustre l'efficacité du système dans la captation de l'énergie solaire et le transfert de chaleur vers l'air circulant, confirmant la pertinence de la conception pour des applications thermiques nécessitant un flux d'air chaud régulier et contrôlé.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à analyser les performances thermiques de différents types d'absorber d'un capteur solaire à air en comparant la différence de température entre l'entrée et la sortie, le rendement thermique ainsi que la chaleur utile produite. Les résultats expérimentaux sont présentés sous forme graphique afin de mettre en évidence les écarts de performance entre un capteur à absorbeur plan et un capteur muni d'ailettes, selon plusieurs configurations testées. Une attention particulière est également portée à l'évaluation de l'efficacité de ces capteurs dans divers contextes d'utilisation, afin d'identifier les configurations les plus adaptées aux besoins thermiques spécifiques.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Cette étude a permis de mener une analyse approfondie d'un capteur solaire à air à double passes afin d'évaluer son fonctionnement et d'identifier des solutions pour en améliorer les performances thermiques. Dans ce cadre, des ailettes en forme de plaques ondulées ont été ajoutées à l'absorbeur afin d'optimiser les échanges thermiques. Par ailleurs, pour assurer un fonctionnement continu et plus stable, une résistance électrique a été intégrée à la partie inférieure du capteur, où l'air passe du compartiment bas vers le compartiment haut entre l'absorbeur et le vitrage, transformant ainsi le capteur classique en un système hybride. Ensuite, à la sortie du capteur, un échangeur thermique constitué de tubes et de fines ailettes plates, rempli de paraffine de labo comme un matériau à changement de phase (MCP), a été installé pour stocker l'excès de chaleur et stabiliser la température de l'air fourni.

Les résultats expérimentaux ont démontré que l'ajout d'ailettes améliore significativement la performance thermique du capteur, quelle que soit leur inclinaison par rapport à un capteur conventionnel sans ailettes. Toutefois, l'analyse comparative a révélé que l'inclinaison à 45° offre le meilleur rendement, avec une efficacité atteignant 72 %, contre 70 %, 64 % et 59 % respectivement pour les angles de 30°, 60° et pour le capteur sans ailettes.

Lors des essais en conditions réelles, le capteur hybride équipé d'ailettes à 45° a affiché des performances remarquables, les températures moyennes en amont de l'échangeur avoisinaient 49°C (± 23 °C), tandis qu'en aval, après passage dans l'échangeur rempli de paraffine, elles se stabilisaient autour de 52°C (± 19 °C), confirmant le rôle crucial de l'échangeur à paraffine dans l'atténuation des fluctuations et l'optimisation de la chaleur restituée avec une stabilisation de la température de sortie.

Enfin, sous rayonnement solaire direct, le capteur hybride a atteint un rendement maximal de 85 %, confirmant l'intérêt des améliorations apportées pour optimiser la performance énergétique du système.

Ces travaux ouvrent des perspectives prometteuses pour le développement de capteurs solaires hybrides performants, combinant stockage d'énergie et régulation thermique, avec des applications potentielles dans les systèmes de chauffage et de production d'air chaud durable.

Références bibliographique

- [1] **Burrett, R., et al** , Renewable energy policy network for the 21st century. REN21 Renewables Global Status Report, 2009.
- [2] **Mekhelfi, A**, Evolution des exportations gazières de l'Algérie et son impact au sein de l'OPEC (1970 à 2012). Algeria: Revue performance des entreprises algériennes, 2014.
- [3] **Klein, S.A., W.A. Beckman, and J.A. Duffie**, A design procedure for solar air heating systems. Solar Energy, 1977.
- [4] http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_capteur-solaire-thermique-plan.php.
- [5] **Bekkouche, S.M.A.**, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires. Thèses de Doctorat en Sciences Physiques, 2009.
- [6] **Slimane, S.**, tude du comportement thermique et dynamique d'un capteur solaire plan à air en présence des chicanes transversales. 2019.
- [7] **Chabane, F., N. Moumami, and S. Benramache**, Experimental study of heat transfer and thermal performance with longitudinal fins of solar air heater. Journal of advanced research, 2014..
- [8] **Mohammadi, K. and M. Sabzpooshani**, Appraising the performance of a baffled solar air heater with external recycle. Energy Conversion and Management, 2014.
- [9] **Assadeg, J.**, Thermal performance of a finned double-pass solar air collector integrated with a nanoparticle enhanced-pcm tubular storage system, 2021.
- [10] **Hussein, N.F., S.T. Ahmed**, Thermal performance of double pass solar air heater with tubular solar absorber. International Journal of Renewable Energy Development, 2023.
- [11] **Kumar, R., et al.**, Experimental assessment and modeling of solar air heater with V shape roughness on absorber plate. Case Studies in Thermal Engineering, 2023.
- [12] **Abdulkareem, A. and K. Al-Farhany**, Experimental Investigation on Performance Comparison between Flat Plate and Matrix of Tubes Solar Air Heater. Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences., 2024.
- [13] **Hu, Y., et al.**, Experimental and numerical study of a PCM solar air heat exchanger and its ventilation preheating effectiveness. Renewable Energy, 2020.
- [14] **Jarrar, O.M. and A.Y. Al-Zoabi**, The applicability of sustainable city paradigm to the city of Jerusalem: Criteria and indicators of efficiency. Building and Environment, 2008.

- [15] **Jalil, J.M., R.F. Nothim, and M.M. Hameed**, Effect of wavy fins on thermal performance of double pass solar air heater. *Engineering and Technology Journal*, 2021.
- [16] **Baissi, M.T.**, étude numérique et expérimentale du transfert thermique à l'intérieur des canaux utilisant des rugosités artificielles: application aux capteurs solaires plans à air. 2019.
- [17] **Ozgen, F., M. Esen, and H. Esen**, Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminium cans. *Renewable Energy*, 2009.
- [18] **Labed, A., et al.**, Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle. *Revue des Energies Renouvelables*, 2009.
- [19] **Darici, S. and A. Kilic**, Comparative study on the performances of solar air collectors with trapezoidal corrugated and flat absorber plates. *Heat and Mass Transfer*, 2020.
- [20] **Daliran, A. and Y. Ajabshirchi**, Theoretical and experimental research on effect of fins attachment on operating parameters and thermal efficiency of solar air collector. *Information processing in agriculture*, 2018.
- [21] **Kumar, R. and S.K. Verma**, Experimental assessment and modeling of solar air heater with V shape roughness on absorber plate. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2023.
- [22] **Singh, A.K., A. Saxena, and N. Agarwal**, Performance analysis of a serrated absorber plate solar air heater with paraffin wax storage. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024.
- [23] **Muthukumaran, J. and R. Senthil**, Experimental performance of a solar air heater using straight and spiral absorber tubes with thermal energy storage. *Journal of Energy Storage*, 2022.
- [24] **Balakrishnan, P., et al.**, Energy and enviro-economic analysis of a solar air heater with wedge turbulators. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023.
- [25] <http://www.distrimesure.com/fr/luxmetres-solarimetres-testeurs-de->
- [26] <http://www.davisinstruments.com/resources/wether-instruments>
- [27] <https://www.wanptek.com/wp-content/uploads/2021/02/kps3010D-Product-Documentation.pdf>
- [28] **Lazzara, M.A., et al.**, Antarctic automatic weather station program: 30 years of polar observation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012.

- [29] **Zalba, B., et al.**, Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications. Applied thermal engineering, 2003.
- [30] **Ahmad, M., et al.**, Thermal testing and numerical simulation of a prototype cell using light wallboards coupling vacuum isolation panels and phase change material. Energy and buildings, 2006.

ملخص

تُجرى هذه الدراسة التجريبية مقارنةً بين أداء المجمع الشمسي الهوائي المزود بشفرات وآخر بدونها، باستخدام مصدر حرارة صناعي في مختبر جامعة أبي بكر بلقايد بتلمسان (ETAP). وتُظهر النتائج التأثير الإيجابي للشفرات على الكفاءة الحرارية للمجمع. كما أوليت عناية خاصة لزاوية ميل الماص للحرارة بالنسبة للشفرات، حيث بينت القياسات التي أُجريت بالأدوات الموصوفة في البروتوكول التجريبي أن الزاوية المثلى هي 45°.

بعد ذلك، نُفذت دراسة ثانية في ظروف حقيقية على المجمع المزود بزاوية ميل 45°. ثم تم دمج مبادل حراري يحتوي على مادة البارافين (مادة متغيرة الطور) ضمن النظام، ما ساعد على تقليل تقلبات درجة الحرارة واستقرار حرارة المخرج. وقد أدت هذه الإضافة إلى تحسين ملحوظ في تنظيم الحرارة داخل المجمع الشمسي.

الكلمات المفتاحية: المجمع الشمسي الهوائي، الشفرات، الإشعاع الشمسي، دراسة تجريبية، المواد متغيرة الطور (MCP)، الكفاءة الطاقية.

Abstract

This experimental study compares the performance of an air-based solar collector with and without fins, using an artificial heat source in the laboratory of Abou Bekr Belkaïd University in Tlemcen (ETAP). The results demonstrate the positive impact of fins on the thermal efficiency of the collector. Particular attention was given to the inclination angle between the absorber and the fins, revealing that the optimal angle is 45°.

Subsequently, a second study was carried out under real outdoor conditions on the solar air heater equipped with 45° inclined fins. A heat exchanger containing paraffin (a phase change material, PCM) was integrated into the system, which helped reduce temperature fluctuations and stabilize the outlet temperature and improved the thermal regulation of the solar collector.

Keywords: Air solar collector, fins, solar radiation, experimental study, Phase Change Materials (PCM), energy efficiency.

Résumé

Cette étude expérimentale compare les performances d'un capteur solaire à air avec et sans ailettes, en utilisant une source de chaleur artificielle dans le laboratoire de l'Université Abou Bekr Belkaïd à Tlemcen (ETAP). Les résultats démontrent l'impact positif des ailettes sur l'angle d'inclinaison entre l'absorbeur et les ailettes, révélant que l'angle optimal est de 45°.

Ensuite, une seconde étude en conditions réelles a été menée sur le capteur équipé d'ailettes inclinées à 45°. Un échangeur de chaleur contenant de la paraffine (matériau à changement de phase) a été intégré au système, qui a pu réduire les fluctuations et stabiliser la température de sortie et a permis d'améliorer significativement la régulation thermique du capteur solaire.

Mots clés: Capteur solaire à air, ailettes, rayonnement solaire, étude expérimentale, Matériaux à changement de phase (MCP), efficacité énergétique.