

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 أبو بكر بلكايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE



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

En: Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté

par

BENDAHMANE RANIA & BENSABER ABDELHAKIM

Sujet

Etude thermique d'un capteur solaire plan avec un plaque absorbante en matière composite

Devant le jury composé de :

Mr. YOUSFI SIDI MOHAMED	MCB	Université de Tlemcen	président
Mme. BENAHMED LAMIA	MCA	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. SICHAIB AMEL	MAA	Université de Tlemcen	Encadrante
Mr. ALIANE KHALED	Professeur	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail. Nous adressons nos sincères remerciements à l'ensemble des enseignants qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours universitaire et qui ont contribué à notre formation scientifique et académique. Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadreuse, **Madame SICHAIB AMEL** pour son encadrement précieux, sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien constant tout au long de la réalisation de ce mémoire. Nos remerciements s'adressent également à **Monsieur BENREMDAN Mohamed**, Chef du Département, pour son soutien et les moyens mis à notre disposition durant notre cursus universitaire. Nous tenons aussi à remercier chaleureusement les membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer ce travail et qui ont accepté de consacrer une partie de leur temps à son examen. Leurs remarques et suggestions contribueront sans aucun doute à l'amélioration de ce mémoire. Enfin, nous adressons nos remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la réalisation de ce travail.

Dédicace

إلى الذي أحمل اسمه بكل فخر واعتزاز، إلى من كرس حياته ليمنحني فرصة العلم ويصل بي إلى ما أنا عليه اليوم، إلى من كانت عيناه تترقبان لحظة تخرجي وحصولي على شهادة الماستر. لقد رحلت عن دنيانا منذ ستة أشهر، لكن ذكراك لم تغادر قلبي يوماً، وما زلت أشعر بحضورك في كل خطوة من خطوات نجاحي. جنّتك اليوم لأقول لك إن "آخر العنقود" قد أوفت بوعدها وتخرجت. رحمك الله أبي العزيز وأسكنك فسيح جناته

إلى بؤرة النور التي تضيء حياتي، إلى من علمتني أن طريق النجاح يُبنى بالصبر والاجتهاد، إلى من غرست في نفسي الثقة والأمان، وأحاطتني بدعواتها الصادقة في كل حين. إلى أمي الحبيبة، التي مهما كبرت سأبقى طفلتها التي تلجأ إليها في كل ضيق، أهديك هذا العمل المتواضع راجية رضاك ودعواتك المباركة

إلى زوجي العزيز، الذي تحمّل معي مشقة هذه المرحلة، وصبر على انشغالي الطويل بإعداد هذه المذكرة، واحتوى ضغوط البحث وتوتر التخرج في بداية حياتنا الزوجية، فكان خير سند ورفيق درب. إليك أهدي هذا الإنجاز، داعية الله أن يحفظك ويدعمك عليك الصحة والسعادة

إلى أختي الغالية ورفيقة دربي شهرزاد، التي كانت دائماً مصدر دعم ومحبة، حفظك الله ورعاك .

إلى إخوتي الأعزاء: إسلام، ياسين، وجمال، الذين كانوا خير سند وعون.

إلى أمي الثانية، أم زوجي الغالية، التي رافقتني بدعمها وتشجيعها، حفظك الله وأدام عليك الصحة والعافية.

وإلى أخوات زوجي العزيزات، فريهان وخديجة، اللواتي استقبلنني بكل حب ومودة بارك الله فيكما وأدام بيننا المحبة والوفاق .

إلى زميلاتي وصديقاتي اللاتي شاركنني سنوات الدراسة الخمس بكل ما حملته من اجتهاد ومثابرة وذكريات جميلة أهدىكن ثمرة هذا النجاح وفرحته .

إلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، أهدي ثمرة جهدي، راجية من الله التوفيق

BENDAHMANE Rania

Dédicace

Je souhaite manifester ma sincère reconnaissance à ma famille bien-aimée pour son appui psychologique, sa constance et son encouragement continu durant l'intégralité de mon parcours académique . Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents, dont les sacrifices, l'amour et la confiance ont été des piliers de motivation et de force en période d'adversité. Je tiens également à remercier chaleureusement mes frères **Ahmed Ilyes Et Yacine et Omar** pour leur appui constant, leur présence et leurs encouragements sans faille qui ont été déterminants pour me permettre de poursuivre mes études dans les meilleures dispositions.

BENSABER

AbdelHakim

الملخص

تتناول هذه المذكرة دراسة حرارية لمجمع شمسي مسطح مزود بلوح ماص مصنوع من مادة مركبة. يهدف هذا العمل إلى تحليل الأداء الحراري لهذا النوع من المجمعات من خلال دراسة انتقال الحرارة داخل النظام، بما في ذلك الإشعاع، والحمل، والتوصيل الحراري. تم التركيز على خصائص المواد المركبة المستعملة في اللوح الماص، خاصة من حيث الناقلية الحرارية والسعة الحرارية، وتأثيرها على مردود المجمع الشمسي. أظهرت النتائج أن استخدام المواد المركبة يمكن أن يحسن من كفاءة المجمع الشمسي بفضل خصائصها الحرارية الجيدة وخفة وزنها، مما يجعلها بديلاً واعداً للمواد التقليدية.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية -نقل الحرارة -التوصيل -الحمل الحراري -الإشعاع -جامع الهواء الشمسي -الكفاءة الحرارية

Abstract:

This thesis focuses on the thermal study of a flat-plate solar collector equipped with a composite material absorber plate. The main objective is to analyze the thermal performance of the collector by studying the different heat transfer modes: conduction, convection, and radiation. Special attention is given to the thermophysical properties of the composite material, particularly thermal conductivity and heat capacity, and their impact on the collector efficiency. The results show that the use of composite materials can enhance the thermal efficiency of the solar collector due to their favorable properties and lightweight nature, making them a promising alternative to conventional materials.

Keywords: solar energy - heat transfer - conduction - convection – radiation - solar collector - thermal efficiency.

Résumé

Cette recherche se concentre sur l'analyse thermique d'un capteur solaire plan qui est doté d'une plaque d'absorption réalisée en matériau composite. La finalité principale consiste à examiner les rendements thermiques du capteur en scrutant les divers types de transfert de chaleur : conduction, convection et rayonnement.

On porte une grande importance aux caractéristiques thermo-physiques du matériau composite employé, en particulier la conductivité thermique et la capacité de stockage de chaleur, et à leur impact sur l'efficacité du capteur

Les données recueillies indiquent que l'emploi de matériaux composites améliore l'efficacité thermique du capteur solaire tout en allégeant son poids, offrant ainsi une solution captivante par rapport aux Les données obtenues indiquent que l'emploi de composites améliore l'efficacité thermique du capteur solaire et diminue son poids, offrant ainsi une option séduisante face aux matériaux traditionnels.

Mots-clés : énergie solaire - transfert thermique - conduction - convection - radiation - capteur solaire - rendement thermique.

Sommaire

Introduction générale	01
CHAPITRE I : Généralités sur les capteurs solaires thermique	
Introduction	04
I.1. Energie solaire et principe de conversion thermique	04
I.2. Capteur solaire thermique	06
I.2.1. Classifications	06
I.2.2. Application du capteur solaire thermique	07
I.2.2.1. Eau chaude sanitaire	07
I.2.2.2. Chauffage de piscine	08
I.2.2.3. Chaleur pour les processus industrielle	09
I.3. Capteur solaire plan	09
I.3.1 Capteur solaire plan sans vitrage	09
I.3.2. Capteur solaire plan vitré	10
I.3.3. Les capteurs à tubes sous vide	11
I.4. Le fonctionnement d'un capteur thermique plan	12
I.5. Les composants d'un capteur thermique plan	13
I.5. Paramètres influençant les performances des capteurs solaires thermiques	15
Conclusion	15
CHAPITRE II : Matériaux Composites et Plaques absorbantes	
Introduction	17
II.1. Définition et classification des matériaux composites	17
II.1.1 Définition des matériaux composites	17
II.1.2 Classification des matériaux composites	19
II.2 Propriétés thermiques et mécaniques des composites	22
II.2.1 Propriétés mécaniques	22
II.2.2 Propriétés thermiques	22
II.3 Plaque absorbante	23
II.3.1 Rôle et exigences thermiques	23
II.3.2 Comparaison composite	25

II.4 Choix du matériau composite étudié	26
II.5 Avantages et limites des matériaux composites :.....	27
II.5.1 Avantages.....	28
II.5.2 Limites	28
Conclusion :.....	28

CHAPITRE III : Modélisation Thermique D'un Capteur Solaire Plan

Introduction	30
III.1. Hypothèses	30
III.2. Bilan thermique d'un capteur thermique plan.....	30
III.3. Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement	31
III.4. Rendement du capteur	32
III.4. Le coefficient des pertes thermiques du capteur :	32
III.4.1- Estimation du coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur	35
III.4.2. Coefficients des pertes thermiques vers l'avant du capteur	36
III.4.3. Coefficients des pertes thermiques vers l'arrière du capteur	36
III.5. Propriétés du matériau composite	37
III.6 Présentation de l'étude de référence pour la validation	37
Conclusion	38

Chapitre IV : Résultats et discussions

Introduction	40
IV.1. Présentation du capteur	40
IV.2. Méthode de résolution :	41
IV.2.1. Etude thermique d'un capteur solaire avec plaque absorbante en matière monolithique (en Aluminium)	41
IV.2.2. Etude thermique d'un capteur solaire avec plaque absorbante en matière composite	41
IV.2.2.1 Hypothèses spécifiques au composite	41
IV.3. Résultats et discussions	45
Conclusion	47
Conclusion général	49
Bibliographie.	

Liste des figures

Fig I.1. Types d'énergie solaire.	04
Fig I.2. Rayonnement solaire reçue par un plan incliné.	05
Fig I.3. Capteur solaire thermique.	06
Fig I.4. Classifications de Capteur solaire thermique.	07
Fig I.5. Eau chaude sanitaire.	08
Fig I.6. Chauffage de piscine.....	08
Fig I.7. Chaleur pour les processus industriels.....	09
Fig I.8. Capteur solaire plan sans vitrage.	10
Fig I.9. Capteur solaire plan vitré.....	11
Fig I.10. Capteur solaire sous vide.	12
Fig I.11. Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	12
Fig.I.12. Les composants d'un capteur thermique plan.	13
Fig II.1. Illustration des principaux types de fibres utilisées dans les matériaux composites.....	18
Fig II.2. Représentation schématique d'un système composite multicouche appliqué sur une structure.....	24
Fig II.3. Un capteur solaire thermique multicouches.	25
Fig II.4. Illustration des principaux matériaux conventionnels utilisés dans le domaine de la construction	26
Fig. III.1: schéma de bilan thermique d'un capteur solaire plan.....	29
Fig III.2. Comportement du corps vis-à-vis du rayonnement.	32
Fig. III.3. Circuit électrique équivalant à un capteur solaire plan.	35
<i>Fig IV.1.</i> Comparaison de rendement pour un capteur en composite et capteur en aluminium.	45
<i>Fig IV.2.</i> Evolution temporelle des pertes pour un capteur en composite et un capteur en aluminium.	45

Nomenclature

Symbole	Désignation	unité
Ω	L'angle horaire	Degree (°)
A	L'azimut solaire	Degree (°)
H	La hauteur du Soleil	Degree (°)
C_0	Constante solaire	W/m ²
θ_1	Angle d'incidence	Degree (°)
θ_2	angle de réfraction	Degree (°)
τ	Coefficient de transmission	/
τ_a	coefficient de réfraction de vitrage	/
τ_r	Coefficient de réfraction	/
τ_d	Facteur de transmission hémisphérique du vitrage qu'il soit simple ou multiple, que l'on peut prendre $=\tau$ (60°)	/
I	angle d'inclinaison du plan du capteur	Degree (°)
α	Coefficient d'absorption	/
ε_{ab}	Coefficient d'émissivité de l'absorbeur	/
ε_v	Coefficient d'émissivité de la vitre	/
Z	taux de transmission	/

ρ_a	Coefficient de réflexion de l'absorbeur	/
ρ_d	La réflectivité hémisphérique moyenne du vitrage	/
C_p	Pouvoir calorifique	(J/kg.K)
λ	Conductivité thermique	W/m.k
I_a	Le flux absorbé à la surface de l'absorbeur	W/m ²
I_c	Le flux solaire tombant sur le plan du capteur (G).	W/m ²
I_d	flux direct incident sur la surface du capteur	W/m ²
η_0	Rendement optique d'un capteur solaire	/
DH	Diamètre hydraulique	m
Re	Le nombre de Reynolds	/
Nu	Le nombre du Nusselt	/
Pr	Le nombre de Prandtl	/
μ	viscosité dynamique du fluide	Kg/m.s
Gr	Le nombre de Grashof	/
V	Vitesse d'écoulement du fluide caloporteur	m/s
U_{vent}	Vitesse de vent	m/s
f	Facteur correctif tenant compte de l'effet du Vent	/
C	Facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison	/
U_{av}	coefficient de perte avant	W/m ² .K
U_{ar}	coefficient de perte arrière	W/m ² .K
U	coefficient de perte globale	W/m ² .K
h_w	Coefficient de perte par convection forcée en présence du vent	W/m ² .K
hc (iso.flui)	Coefficient d'échange par convection entre isolant et le fluide caloporteur	W/m ² .K

h_c (ab.f)	Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.	W/m ² .K
h_{cav}	Coefficient d'échange pour convection entre la vitre et l'absorbeur	W/m ² .K
h_{rav}	Coefficient de transfert par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur	W/m ² .K
h_{rve}	Coefficient des pertes par rayonnement entre la vitre et l'extérieur	W/m ² .K
λ_{is}	Conductivité thermique de l'isolant	W/m.k
e_{is}	Epaisseur de l'isolant	m
φ_{Pav}	Puissance thermique perdue vers l'avant du capteur	W
φ_{Par}	Puissance thermique perdue vers l'arrière du capteur	W
φ_u	Puissance thermique utile	W
φ_{ab}	Puissance thermique absorbé	W
φ_{st}	Puissance thermique stockée	W
T_e	Température d'entrée	K
T_s	Température de sortie	K
T_a	Température d'ambiante	K
T_{fm}	Température moyenne de fluide caloporteur	K
T_{abm}	Température moyenne de la plaque absorbante	K
T_v	Température de vitre	K
T_{ab}	Température de l'absorbeur	K
T_{ciel}	Température de ciel	K
T_{is}	Température de l'isolant	K

INTRODUCTION GENERALE

Face à l'augmentation continue de la demande énergétique mondiale et aux préoccupations croissantes liées aux changements climatiques, le recours aux énergies renouvelables est devenu une nécessité incontournable. Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une place privilégiée grâce à son abondance, sa disponibilité et son caractère propre. La valorisation de cette énergie constitue aujourd'hui un axe majeur de recherche visant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre.

Les capteurs solaires thermiques représentent l'une des technologies les plus efficaces pour convertir directement le rayonnement solaire en énergie thermique utilisable dans diverses applications telles que la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage des bâtiments, le séchage agricole et certains procédés industriels. Les performances de ces systèmes dépendent fortement de la qualité de leurs composants, notamment de la plaque absorbante qui assure l'absorption du rayonnement solaire et le transfert de la chaleur vers le fluide caloporteur. Traditionnellement, les plaques absorbantes sont fabriquées à partir de matériaux métalliques tels que l'aluminium ou le cuivre, reconnus pour leur excellente conductivité thermique. Toutefois, ces matériaux présentent certaines limites, notamment leur poids relativement élevé, leur sensibilité à la corrosion dans certaines conditions d'utilisation ainsi que leur coût parfois important. Dans ce contexte, les matériaux composites apparaissent comme une alternative prometteuse grâce à leur faible masse volumique, leur bonne résistance mécanique, leur durabilité et leur possibilité d'adaptation aux exigences spécifiques des applications thermiques. L'intégration des matériaux composites dans les capteurs solaires thermiques soulève néanmoins plusieurs interrogations concernant leur comportement thermique, leur capacité à transférer efficacement la chaleur ainsi que leur influence sur le rendement global du capteur. Une étude approfondie est donc nécessaire afin d'évaluer leur potentiel et de comparer leurs performances à celles des matériaux conventionnels.

Le présent mémoire a pour objectif d'étudier le comportement thermique d'un capteur solaire plan dont la plaque absorbante est réalisée en matériau composite. Cette étude repose sur l'analyse des différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), l'établissement d'un modèle thermique du capteur ainsi que l'évaluation de ses performances énergétiques à travers le calcul des pertes thermiques et du rendement.

Introduction générale

L'organisation du travail se fait en quatre chapitres qui sont à la fois complémentaires et progressifs :

Chapitre 1 : présente des généralités sur l'énergie solaire et les capteurs solaires thermiques, leur principe de fonctionnement, leurs composants ainsi que les paramètres influençant leurs performances.

Chapitre 2 : est consacré à l'étude des matériaux composites, à leurs propriétés thermiques et mécaniques ainsi qu'à leur utilisation potentielle dans les plaques absorbantes des capteurs solaires.

Chapitre 3 : développe la modélisation thermique du capteur solaire plan en établissant les bilans énergétiques et les équations nécessaires à l'évaluation des pertes thermiques et du rendement.

Chapitre 4 : présente les résultats obtenus, leur analyse ainsi qu'une comparaison entre une plaque absorbante conventionnelle en aluminium et une plaque absorbante en matériau composite.

Une conclusion générale se rapportant à ce travail, complète le mémoire.

Chapitre I

Généralités sur les capteurs solaires thermique

Introduction :

Malgré la distance de plus de 150 millions de kilomètres qui nous sépare du soleil, ce dernier demeure une source d'énergie sans fin pour l'humanité. Il est à l'origine de la majorité des énergies présentes sur notre planète et le rayonnement solaire se distingue comme une source d'énergie renouvelable, gratuite et presque infinie. Bien que la conversion photovoltaïque soit fréquemment mise en avant, le solaire thermique ou la conversion thermique est l'une des techniques les plus anciennes et efficaces pour convertir l'énergie solaire en chaleur utile. Le capteur solaire thermique constitue le noyau technologique de cette transformation. Ce dispositif est le centre névralgique de toute mise en place solaire thermique. Alors, comment le capteur solaire peut-il convertir cette énergie pour en bénéficier ?

Comment le capteur solaire peut-il convertir cette énergie et en bénéficier ?

I.1. Energie solaire et principe de conversion thermique :

Le soleil est une sphère de gaz principalement composée d'hydrogène. Son énergie provient de réactions thermonucléaires (le deutérium et le tritium fusionnent pour produire de l'hélium) [1]. Comme le suggère son appellation, l'énergie solaire provient du soleil. L'énergie solaire, qui utilise des panneaux solaires pour exploiter directement l'énergie du soleil, se subdivise en deux technologies distinctes : celle qui produit de la chaleur, autrement dit l'énergie solaire thermique, et celle qui génère de l'énergie solaire photovoltaïque se définit comme l'électricité [2].

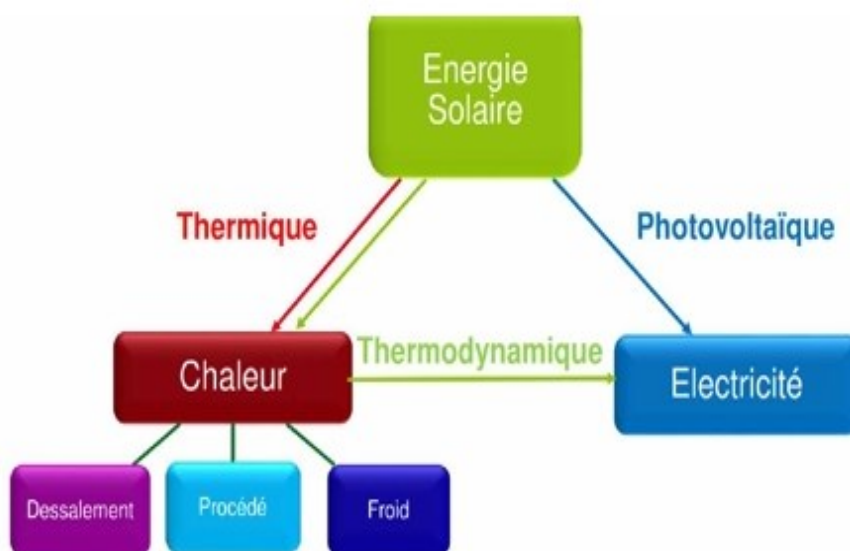


Fig I.1. « Types d'énergie solaire ».

Le concept de la conversion thermique repose sur la capacité d'un objet (généralement un capteur noir) à absorber le rayonnement, qui est ensuite restitué sous forme de rayonnement infrarouge. Une portion de cette énergie est interceptée par la serre naturelle de l'air, ce qui contribue à maintenir une température propice à la vie. Toutefois, l'accroissement des gaz à effet de serre stimule ce phénomène, entraînant le réchauffement climatique que nous observons actuellement.

L'énergie thermique repose sur le principe de convertir la lumière solaire en chaleur. Pour débiter, un faisceau de soleil traverse une plaque de verre clair ; par la suite, ce faisceau lumineux est capté par l'absorbeur, qui est un métal noir ayant la capacité d'absorber entre 80 et 90 % des rayons solaires. L'absorbeur transfère la chaleur à un liquide qui circule dans des panneaux exposés au soleil, dans le but d'évacuer la chaleur emmagasinée par l'absorbeur et de la diriger vers l'endroit où elle sera exploitée.

Le solaire thermique à basse température est souvent utilisé pour des applications telles que le chauffe-eau solaire, le réchauffement des édifices et la chauffe des bassins. Le système de chauffe-eau solaire, économique, nécessite des températures de 60 à 70 degrés Celsius et emploie des panneaux capteurs basiques. Le dispositif de chauffage comporte deux circuits d'eau qui convergent dans le réservoir de stockage : l'un est destiné à l'eau (le fluide caloporteur) qui est chauffée par le capteur solaire, tandis que l'autre concerne l'eau utilisée à domicile, fournissant de l'eau chaude ou du chauffage domestique.

Cette conversion d'énergie peut être directe si l'on vise uniquement à chauffer de l'eau pour un usage domestique. Afin de produire de l'électricité, on doit recourir à des générateurs pouvant convertir l'énergie thermique en électricité, tels que les moteurs fonctionnant à l'air chaud. [3]

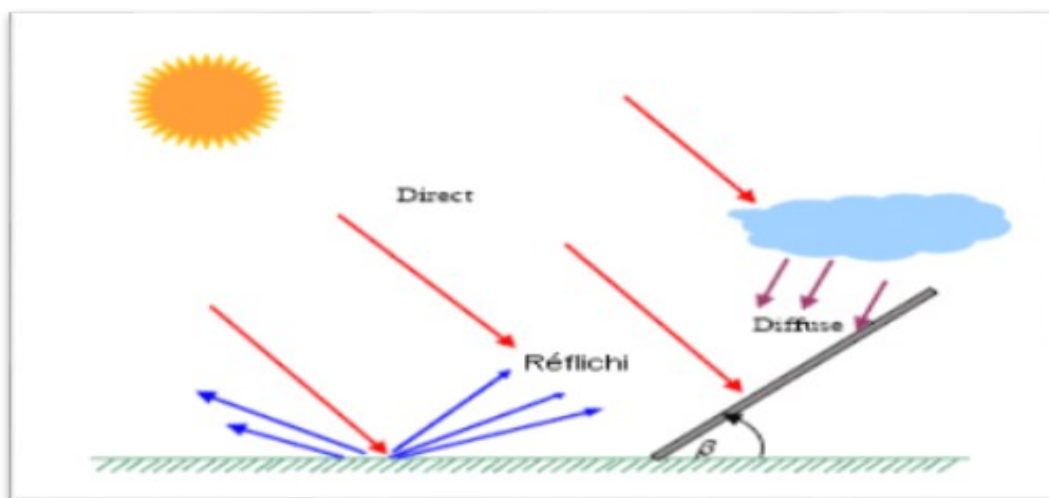


Fig I.2. « Rayonnement solaire reçue par un plan incliné ». [1]

I.2. Capteur solaire thermique :

Un capteur solaire thermique a pour fonction de convertir le rayonnement solaire qu'il capte en énergie thermique exploitable, généralement par le biais d'un fluide porteur de chaleur (eau, air, etc.). Les faisceaux solaires traversent le verre et sont absorbés par une plaque qui capte les rayons infrarouges. Il y a un circuit d'eau derrière cette plaque chaude qui recueille la chaleur. Le mouvement de l'eau peut se produire par un processus physique, puisque l'eau chaude est plus légère que l'eau froide, ce qui favorise son ascension naturelle, un phénomène connu sous le nom de thermosiphon. [4]



Fig I.3. « capteur solaire thermique ». [2]

I.2.1. Classifications :

Il distingue essentiellement deux catégories de capteurs solaires thermiques.

Le capteur plan le plus basique et économique, ainsi que le capteur à tubes sous vide, qui offre une meilleure performance solaire en capturant plus efficacement la lumière solaire. [2]

Un capteur solaire sous vide, comme l'illustre la figure I.4, se compose d'une série de tubes en verre transparent ayant un diamètre variant entre 5 et 15 cm. Dans une installation de ce type, un appareil absorbant est employé pour recueillir les rayons du soleil, et un échangeur thermique est installé pour faciliter le transfert de chaleur.

La conduction de la chaleur. Les tubes sont méticuleusement purgés pour prévenir les pertes thermiques convectives de l'absorbeur, ce dernier bénéficie d'un traitement sélectif afin d'exclure le rayonnement. Par conséquent, il est faisable de produire des capteurs solaires performants sans nécessiter d'une isolation thermique ou d'un niveau de protection particulier. Il

est simplifié de produire des tubes et d'assembler des capteurs, étant donné qu'il n'est pas nécessaire de réaliser des soudures verre-métal.[5]

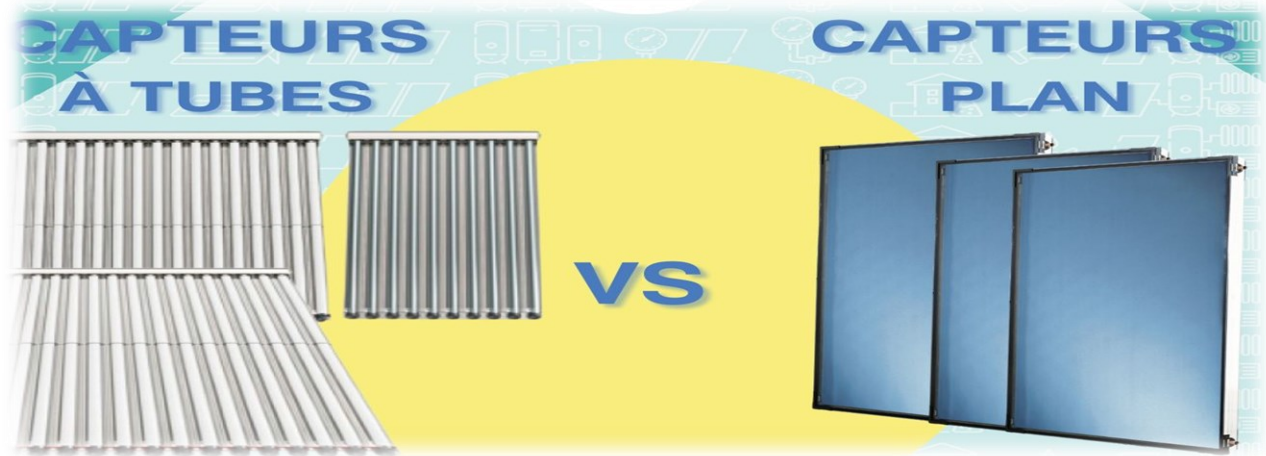


Fig I.4. «Classifications de Capteur solaire thermique ».[3]

I.2.2. Application des capteur solaire thermique :

La chaleur produite par les détecteurs peut servir à [5] :

- Chauffer les pièces et générer de l'eau chaude pour un usage domestique.
- Favoriser la croissance des plantes.
- Sécher les céréales et les fourrages.
- Mettre en marche des moteurs thermiques.
- la distillation par énergie solaire.
- Fournir des machines réfrigérées.
- Les fours à énergie solaire.

La méthode de capture est facile.

I.2.2.1. Eau chaude sanitaire :

L'eau chaude sanitaire est employée dans divers équipements sanitaires tels que les douches, les baignoires, les lavabos et les éviers. Elle est habituellement fabriquée à une température approximative de 55°C, mais peut également être modifiée pour être moins chaude, aux alentours de 35°C. L'ECS, ou eau chaude sanitaire, est générée par un appareil électrique. C'est essentiellement un cumulus ou un ballon électrique. L'eau chaude peut être produite par une chaudière, une pompe à chaleur ou des équipements exploitant des énergies renouvelables comme les capteurs solaires thermiques ou le chauffe-eau thermodynamique, qui intègre un réservoir et une pompe à chaleur. La température de 55°C pour l'eau chaude sanitaire représente un seuil sanitaire, car si elle descend en dessous de cette limite, le risque de développement de la légionellose s'accroît. [6]

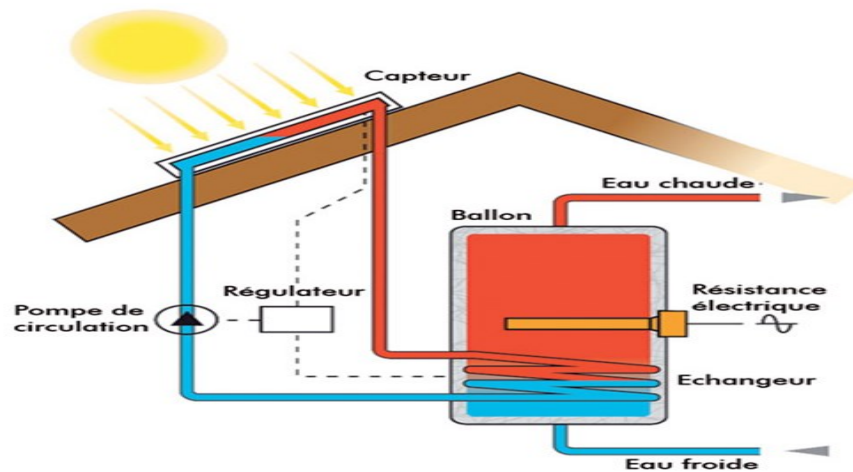


Fig I.5. « Eau chaude sanitaire ».[4]

I.2.2.1. Chauffage de piscine :

L'utilisation de capteurs noirs pour maximiser l'absorption de la chaleur solaire est facilitée par le fait de chauffer l'eau à une température inférieure au point d'ébullition. Ceci constitue un exemple concret de l'usage de la chaleur solaire directe. La chauffe d'une piscine peut consommer une grande quantité d'énergie. Par ailleurs, dans certains pays, l'utilisation d'énergie non renouvelable pour le chauffer est interdite. Les chauffe-piscines à faible consommation d'énergie peuvent optimiser le chauffage de votre piscine et diminuer votre dépense énergétique. [7]



Fig I.6. « Chauffage de piscine ».[5]

I.2.2.3. Chaleur pour les processus industrielle :

Environ un tiers de la demande en chaleur en Suisse est satisfaite par le secteur industriel et commercial. Près de la moitié des processus de fabrication n'exigent que des températures atteignant 250 °C. Cette énergie peut être issue de la chaleur émise par le soleil. Les équipements en place sont majoritairement employés dans le domaine alimentaire et de la boisson, l'industrie textile et chimique, de même que dans des procédures de nettoyage simples, comme les stations de lavage automobile. [8]

A l'échelle industrielle

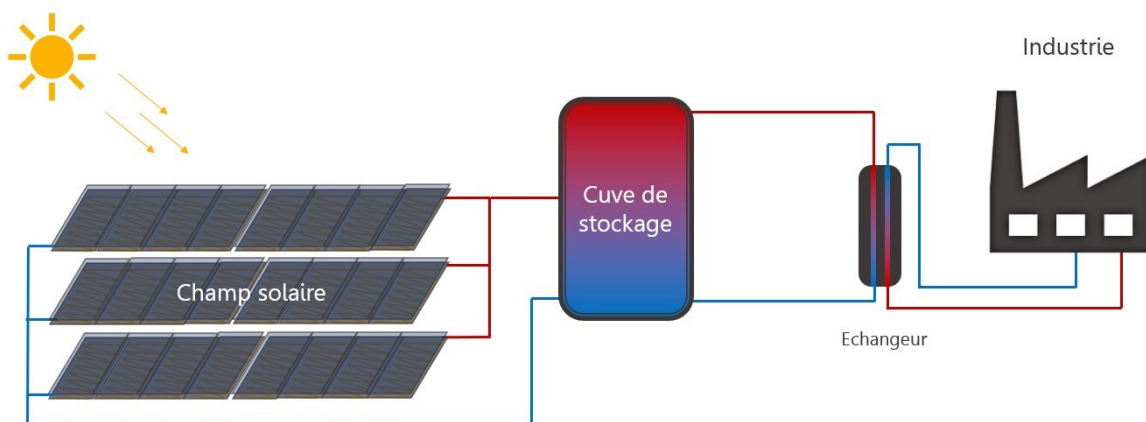


Fig I.7. « Chaleur pour les processus industrielle ».[6]

I.3. Capteur solaire plan :

Un capteur thermique plan solaire est un dispositif dont l'objectif est de transformer l'énergie du soleil en chaleur. [9]

Il existe différents modèles de capteurs solaires plans destinés au chauffage des fluides. Leur choix est habituellement déterminé en fonction de la température désirée et des conditions météorologiques pendant la durée d'utilisation du système. On distingue deux catégories de capteurs à liquide : les capteurs à liquide plans dépourvus de vitrage et les capteurs à liquide plans dotés d'un vitrage. [5]

I.3.1 Capteur solaire plan sans vitrage :

Ils sont généralement constitués de plastique polymère, sans traitement sélectif, et sans protection isolante à l'arrière. On les fixe sur un toit à l'aide d'un support en bois. Cependant, les capteurs économiques ont des performances moindres. Leur nombre augmente rapidement avec la hausse de la température de l'eau, surtout dans les zones boueuses. Les capteurs non vitrés sont fréquemment utilisés pour des usages nécessitant une énergie à température basse

(piscines, eau supplémentaire pour l'aquaculture, chaleur industrielle, etc.). Dans des conditions froides, ils sont souvent employés uniquement durant l'été en raison de leur fort coefficient de perte thermique. [5]

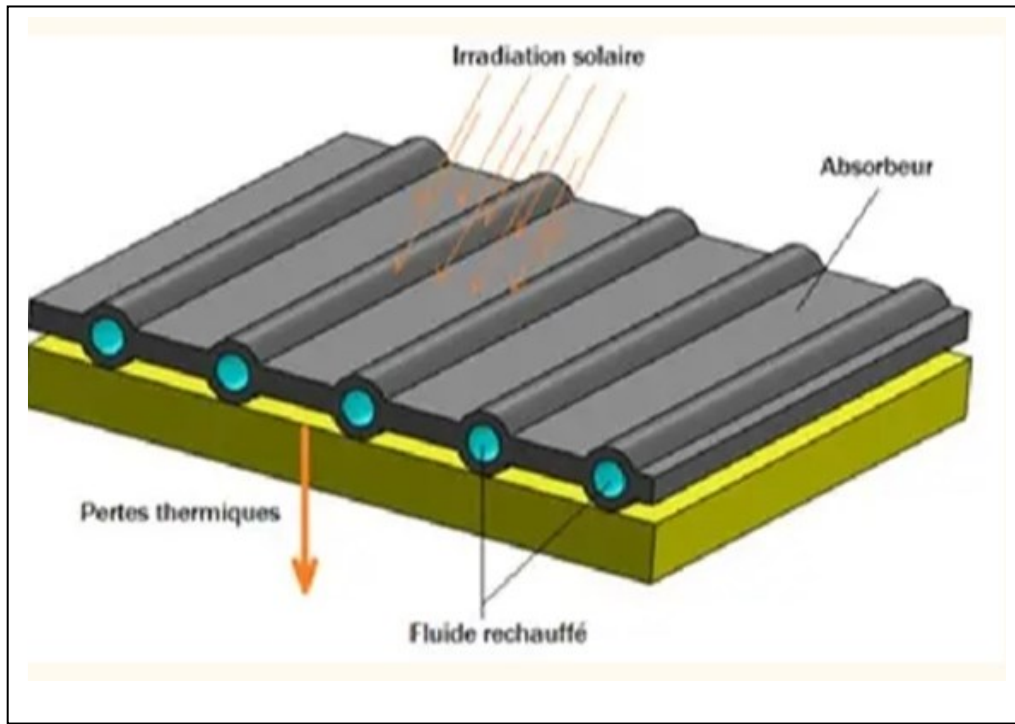


Fig I.8. « Capteur solaire plan sans vitrage ».[7]

I.3.2. Capteur solaire plan vitré :

On utilise généralement des capteurs équipés d'une protection transparente. Ils sont constitués d'une plaque noire métallique captant le rayonnement solaire, couplée aux tubes renfermant le liquide caloporteur. L'absorbeur, qui contient le fluide à chauffer dans un serpentín, est situé à l'intérieur. Afin d'optimiser l'absorption de chaleur par le serpentín, celui-ci est entouré d'ailettes noires qui transforment plus efficacement la chaleur qu'elles captent. Un isolant conçu pour résister à des températures hautes est positionné sous le tout dans le but de maintenir la chaleur à l'intérieur des tubes. Un verre couvre Des tubes de protection sont installés pour générer un effet de serre qui aide à élever la température du fluide caloporteur. L'objectif est d'atteindre des températures situées entre 30°C et 70°C.[2]

Dans ce type de modèle, l'absorbeur est préservé des pertes de chaleur grâce à un matériau isolant (généralement, de la laine de roche).

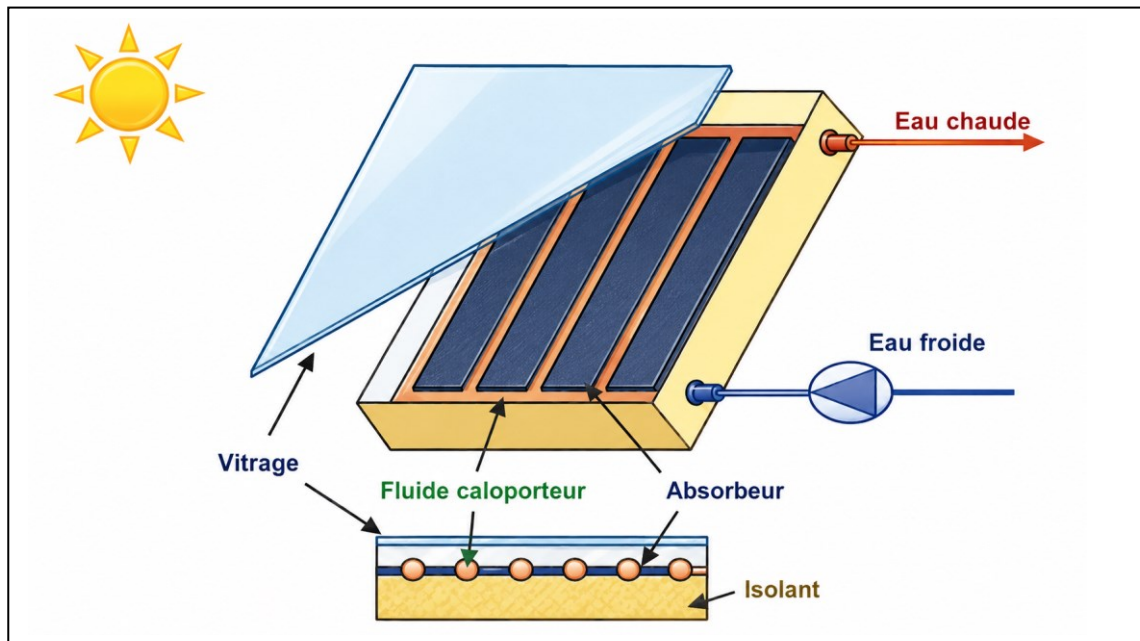


Fig I.9. « Capteur solaire plan vitré ».[8]

I.3.3. Les capteurs à tubes sous vide :

Les capteurs solaires « à vide » sont constitués d'une série de tubes en verre transparent. Chaque tube intègre une plaque conçue pour capter le rayonnement solaire, ainsi qu'un dispositif d'échange thermique pour promouvoir la dissipation de l'énergie thermique. Les tubes sont disposés en état de vide pour que Pour prévenir les pertes de chaleur convective provenant de la plaque absorbante, un traitement particulier est appliqué pour éviter que le rayonnement ne soit disséminé sous forme de longueurs d'onde significatives. Il est donc envisageable de créer des capteurs solaires performants sans recourir à une isolation thermique supplémentaire ou à un boîtier protecteur. La température de fonctionnement excède largement les 100°C. [2]



Fig I.10. « Capteur solaire sous vide ». [9]

I.4. Le fonctionnement d'un capteur thermique plan :

Le verre permet le passage du rayonnement solaire vers l'absorbeur ayant une surface sélective, et cet absorbeur convertit ce rayonnement en chaleur à sa surface. Le fluide de transfert thermique qui traverse l'absorbeur transporte la chaleur captée vers un échangeur thermique, qui ensuite la répercute à l'utilisateur final. Le verre est transparent au rayonnement visible et proche infrarouge, cependant il est opaque pour le rayonnement infrarouge lointain provenant de l'absorbeur. Donc, la transparence de la couverture produit un effet de serre. Le fait d'isoler thermiquement le capteur, ainsi que son environnement, diminue les déperditions de chaleur et optimise son rendement.

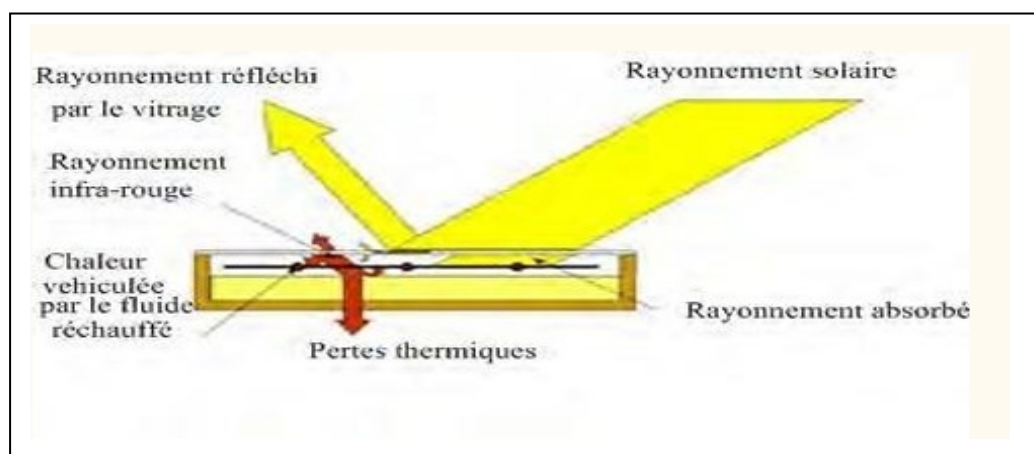


Fig I.11. « Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan ».[10]

I.5. Les composants d'un capteur thermique plan :

Un capteur plan est principalement composé d'une couverture transparente (verre), d'un absorbeur, d'un fluide de transfert thermique, d'une isolation thermique et d'une caisse (Figure I.12).

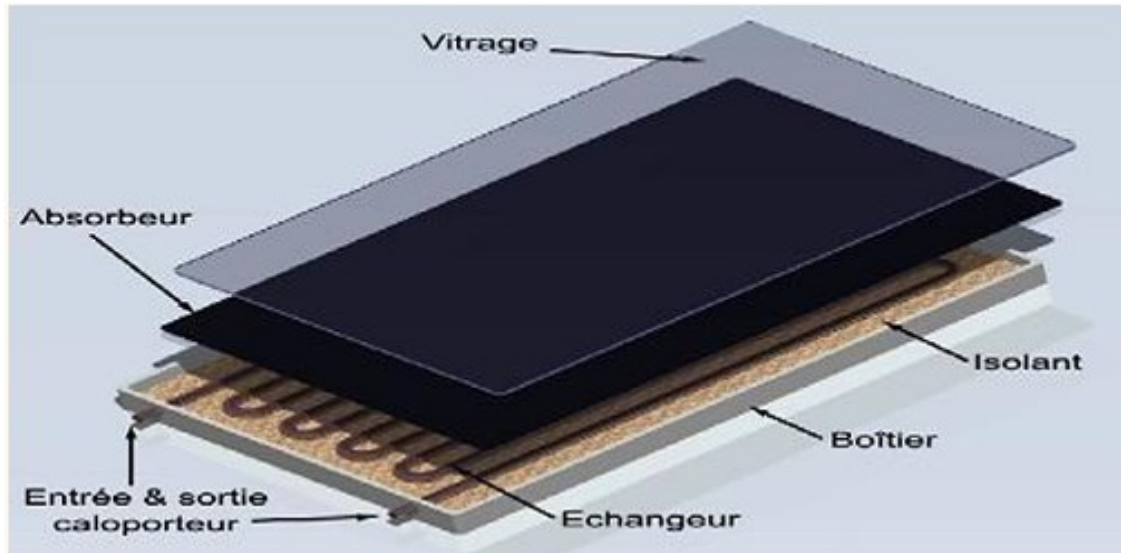


Figure.I.12. « Les composants d'un capteur thermique plan ». [11]

➤ L'absorbeur :

C'est le composant principal du capteur solaire qui capte le rayonnement solaire global à des longueurs d'onde courtes et le convertit en chaleur. C'est une plaque intégrant des tubes, à travers lesquels le caloporteur s'écoule. La plaque de l'absorbeur peut être réalisée à partir de substances métalliques (Aluminium, Cuivre, Zinc, Acier) ou de matières plastiques. [11]

➤ Le fluide caloporteur :

On utilise couramment de l'air ou de l'eau en tant que moyen de transfert thermique pour évacuer la chaleur retenue par la plaque absorbante. Par rapport à l'eau, l'air présente les avantages suivants :

- L'absence d'humidité ne pose pas de souci de corrosion.
- Une échappement d'air n'a aucun impact.
- Dans le cadre du réchauffement des zones, l'emploi d'un échangeur de chaleur n'est pas essentiel.
- Le mécanisme à mettre en place est plus simple et plus sécurisé.

L'utilisation de l'air au lieu de l'eau entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut être utilisé que pour réchauffer les espaces.
- Les conduits doivent être de large diamètre afin d'assurer un débit adéquat.

La performance de transfert thermique est moins bonne que celle de l'eau.

Quand des conduites soudées figurent à l'arrière de la plaque absorbante, il est crucial d'examiner soigneusement les joints pour réduire autant que faire se peut la résistance thermique au point de contact. [2]

➤ **Un vitre (couverture transparente) :**

Elle est utilisée tant pour optimiser la diffusion de la lumière solaire que pour empêcher le refroidissement de l'absorbeur, en réduisant les phénomènes de convection d'air et en bloquant le rayonnement infrarouge (effet de serre). Pour réduire les dangers d'accidents en cas de rupture, on privilégie généralement l'utilisation du verre trempé. On notera également l'utilisation de verre à faible contenu en oxyde de fer, ces types de verres présentent des caractéristiques optiques légèrement supérieures aux verres conventionnels. L'espace entre le couvercle transparent et l'élément absorbant varie de 25 à 40 mm. Un espace plus vaste favoriserait les pertes de chaleur par le biais de la convection. [2]

➤ **Un isolant thermique :**

La tâche de l'absorbeur est de transférer l'énergie qu'il a recueillie au fluide caloporteur tout en réduisant au minimum les pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement depuis les différentes parties périphériques vers l'extérieur. Afin de minimiser les déperditions de chaleur autour du capteur, il est possible d'installer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit être capable de résister aux températures élevées sans libérer de gaz. Autrement, on court le risque de voir un dépôt s'accumuler sur la face interne de la couverture. En plus de l'emploi d'un matériau isolant afin de minimiser les pertes thermiques, il est aussi possible d'améliorer l'adhérence entre la plaque, l'isolant et le boîtier en évitant une contrainte excessive sur ces surfaces. Effectivement, si l'une ou l'autre des surfaces présente une grande rugosité, un léger voile d'air pourrait se créer entre elles, ce qui freinerait le transfert de chaleur par conduction. [10]

➤ **Le coffre ou boîtier :**

L'enveloppe, généralement en bois ou en aluminium, abrite l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, fournissant ainsi une défense contre l'humidité et les lésions mécaniques. [10]

I.5. Paramètres influençant les performances des capteurs solaires thermiques :

L'efficacité des capteurs solaires thermiques dépend de plusieurs facteurs déterminants, notamment :

- **L'insertion de chicanes (Baffles) :** L'utilisation de chicanes, de formes rectangulaires ou trapézoïdales, modifie la dynamique de l'écoulement du fluide. Cela favorise la turbulence et améliore ainsi le transfert thermique.
- **La vitesse d'entrée du fluide :** La variation de la vitesse d'entrée impacte directement le régime d'écoulement et, par conséquent, l'efficacité de l'échange de chaleur.
- **La nature du fluide caloporteur :** Le choix du fluide (air ou eau) est crucial, car leurs propriétés thermophysiques respectives influencent la capacité de transport de l'énergie captée.
- **Les caractéristiques optiques et thermiques :** Le rendement global est dicté par la qualité du vitrage (transmittance) et de l'absorbeur (absorptivité), ainsi que par la performance de l'isolation pour limiter les pertes calorifiques vers l'extérieur.

Une analyse approfondie de ces paramètres est essentielle pour optimiser le rendement des capteurs et maximiser l'exploitation de l'énergie solaire. [11]

Conclusion

Pour résumer, ce premier chapitre a posé les bases théoriques nécessaires à l'interprétation de la conversion thermique, en précisant les lois physiques qui gouvernent le transfert de l'énergie solaire vers un fluide porte-chaleur. L'examen approfondi des capteurs à plat a souligné l'importance de la collaboration entre leurs éléments essentiels, tout en mettant en évidence les facteurs optiques et thermiques qui entravent ou améliorent leurs performances globales. Au vu des recherches et des études précédentes, il est évident que l'augmentation de l'efficacité de ces systèmes dépend de l'amélioration de la plaque absorbante, composant clé du transfert thermique. L'exploration de nouvelles solutions matérielles, plus légères et thermiquement performantes, est justifiée par ce besoin d'innovation technique. C'est en gardant cela à l'esprit que nous consacrons le prochain chapitre à l'examen des matériaux composites, dans le but d'évaluer leur potentiel comme substitut aux matériaux traditionnels pour la création de plaques absorbantes à efficacité élevée.

Chapitre II

MATERIAUX COMPOSITES ET PLAQUES ABSORBANTES

Introduction

L'amélioration des performances des capteurs solaires thermiques constitue un enjeu majeur dans le développement des systèmes de conversion de l'énergie solaire. Parmi les différents composants du capteur, la plaque absorbante joue un rôle essentiel puisqu'elle assure l'absorption du rayonnement solaire et son transfert sous forme de chaleur vers le fluide caloporteur. Les caractéristiques thermiques et mécaniques du matériau constituant cette plaque influencent directement le rendement global du capteur.

Traditionnellement, les plaques absorbantes sont fabriquées à partir de matériaux métalliques tels que le cuivre ou l'aluminium en raison de leur excellente conductivité thermique. Cependant, ces matériaux présentent certaines limitations liées notamment à leur masse élevée, leur coût et leur sensibilité à certains phénomènes de corrosion. Afin de surmonter ces contraintes, les matériaux composites apparaissent aujourd'hui comme une alternative prometteuse grâce à leur légèreté, leur résistance mécanique élevée, leur durabilité et leur possibilité d'adaptation à des besoins spécifiques.

Les matériaux composites sont constitués de l'association de deux ou plusieurs matériaux de nature différente permettant d'obtenir des propriétés supérieures à celles de leurs constituants pris séparément. Leur utilisation dans le domaine énergétique suscite un intérêt croissant, notamment dans les capteurs solaires thermiques où l'optimisation des transferts de chaleur et la réduction du poids des structures représentent des objectifs importants.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord les notions fondamentales relatives aux matériaux composites, leur définition, leur classification ainsi que leurs propriétés thermiques et mécaniques. Ensuite, nous nous intéressons aux plaques absorbantes utilisées dans les capteurs solaires thermiques, à leur rôle, leurs exigences fonctionnelles et aux critères de choix des matériaux qui les composent. Enfin, une comparaison entre les matériaux composites et les matériaux conventionnels sera réalisée afin d'évaluer leur potentiel pour l'amélioration des performances des capteurs solaires.

II.1. Définition et classification des matériaux composites :

II.1.1 Définition des matériaux composites :

Aujourd'hui, les composites représentent une classe cruciale de matériaux avancés, couramment employés dans divers domaines industriels grâce à leurs caractéristiques spécifiques. On définit un matériau composite comme la combinaison de deux ou plusieurs composants distincts, qui ne se mélangent pas à l'échelle macroscopique, et dont l'association permet d'obtenir des

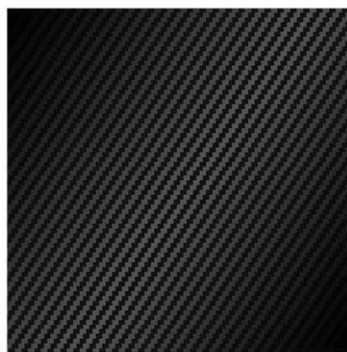
caractéristiques supérieures à celles des matériaux examinés individuellement. Cette association repose généralement sur une organisation structurée des éléments, assurant une interaction efficace entre les différentes étapes. [12]

En général, un matériau composite se compose d'une matrice et d'un renfort. La matrice, représentant la phase continue, est essentielle pour la cohésion globale, car elle garantit le transfert des contraintes mécaniques et défend l'armature contre des agressions externes comme l'humidité, les fluctuations de température ou les attaques chimiques. Le renfort, de son côté, correspond à la phase dispersée et donne au matériau ses principales propriétés mécaniques, notamment sa résistance et sa rigidité. On utilise fréquemment des renforts en fibres de verre, de carbone ou d'aramide. [12]

Les matériaux composites présentent l'avantage d'être « personnalisables » selon les besoins spécifiques de l'application prévue. Effectivement, en modifiant la composition, la proportion et l'orientation des composants, on peut optimiser les caractéristiques mécaniques, thermiques ou chimiques du produit final. Cette capacité d'adaptation à divers besoins explique leur déploiement grandissant dans des secteurs pointus tels que l'aéronautique, l'automobile ou les systèmes énergétiques, en particulier les capteurs solaires où les performances thermiques et la longévité sont des éléments cruciaux. [12]



Fibre de verre



Fibre de carbone



Fibre végétale

Figure II.1 : « Illustration des principaux types de fibres utilisées dans les matériaux composites ». [12]

La figure (II.1) illustre trois types fondamentaux de fibres qui constituent les matériaux composites, à savoir la fibre de verre, la fibre de carbone et la fibre végétale. En raison de son équilibre favorable entre coût, solidité et facilité d'application, la fibre de verre est couramment employée. La fibre de carbone se caractérise par une résistance exceptionnelle et un poids léger, ce qui la rend idéale pour les utilisations de haute performance comme dans le secteur

aéronautique ou automobile. De même, les fibres végétales constituent une option écologique, apportant des bénéfices en matière de durabilité et de préservation de l'environnement. L'association de ces fibres à une matrice (qu'il s'agisse de polymère, de métal ou de céramique) conduit à la création de matériaux composites aux caractéristiques supérieures, en particulier en ce qui concerne la rigidité, la durabilité et le poids. Par conséquent, la sélection de la fibre a un impact direct sur les performances finales du composite. [12]

II.1.2 Classification des matériaux composites :

L'organisation des matériaux composites se base sur divers paramètres, favorisant une meilleure compréhension de leur comportement et simplifiant leur sélection en fonction des applications prévues. Les critères fréquemment employés incluent le type de matrice, la forme du renfort et l'orientation de ce dernier.

Tout d'abord, la classification basée sur le type de matrice identifie principalement trois grandes catégories de composites. Les composites polymères, qui sont les plus courants, se distinguent par leur légèreté, leur simplicité de fabrication et leur prix plutôt abordable. On les utilise couramment dans les secteurs de l'automobile et de l'aéronautique. En ce qui concerne les composites à matrice métallique, ils offrent une résistance supérieure aux hautes températures et conviennent aux milieux rigoureux. Pour finir, bien qu'ils soient généralement plus fragiles, les composites à matrice céramique procurent une stabilité thermique remarquable et une résistance considérable à la corrosion. [13]

a) Selon la nature de la matrice

- **Composites à matrice polymère (PMC)** : légers, faciles à fabriquer, Ce sont les plus utilisés dans les applications solaires ainsi que dans l'industrie automobile et aéronautique. [13]

Les matériaux composites à matrice polymère représentent la catégorie la plus courante parmi les composites. Ils sont constitués d'une matrice organique (résines durcissables comme l'époxy ou le polyester, ou thermoplastiques) renforcée par des fibres telles que le carbone, le verre ou l'aramide. Leur atout majeur est leur densité réduite, qui leur confère une légèreté considérable tout en garantissant de solides performances mécaniques, en particulier en termes de résistance et de rigidité. En outre, l'utilisation de divers procédés de fabrication (comme le moulage, la stratification, l'infusion, etc.) rend ces composites relativement simples à réaliser, contribuant ainsi à une diminution des coûts de production. Néanmoins, leur principal inconvénient reste leur résistance limitée aux températures élevées généralement au-delà de 100-300°C (selon le type). De 40 °C à 100 °C, c'est la

plage de fonctionnement des capteurs plans traditionnels et leur sensibilité au vieillissement environnemental (les UV, l'humidité, les variations thermiques) ainsi qu'une limitation importante est la faible conductivité thermique, qui peut cependant être améliorée par l'ajout de charges conductrices. [13]

- **Composites à matrice métallique (MMC)** : bonne résistance à haute température. [13]

Les composites à matrice métallique sont constitués d'une matrice métallique (aluminium, titane, magnésium, etc.) renforcée par des particules, fibres ou whiskers (carbure de silicium, alumine, etc.). Ces substances se caractérisent par d'excellentes propriétés mécaniques, incluant une forte résistance à la fatigue, une conductivité thermique supérieure et surtout une aptitude à maintenir leurs performances sous des températures hautes, à l'opposé des composites à matrice polymère. Ils affichent aussi une plus grande résistance à l'usure et à la déformation. Ces propriétés les rendent spécifiquement appropriés pour des applications rigoureuses, comme les pièces de moteurs, les constructions aéronautiques ou même le matériel dans le secteur spatial. Toutefois, leur production s'avère plus complexe et onéreuse. [13]

- **Composites à matrice céramique (CMC)** : excellente résistance thermique et chimique.

Les composites à matrice céramique sont composés d'une matrice céramique (comme le carbure de silicium ou l'alumine) renforcée par des fibres céramiques ou carbone. Ils se distinguent par une résistance remarquable aux températures extrêmes, qui peuvent dépasser plusieurs milliers de degrés Celsius, et une excellente résistance chimique et à la corrosion. À l'inverse des céramiques conventionnelles, généralement délicates, les CMC bénéficient d'une plus grande ténacité due à l'ajout de renforts, ce qui améliore leur résistance aux fissures. On utilise souvent ces matériaux dans des conditions extrêmes, tels que les turbines de moteurs d'aviation, les systèmes de freinage ou encore les structures spatiales. Cependant, leur utilisation à grande échelle est entravée par leur coût élevé et leur mise en œuvre complexe. [13]

- De plus, la catégorisation peut aussi être réalisée en fonction du type de renforcement. Les composites renforcés de fibres longues sont particulièrement valorisés pour leurs performances mécaniques supérieures, surtout lorsque les fibres sont disposées dans le sens des sollicitations principales. Par contre, les composites à fibres courtes ou

à particules présentent une isotropie plus élevée, même si leurs caractéristiques mécaniques sont habituellement moins performantes que celles des composites à fibres continues. [13]

On tolère qu'il soit « moins robuste » car un absorbeur solaire n'a pas besoin de supporter un poids important ; il doit simplement résister à la chaleur, et cela coûte beaucoup moins cher à produire de cette manière. [13]

b) Selon la nature du renfort :

- Renforts fibreux (fibres de verre, carbone, kevlar), Très utilisés car : Haute résistance mécanique et Possibilité d'orientation des fibres.
- Renforts à particules (Particules métalliques, Graphite, Nanoparticules), Améliorent : la Conductivité thermique et la Propriétés de transfert de chaleur. [13]
- Renforts en couches (stratifiés) Superposition de couches différentes, Exemple : (métal + polymère + revêtement absorbant), Très utilisés dans les capteurs solaires car : Optimisation thermique, Réduction des pertes.
- • Finalement, la direction des fibres est un facteur crucial dans le comportement mécanique des matériaux composites. Un matériau composite unidirectionnel a des caractéristiques idéales dans le sens des fibres, mais est plus fragile dans les orientations perpendiculaires. Les composites stratifiés ou multidirectionnels surmontent cette restriction en disposant les fibres dans diverses orientations, fournissant de ce fait un équilibre entre résistance et isotropie. [13]

c) Selon l'orientation des fibres

- Unidirectionnels (**UD**) : Toutes les fibres sont rangées dans la même direction.
Le point fort : C'est ultra-résistant dans le sens des fibres.
Le point faible : Si on appuie sur le côté, la plaque se fend comme une bûche.
- Bidirectionnels (**Tissés**) : Les fibres se croisent (comme un tissu ou un panier)
Le point fort : C'est solide en longueur ET en largeur. C'est le plus utilisé pour les plaques plates.
Le point faible : C'est un peu plus lourd et plus cher à fabriquer.
- Multidirectionnels (**Isotropes**) : Les fibres sont mélangées dans tous les sens (souvent des fibres courtes).
Le point fort : La solidité est la même partout, peu importe où on appuie.
Le point faible : C'est globalement moins solide que les deux autres.

II.2. Propriétés thermiques et mécaniques des composites :

II.2.1. Propriétés mécaniques :

Les caractéristiques mécaniques des matériaux composites jouent un rôle crucial dans leur application pour des usages structurels. Ces caractéristiques sont étroitement liées aux propriétés des composants, à leur proportion en volume et à leur disposition dans le matériau. À l'opposé des matériaux isotropes classiques, les composites montrent généralement un comportement anisotrope, signifiant que leurs caractéristiques diffèrent selon l'orientation des contraintes. [14]

L'un des attributs les plus cruciaux des composites est leur résistance à la traction, particulièrement dans le cas des matériaux qui ont été renforcés avec des fibres. Quand les fibres sont orientées en fonction de la charge, le matériau est capable de résister à des tensions extrêmement élevées, largement au-delà de celles que supportent les matériaux traditionnels. Cette performance est directement associée à la capacité des fibres à absorber principalement les efforts mécaniques. [14]

L'élasticité, qui correspond à la faculté du matériau à tenir face à la déformation, est aussi un facteur essentiel. Elle est essentiellement liée au module d'élasticité des composants et à leur proportion dans le matériau composite. La règle des mélanges offre une estimation simplifiée de certaines caractéristiques mécaniques basées sur les fractions volumiques du matériau de base et du renfort. Cependant, cette méthode demeure restreinte et nécessite l'ajout de modèles plus sophistiqués pour des analyses détaillées. [14]

De plus, les composites offrent une excellente résistance à la fatigue, ce qui les rend particulièrement appropriés pour les usages exposés à des charges cycliques. Toutefois, la présence de défauts internes ou une adhérence médiocre entre le renfort et la matrice peuvent influencer leur comportement, ce qui met en évidence l'importance du processus de fabrication. [14]

II.2.2. Propriétés thermiques :

Dans le domaine de l'énergie solaire, les propriétés thermiques des matériaux composites sont cruciales pour leur incorporation dans des systèmes exposés à des fluctuations de température. Ces caractéristiques englobent essentiellement la conductivité thermique, la capacité calorifique et le coefficient de dilatation thermique. [15]

La nature des composants et leur structure interne influencent considérablement la conductivité thermique des matériaux composites. Pour les composites à matrice polymère,

leur conductivité généralement basse leur attribue de solides propriétés d'isolation. Néanmoins, l'inclusion de renforts spécialisés, comme les fibres de carbone, peut optimiser cette conductivité et favoriser une dissipation thermique plus efficace. [15]

L'expansion thermique est aussi un facteur crucial, surtout lorsque le matériau est exposé à des cycles de température. Une incompatibilité entre la matrice et le renfort peut générer des contraintes internes, susceptibles d'entraîner des fissures ou une détérioration du matériau. [15]

Dans les applications associées aux capteurs solaires, le contrôle des flux thermiques est essentiel pour maximiser l'efficacité du système. Il faut donc prendre en considération la capacité du matériau à absorber, conduire et retenir la chaleur tout en réduisant au minimum les pertes d'énergie. [15]

II.3. Plaque absorbante :

2.3.1 Rôle et exigences thermiques :

La plaque absorbante est un élément fondamental dans les capteurs solaires thermiques. Elle est responsable de l'absorption du rayonnement solaire et de sa conversion en énergie thermique. [16]

Le fonctionnement de la plaque absorbante repose sur trois étapes principales :

- a) Absorption du rayonnement solaire
- b) Conversion en chaleur
- c) Transmission de la chaleur vers le fluide caloporteur

Pour assurer un bon rendement, la plaque absorbante doit posséder les caractéristiques suivantes [16] :

- Une forte absorptivité
- Une faible émissivité
- Une bonne conductivité thermique
- Une résistance à la corrosion

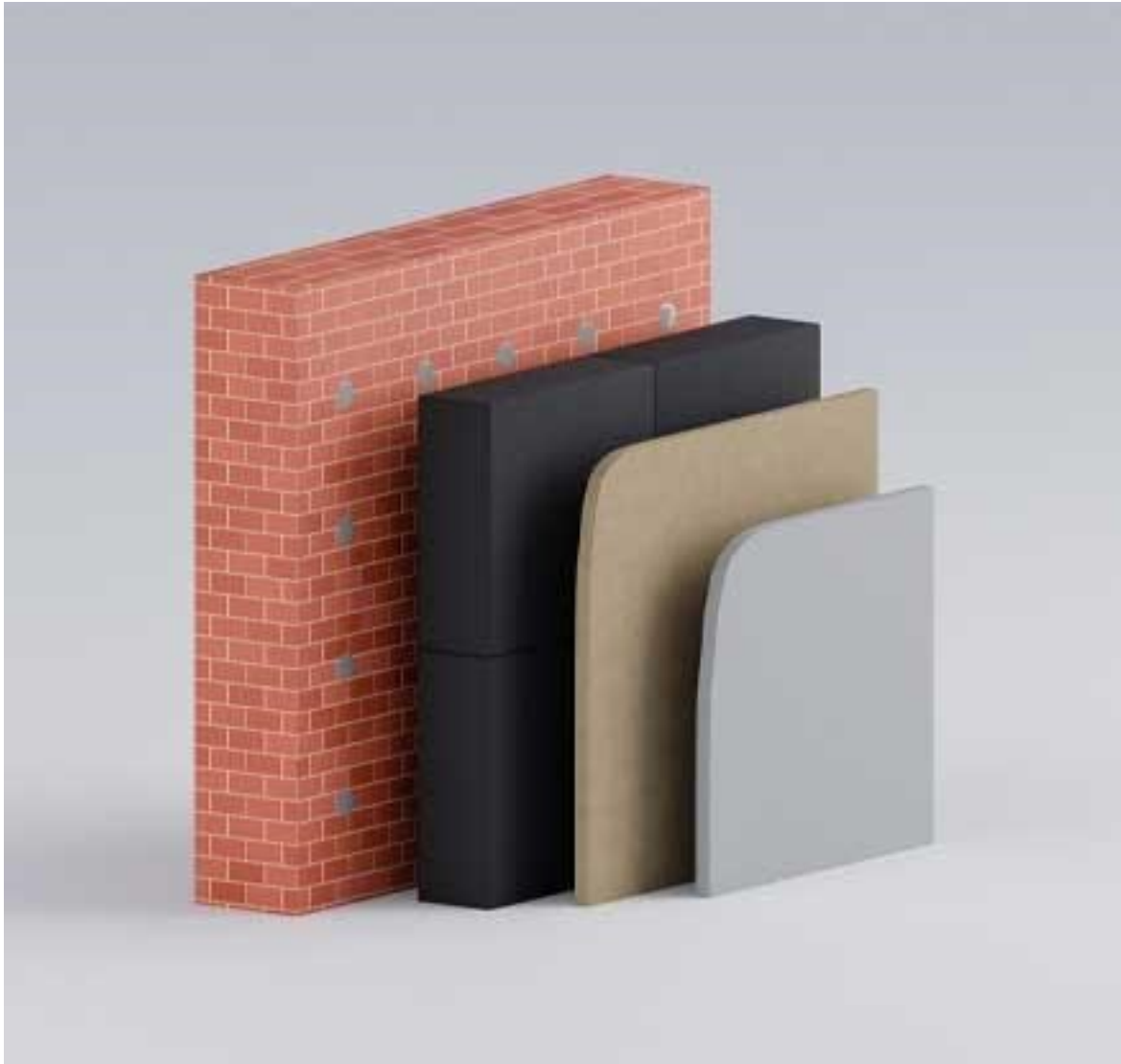


Figure II.2 : « Représentation schématique d'un système composite multicouche appliqué sur une structure ». [13]

La structure composée de plusieurs couches superposées, caractéristique des matériaux composites employés dans les domaines de la construction et de l'ingénierie, est présentée dans la figure (II.2). Il y a un support principal (mur) sur lequel sont superposées plusieurs couches, chacune ayant une fonction précise, y compris une couche d'adhésion, une couche de renforcement et une couche de finition. Dans un matériau composite, ces diverses couches collaborent pour optimiser les performances globales du système, en alliant solidité mécanique, isolation thermique et défense contre les agressions externes. L'intégration de renforts, généralement en fibres, contribue à renforcer la rigidité et la longévité du tout. Ce genre d'arrangement multicouche démontre idéalement le principe essentiel des composites,

qui repose sur la combinaison de divers matériaux aux caractéristiques complémentaires pour produire un produit final plus efficace que chacun des composants pris isolément [16].

II.3.2 Comparaison composite :

Les plaques absorbantes sont généralement fabriquées à partir de matériaux traditionnels comme l'aluminium et le cuivre. Toutefois, les composites constituent une option attrayante [17].

a) Avantages des composites :

- Faible poids
- Résistance à la corrosion
- Bonne durabilité

b) Inconvénients :

- Conductivité thermique plus faible
- Coût élevé

Le choix entre composite et métal dépend donc de l'application et des contraintes du système.



Figure II.3 : « Un capteur solaire thermique multicouche ». [14]

La figure (II.3) représente un capteur solaire thermique constitué de plusieurs couches fonctionnelles assurant la captation et le transfert de l'énergie solaire. La surface absorbante, généralement en cuivre avec un revêtement sélectif, capte le rayonnement solaire et le transforme en chaleur.

Cette chaleur est ensuite transmise à un fluide caloporteur circulant dans des tubes en cuivre, permettant ainsi le transport de l'énergie thermique.

L'ensemble du dispositif est protégé par un vitrage antireflet qui améliore l'absorption et réduit les pertes énergétiques.

De plus, une couche isolante, souvent en laine de roche, est intégrée afin de limiter les déperditions thermiques vers l'extérieur.

Des éléments tels que les profils en aluminium et les supports garantissent la solidité et la longévité du système. [17]

Cette structure se base sur la combinaison de matériaux traditionnels aux caractéristiques complémentaires (conductivité, isolation, résistance).

Par conséquent, cette architecture multicouche illustre l'amélioration des performances énergétiques par une association fonctionnelle des matériaux. [17]

II.4 Choix du matériau composite étudié :

Le choix d'un matériau composite repose sur plusieurs critères [18]:

✓ Critères techniques :

- Résistance mécanique : Elle illustre la capacité du matériau à résister à des charges sans se déformer ou se briser. Ce critère est fondamental pour assurer la sécurité et la pérennité des structures.
- Conductivité thermique : Elle exprime l'aptitude du matériau à conduire la chaleur. Elle est importante dans les applications où la gestion thermique est nécessaire.
- Stabilité thermique : Cela fait référence à la faculté du matériau à maintenir ses caractéristiques face à des températures hautes. Cela autorise son emploi dans des conditions rigoureuses.

✓ Critères économiques :

- Coût : Il inclut le prix des matières premières ainsi que les coûts de fabrication. Un coût élevé peut limiter l'utilisation du matériau à certaines applications spécifiques.
- Disponibilité : Elle concerne la facilité d'approvisionnement du matériau. Une bonne disponibilité assure la continuité de la production industrielle.

✓ Critères environnementaux :

- **Recyclabilité** : Elle désigne la capacité du matériau à être recyclé après utilisation. C'est un facteur important pour réduire les déchets.
- **Impact écologique** : Il prend en compte les effets du matériau sur l'environnement durant tout son cycle de vie. L'objectif est de minimiser la pollution et la consommation des ressources.

Les composites à base de fibres de carbone et de résine époxy sont souvent privilégiés pour leurs performances élevées.

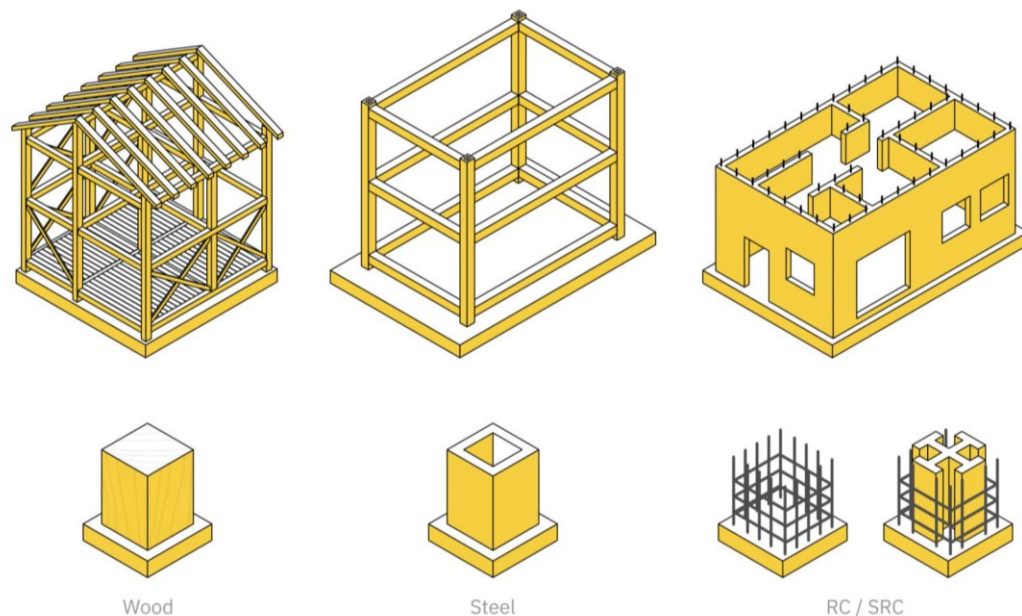


Figure II.4 : « Illustration des principaux matériaux conventionnels utilisés dans le domaine de la construction ». [15]

La figure (II.4) Il souligne les systèmes de construction traditionnels qui utilisent des matériaux dits conventionnels, comme le bois, l'acier et le béton armé. Ces matériaux sont couramment employés dans l'industrie de la construction grâce à leur accessibilité, leur coût contrôlé et leurs caractéristiques mécaniques bien établies. Depuis longtemps, le bois est apprécié pour sa légèreté et sa facilité d'utilisation, tandis que l'acier est reconnu pour son exceptionnelle résistance mécanique, surtout à la traction. En ce qui concerne le béton armé, c'est une avancée des matériaux traditionnels, qui allie le béton et l'acier pour optimiser les performances structurales. À l'inverse des composites avancés, on utilise généralement ces matériaux conventionnels de manière isolée ou en les combinant simplement.

Cette illustration met donc en perspective les matériaux composites par rapport aux alternatives traditionnelles, démontrant que leur objectif est de transcender les contraintes des matériaux traditionnels en matière de performance, de longévité et de légèreté. [18]

II.5 Avantages et limites des matériaux composites :

II.5.1 Avantages

- **Légèreté** : Grâce à leur faible densité, les matériaux composites contribuent à diminuer le poids des structures. Cela améliore en particulier l'efficacité énergétique. [19]
- **Haute résilience** : Ils possèdent d'excellentes caractéristiques mécaniques. Cela leur offre la capacité de faire face à des contraintes significatives.
- **Résistance à la corrosion** : Ils supportent efficacement les conditions agressives. Ceci diminue les exigences en matière de maintenance.
- **Durabilité élevée** : Ils présentent une excellente résistance à l'abrasion et à la fatigue. Ceci assure une utilisation étendue. [19]

II.5.2 Limites

- **Prix élevé** : La fabrication de matériaux composites peut s'avérer onéreuse. Ceci est attribué au coût des fibres et aux méthodes de production.
- **Complexité de production** : Leur fabrication requiert des méthodes particulières. Ceci complique davantage le processus de production.

Recyclage ardu : Leur composition rend le recyclage complexe. Cela soulève des questions écologiques. [19]

Conclusion :

La différence entre les matrices est primordiale : bien que les PMC soient performants dans les structures légères, leur faible conductivité thermique intrinsèque ralentit la transmission de chaleur vers le fluide caloporteur. En revanche, les composites à matrice métallique (MMC), qui associent la flexibilité de l'aluminium à la dureté du carbure de silicium, présentent un équilibre idéal entre absorption solaire et résistance aux cycles thermiques. Dans les applications les plus exigeantes, les Composites à Matrice Céramique (CMC) se révèlent être la seule option capable de préserver son intégrité structurale au-delà de 1000 °C. Au final, la sélection du duo matrice/renfort ne se résume pas uniquement à une question de prix, mais implique aussi une décision technique visant à réduire les pertes dues à l'inertie.

Chapitre III

Modélisation Thermique D'un Capteur Solaire Plan

Introduction

La conversion de l'énergie solaire en énergie thermique via les capteurs plans constitue l'une des technologies les plus répandues pour la production de chaleur à basse et moyenne température. Cependant, l'optimisation de leurs performances nécessite une compréhension approfondie des mécanismes de transfert de chaleur qui s'opèrent entre les différents composants du système.

Ce chapitre est dédié à la modélisation thermique du capteur solaire plan. L'objectif principal est d'établir un bilan énergétique rigoureux pour chaque élément (le vitrage, l'absorbeur et le fluide caloporteur) afin de prédire le comportement thermique du capteur sous diverses conditions de fonctionnement.

Cette étude théorique servira de base indispensable pour la simulation numérique et permettra d'évaluer l'influence des paramètres physiques et géométriques sur l'efficacité globale du dispositif.

III.1. Hypothèses :

Pour simplifier notre étude, un certain nombre d'hypothèses ont été considérées :

- 1- Le système fonctionne en régime permanent

Les températures de l'air, de l'absorbeur et de la plaque inférieure varient uniquement dans le sens du flux d'air

- 2- La température de l'air est supposée uniforme sur toute la section transversale
- 3- La conduction thermique est considérée comme négligeable
- 4- Le coefficient de transfert thermique par convection extérieure est constant sur toute la longueur du capteur solaire à air

III.2. Bilan thermique d'un capteur thermique plan

Q_{abs} représente l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de celle-ci est récupérée par le fluide caloporteur ; c'est l'énergie utile Q_u . Cette énergie peut être directement utilisée ou bien transférée vers un système de stockage (ballon d'eau chaude par exemple). [21]

Un capteur solaire est aussi sujet à des pertes thermiques représentant la partie de l'énergie absorbée qui est transférée vers le milieu ambiant, sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées Q_L . Enfin si on s'intéresse à une période de mise en température du système il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie notée Q_{st} thermique de l'installation. [21]

Ainsi le bilan thermique global s'écrit :

$$Q_{abs} = Q_U + Q_L + Q_{st} \quad (III.1)$$

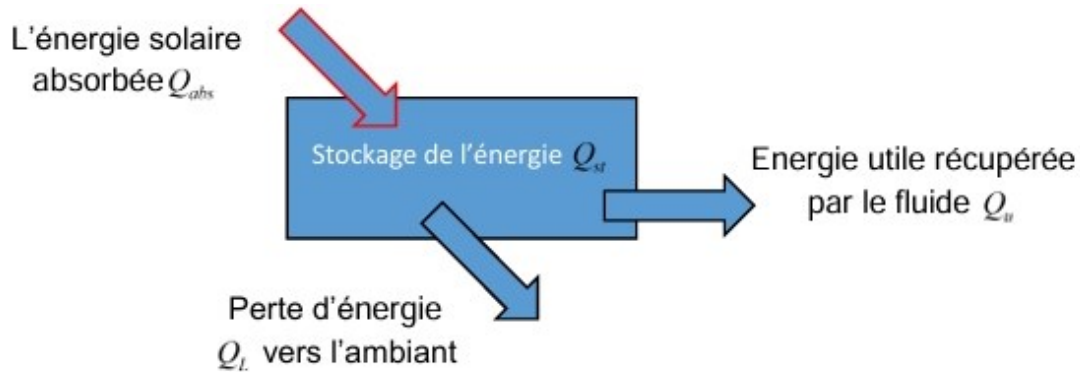


Fig. III.1: schéma de bilan thermique d'un capteur solaire plan. [1]

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs à air, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable $Q_{st}=0$ qui conduit à [22]:

$$Q_{abs} = Q_u + Q_L \quad (III.2)$$

III.3. Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement :

On définit le comportement d'un corps par trois coefficients [23]

➤ **La réflectivité (ρ) :**

$$\rho = \frac{\text{énergie réfléchi}}{\text{énergie incidente}}$$

➤ **L'absorptivité (α) :**

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbé}}{\text{énergie incidente}}$$

➤ **La transmissivité (τ) :**

$$\tau = \frac{\text{énergie transmis}}{\text{énergie incidente}}$$

On pourra remarquer que pour tous les corps : $\rho + \alpha + \tau = 1$

Cas particuliers :

$\rho=1$: miroir parfait

$\tau=1$: transparent parfait

$\alpha=1$: corps noir parfait

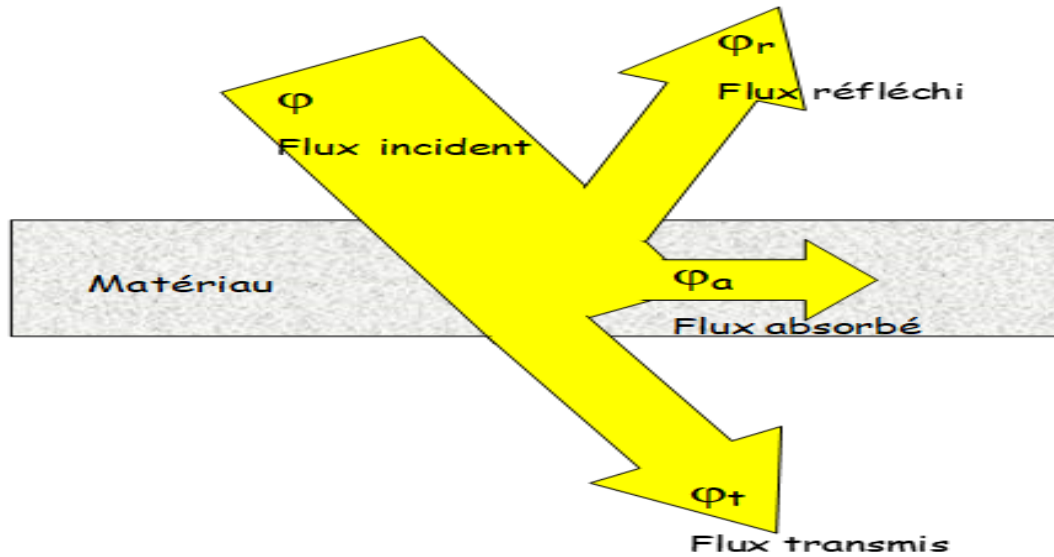


Figure III.2. Comportement du corps vis-à-vis du rayonnement [3]

III.4. Rendement du capteur :

L'efficacité thermique est le critère crucial de la performance thermique de ce capteur, il est déterminé par le quotient de la puissance utile et l'irradiation solaire globale reçue IG sur le capteur.

$$\eta = \frac{\Phi_{\text{u}}}{IG} \quad (\text{III.3})$$

Il peut être aussi donné en fonction du rapport de la différence de température (T_{fe} - T_a) flux global incident L'équation de Hottel-Whillier-Bliss [23]

$$\eta = F_R (\Gamma_v \alpha_p - U_L \frac{(T_{fe} - T_a)}{IG}) \quad (\text{III.4})$$

F_R : Facteur de forme ou d'enlèvement de chaleur (Heat Removal Factor).

T_{fe}: Température du fluide à l'entrée du capteur.

T_a : Température de l'air ambiant extérieur.

III.4. Le coefficient des pertes thermiques du capteur :

Dès que les rayons solaires atteignent le récepteur en dépassant la température ambiante, un processus de dissipation thermique s'installe à partir du récepteur. Les types de pertes incluent la convection, le rayonnement et la conduction, qui dépendent de l'écart de température entre le récepteur et son environnement ainsi que des formes du récepteur et du concentrateur. [23]

$$\phi_{\text{pert}} = \phi_{\text{cond}} + \phi_{\text{conv}} + \phi_{\text{ray}} \quad (\text{III.5})$$

✓ **Pertes Par Conduction**

Les pertes par conduction sont généralement mineures en comparaison avec celles dues à la convection et au rayonnement. Dans la majorité des études, on les associe généralement au terme de perte de convection. [23]

$$\phi_{cond} = \lambda_{abs} S_{ab} (T_{ab} - T_a) / \Delta x \quad (III.6)$$

✓ **Pertes par Convection :**

L'insuffisance de compréhension du phénomène de convection demeure un problème pour une plaque plane. Elle est tributaire de la vitesse du vent et de sa direction en relation avec l'emplacement. Selon la formule, ces pertes sont proportionnelles à la taille de l'absorbeur et à la différence entre la température de surface captant et la température ambiante. [23]

$$\phi_{ab} = hc(ab.f) / (T_{ab} - T_{fm}) + hc(iso.flui) * (T_{is} - T_{fm}) \quad (III.7)$$

hc(ab.f) : coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

hc(iso.flui) : coefficient d'échange par convection entre isolant et le fluide caloporteur.

T_{fm} : température de fluide moyenne.

Les coefficients d'échanges thermiques sont calculés à partir du diamètre hydraulique DH[m] :

$$DH = \frac{4 \text{ surfaces de la section d'écoulement}}{\text{périmètre mouillé}} \quad (III.8)$$

$$\text{➤ } hc(ab.f) = hc(iso.flui) = \frac{Nu \cdot \lambda}{DH}$$

Nu : Le nombre du Nusselt

λ : Conductivité thermique du fluide à T_{f m}

$$\text{➤ } \lambda = \frac{Pr \cdot \mu \cdot \rho}{C_p}$$

μ : viscosité dynamique du fluide

ρ : Masse volumique du fluide

C_p : capacité calorifique du fluide

$$\text{➤ } Re = \frac{V \cdot DH}{\mu \cdot \rho}$$

V : vitesse d'écoulement du fluide caloporteur

- Pour un écoulement turbulent entre deux plaques planes :

$$Nu = 0.0158 \cdot Re^{0.8} \quad \text{pour } Re > 2100 \text{ et } L/DH > 10$$

L : longueur totale de l'échange thermique

Pour un écoulement turbulent dans les conduites [23] :

$$\text{➤ } Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad \text{pour } 1.2 \cdot 10^5 > Re > 104 \text{ et } L/DH > 60$$

et $0.7 < Pr < 100$

$$\text{➤ } Nu = 0.023 \cdot (1 + DHL)^{0.7} \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} \quad \text{pour } L/DH < 60$$

Nu : peut s'exprimer en fonction de la distance entre l'absorbeur et l'isolant :

$$\text{➤ } Nu = 5.385 + 0.148 \cdot Re \cdot DH/L \quad Re < 2550$$

$$\text{➤ } Nu = 4.4 \cdot 10^{-4} \cdot Re^{1.2} + 9.37 \cdot Re^{0.471} \cdot DH/L \quad 2550 < Re < 10^4$$

$$\text{➤ } Nu = 0.03 \cdot Re^{0.74} + 0.788 \cdot Re^{0.71} \cdot DH/L \quad 104 < Re < 10^5$$

Pour les capteurs à absorbeur gaine, qui est le cas des capteurs à air, lorsque la surface d'échange thermique est étendue, le nombre de Nusselt moyen est donné par la relation [23]

$$Nu = 0.0196 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33}$$

$$\text{➤ } Nu = 0.0196 Re^{0.8} \cdot Pr^{0.33} / (1 + 1.22 Re^{-18} \cdot (Pr - 2))$$

On peut calculer le coefficient d'échange thermique moyen hc en connaissant Nu et Re [3] :

$$\text{➤ } hc = \frac{NU}{\lambda DH}$$

✓ **Pertes par rayonnement :**

La dissipation de chaleur par rayonnement est significative pour des récepteurs opérant à peine au-dessus de la température ambiante, et elle prend le pas lorsque les capteurs fonctionnent à des températures plus élevées. Le taux de déperdition de chaleur par rayonnement est proportionnel à la rémittence de la surface et à l'écart de température élevé à la puissance quatre. Nous avons l'équation formulée de la manière suivante [23]

$$\varphi_r = \varepsilon_{abs} \sigma S_{abs} (T_{ab}^4 - T_{ciel}^4)$$

Où :

ε_{abs} : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante Stefan-Boltzmann.

T_{ciel} : Température du ciel.

$$U_{av} = \frac{1}{\frac{N}{(C_{Tab})(T_{ab} - T_{aN} + f)0.33} + 1/hw} + \frac{1N + [\sigma(T_{ab}^2 - T_{a2})(T_{ab} + T_a)]}{\frac{1}{1\varepsilon_{abs} + 0.05N(1 - \varepsilon_{abs})} + \frac{2N + f - 1}{\varepsilon_v} - N} \quad (III.9)$$

Les températures **Tab** et **Ta** sont exprimées en kelvin.

N : est le nombre de vitrages.

i : Est l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale et les températures T_v et T_{ab} sont les températures absolues.

T_c : est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank (1963)

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_{a1}$$

ε_{abs} : est l'émissivité de l'absorbeur pour une inclinaison i de celui-ci.

ε_v : est l'émissivité de la vitre pour une inclinaison i de l'isolateur.

f : est le facteur correctif tenant compte de l'effet du vent, il s'exprime par :

$$f = (1 - 0.04 \cdot h_w + 0.00055 h_w^2) (1 + 0.091 \cdot N)$$

C : est le facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison de l'isolateur sur les coefficients de convection dans les conduits non utiles, il est exprimé par :

$$C = 365,9 (1 - 0.00883 i + 0.00012 i^2)$$

Les pertes de chaleur proviennent du contraste de température entre l'absorbeur et l'environnement ambiant. Elles se produisent conformément aux trois types de transfert thermique. On les classe en trois types [23] :

- ✓ Les pertes avant
- ✓ Les pertes arrières
- ✓ Les pertes latérales.

III.4.1- Estimation du coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur :

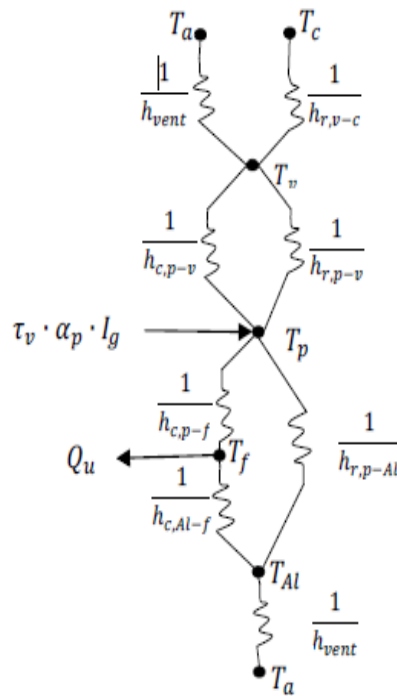


Figure. III.3. Circuit électrique équivalent à un capteur solaire plan. [22]

En se basant sur l'analogie électrique comme illustré par la Figure. (III-4), l'équation du coefficient de pertes thermiques par l'avant du capteur est formulée en termes des coefficients d'échange convectif et radiatif de la manière

Suivante [22] :

$R_{c,v-a} = \frac{1}{h_{cv-a}}$: Résistance thermique entre la vitre et l'ambiance due à l'échange convectif.

$R_{r,v-a} = \frac{1}{h_{rv-a}}$: Résistance thermique entre la vitre et l'ambiance due à l'échange radiatif.

Avec : $h_{rv-a} = h_{rv-c} \frac{(T_v - T_c)}{(T_v - T_a)} = \frac{1}{2} \epsilon_v (1 + \cos \beta) (T_v^4 - T_c^4) / (T_v - T_a)$

$R_{c,p-v} = \frac{1}{h_{cp-v}}$: Résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre due à l'échange convectif

$R_{r,p-v} = \frac{1}{h_{rp-v}}$: Résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre due à l'échange radiatif.

La résistance thermique équivalente par l'avant du capteur est [22] :

$$\frac{1}{Req_{v-a}} = \frac{1}{R_{c,v-a}} + \frac{1}{R_{r,v-a}} = h_{cv-a} + h_{rv-a} = U_{av1}$$

$$\frac{1}{Req_{p-v}} = \frac{1}{R_{c,p-v}} + \frac{1}{R_{r,p-v}} = h_{cp-v} + h_{rp-v} = U_{av2}$$

$$Req_{p-a} = Req_{v-a} + Req_{p-v} = \frac{1}{U_{av1}} + \frac{1}{U_{av2}}$$

Donc :

$$U_{av} = \frac{1}{Req_{p-a}} = \left[\frac{1}{U_{av1}} + \frac{1}{U_{av2}} \right]^{-1}$$

III.4.2. Coefficients des pertes thermiques du capteur :

Le coefficient des pertes thermique par l'arrière du capteur est estimé par la relation suivante [22]

$$U_{ar} = \frac{1}{\left[\frac{\epsilon_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{h_{c,v-a}} \right]} \quad (III.10)$$

- **Coefficient global des pertes thermiques :**

Ce coefficient englobe toutes les pertes à l'avant et l'arrière du capteur, ce qui lui confère la forme suivante :

$$U_L = U_{ar} + U_{av}$$

$$U_L = \frac{(U_{av} + U_{ar})(h_{c,p-f} + 2.h_{r,p-Al}) + 2.U_{av}.U_{ar}}{h_{c,p-f} + 2.h_{r,p-Al} + U_{av}}$$

III.4.3. Coefficients des pertes thermiques vers l'arrière du capteur :

Le coefficient des pertes vers arrière est donné par la formule [22] :

$$\frac{1}{U_{ar}} = \frac{1}{\frac{\epsilon_{is}}{\lambda_{is}} + \frac{1}{hw}}$$

Ou :

hw : est le coefficient d'échange convectif du au vent, entre la face inférieure de l'isolateur et l'air extérieur.

λis : est la conductivité thermique de l'isolant et **eis** est l'épaisseur de l'isolant

Les pertes thermiques vers l'arrière s'écrivent :

$$\phi_{Par} = U_{ar} \cdot (T_{ab} - T_a)$$

$$U = U_{av} + U_{ar} \quad (III.11)$$

III.5. Propriétés du matériau composite :

L'intégration de fibres de carbone et de cuivre au sein d'une matrice polymère permet de concevoir un matériau composite hybride aux performances multifonctionnelles exceptionnelles. Tandis que les fibres de carbone confèrent à la structure une légèreté et une résistance mécanique hors pair, l'ajout du cuivre vient pallier les limites thermiques et électriques des polymères classiques. Ce mélange synergique permet d'obtenir un matériau capable non seulement de supporter des contraintes structurelles importantes, mais aussi d'assurer une excellente dissipation de la chaleur et une protection efficace contre les interférences électromagnétiques. Il représente ainsi une solution technologique de choix pour les industries de pointe, telles que l'aéronautique ou les énergies renouvelables, où la gestion thermique et la réduction de masse sont des enjeux critiques. L'intérêt principal de ce mélange réside dans la création d'un matériau "multifonctionnel". En temps normal, un composite carbone/polymère est un excellent isolant ou un semi-conducteur. L'ajout du cuivre permet de : Améliorer la conductivité : Essentiel pour la dissipation thermique ou la protection contre les décharges électrostatiques et les interférences électromagnétiques (EMI). Optimiser la légèreté : On obtient un matériau capable de remplacer des pièces en cuivre massif ou en aluminium, tout en étant beaucoup plus léger et résistant à la corrosion. Maîtriser la dilatation : Le mariage carbone/cuivre permet d'ajuster le coefficient d'expansion thermique, un atout majeur dans l'aérospatiale.

III.6 Présentation de l'étude de référence pour la validation :

Cette recherche se concentre sur l'étude thermique d'un capteur solaire plan à air conçu pour transformer l'énergie solaire en chaleur. Le travail a été effectué dans le contexte d'une thèse de BELAID MOUFFOK Abd El Ilah et BENAOUA Ihab de Master en Génie Mécanique, spécialisation Énergétique.

Le but principal de cette recherche est d'examiner l'efficacité thermique du capteur solaire en analysant le transfert de chaleur, l'efficacité énergétique et les déperditions thermiques. Le principe de fonctionnement du capteur se base sur l'absorption du rayonnement solaire par une plaque absorbante qui, à son tour, transmet la chaleur à l'air en circulation à l'intérieur du capteur.

Dans ce travail de recherche, les auteurs ont opté pour l'aluminium en tant que matériau d'absorption, en raison de sa conductivité thermique favorable, de sa légèreté et de son coût inférieur

à celui du cuivre. L'aluminium garantit un transfert thermique efficace entre la surface qui absorbe et le fluide de transport de chaleur qui circule dans le capteur. Les performances du capteur sont principalement influencées par l'intensité de la lumière solaire, l'angle d'orientation du capteur, le flux d'air et les caractéristiques thermiques des matériaux employés, comme l'indiquent les résultats obtenus. Cette recherche constitue donc un point de référence crucial pour la validation théorique et expérimentale des capteurs solaires plans.

Conclusion

La recherche réalisée dans ce chapitre a conduit à une modélisation thermique précise du capteur solaire plan, basée sur des bilans d'énergie minutieux pour chaque élément.

Grâce à l'adoption d'hypothèses simplificatrices telles que le régime permanent, nous avons pu déterminer l'efficacité thermique et effectuer une analyse détaillée des coefficients de pertes par convection, rayonnement et conduction. On a accordé une attention spéciale à l'emploi d'un matériau composite polymère-céramique pour le dispositif d'absorption. Cette option technologique, soutenue par une conductivité thermique directionnelle améliorée et une grande capacité d'absorption solaire, propose une alternative efficace aux matériaux traditionnels tels que l'aluminium.

Ce modèle théorique, qui a été validé par une mise en parallèle avec des études de référence, représente la base indispensable pour les futures simulations numériques destinées à optimiser l'efficacité globale du système.

Chapitre IV

Résultats et discussions

Introduction :

Ce segment se dédie à la présentation et à l'examen des résultats obtenus dans le cadre de cette recherche. Suite au développement du modèle théorique dans les chapitres antérieurs, il est crucial d'évaluer l'efficacité du capteur solaire plan par l'analyse des données collectées.

Nous allons débiter notre étude avec le premier modèle : « capteur solaire plan doté d'une plaque absorbante en matériau composite ». Puis, nous réalisons l'analyse thermique d'un capteur solaire plan qui comprend une plaque absorbante hybride, constituée d'un substrat en matériau composite et d'un revêtement métallique à base de cuivre. Le but principal est d'examiner l'impact de cette configuration sur les performances thermiques du capteur, en se basant sur une modélisation théorique approfondie. Dans cette optique, nous examinerons les divers processus de transfert de chaleur, comprenant l'absorption du rayonnement solaire, la conduction à travers la plaque, sans oublier les déperditions thermiques vers l'entourage. En définitive, une évaluation de la performance du capteur sera effectuée et mise en contraste avec les configurations traditionnelles dans le but de souligner les avantages de la solution suggérée.

IV.1. Présentation du capteur :

Un capteur plan est composé d'une plaque absorbante en Aluminium et d'un couvercle en verre.

Les données suivantes sont [23] :

- Longueur du capteur : 2 m
- Largeur du capteur : 1 m
- Longueur de la plaque absorbante : 2 m
- Largeur de la plaque absorbante : 1 m
- Espacement plaque à Aluminium : 2,5 cm
- Absorptivité de la plaque pour le rayonnement solaire (α) : 0,94
- Émissivité de la plaque absorbante $\varepsilon = 0.20$
- Émissivité de la vitre (ε) : 0.88
- Coefficient d'extinction du verre (k) : 19
- Épaisseur du couvercle en verre : 4 mm
- Indice de réfraction du verre par rapport à l'air (n_2) : 1,526
- Localisation du capteur (34°52'41.99" Nord ; -1°18'54.00" Ouest)
- Date : 03 Mai
- Heure : 10h 49min et 17h

- $C_0 = 1367 \text{ W/m}^2$
- Résistance adhésive : Négligeable
- Vitesse de vent : $29 \text{ km/h} = 8 \text{ m/s}$
- Vitesse de fluide : 8 m/s
- Température d'ambiante : 22° C à 10h 49min et 20° C à 17h
- Température d'entrée : 26° C
- Températures de sortie : 60° C à 10h 49min et 55° C à 17h
- Épaisseur de l'isolant arrière : 5 cm
- Conductivité thermique de l'Isolons (Laine de verre) : $(\lambda) = 0.036$

IV.2. Méthode de résolution :

IV.2.1. Etude thermique d'un capteur solaire avec plaque absorbante en matière monolithique (en Aluminium) :

a- La résistance thermique équivalente

$$U = U_{av} + U_{ar} \quad (\text{IV.1})$$

avec : $U = 5.49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

$$R_{eq} = \frac{1}{U}$$

$$R_{eq} = \frac{1}{5.49}$$

$$R_{eq} = 0.182 \text{ m}^2/\text{W.K}$$

IV.2.2. Etude thermique d'un capteur solaire avec plaque absorbante en matière composite :

IV.2.2.1 Hypothèses spécifiques au composite :

On suppose un composite classique :

- Matrice polymère renforcée par des fibres céramiques
- Un film de cuivre est ajouté afin d'améliorer la conduction thermique.
- Matériau anisotrope
- Contact thermique parfait entre les couches

a. Conductivité thermique équivalente

Matrice : résine époxy (polymère)

Renfort : fibre de carbone

Avec :

$$\lambda_{\text{polymère}} = 0.2 \text{ W/m.k}$$

$\lambda_{\text{carbone}} = 200 \text{ w/m.k}$

Absorbeur :

- Plaque plan noire
- Epaisseur = 3 mm

Pour des résultat thermiquement meilleure on ajoute un film de cuivre .

C'est-à-dire une couche composite + film cuivre $\lambda_{\text{cuivre}} = 400 \text{ w/m.k}$

Le cuivre réfléchit beaucoup on le peint en noir pour améliorer capteur solaire . le cuivre assure la conduction rapide et la composite réduit le poids et les pertes .

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{e_{\text{totale}}}{\frac{e_{\text{compo}}}{\lambda_{\text{compo}}} + \frac{e_{\text{cuivre}}}{\lambda_{\text{cuivre}}}}$$

avec :

- $e_{\text{total}} = e_{\text{compo}} + e_{\text{cuivre}}$
- $e_{\text{total}} = 0.003 + 0.0001$
- $e_{\text{total}} = 0.0031 \text{ m}$

alors :

$$\lambda_{\text{eq}} = \frac{0.0031}{\frac{0.003}{200.2} + \frac{0.0001}{400}}$$

$$\lambda_{\text{eq}} = 203.5 \text{ w/m.k}$$

b- La résistance thermique équivalence :

✓ **Résistance thermique de la plaque en Composite**

$$\text{➤ } R_{\text{compo}} = \frac{e_{\text{totale}}}{\lambda_{\text{eq}} * A} = \frac{0.0031}{203.5 * 2} = 7.617 * 10^{-6} \text{ k/w}$$

✓ **Résistance de la face arrière :**

Pour la face arrière, le flux traverse successivement l'isolant par conduction, puis se dissipe dans l'air extérieur par convection.

$$\text{➤ } R_{\text{Conduction de l'isolant}} = \frac{e_{\text{isol}}}{\lambda_{\text{isol}} * A}$$

$$\text{➤ } R_{\text{Conduction de l'isolant}} = \frac{0.05}{0.036 * 2} = 0.6944 \text{ K/w}$$

$$\text{➤ } R_{\text{Convection arrière}} = \frac{1}{h * A}$$

$$\text{➤ } R_{\text{Convection arrière}} = \frac{1}{36.1 * 2} = 0.0138 \text{ K/W}$$

$$\text{➤ } R_{\text{arrière}} = R_{\text{compo}} + R_{\text{cond iso}} + R_{\text{conv arrière}}$$

$$\text{➤ } R_{\text{arrière}} = 7.617 * 10^{-6} + 0.6944 + 0.0138$$

$$\text{➤ } R_{\text{arrière}} = 0.70820 \text{ K/W}$$

✓ Résistance de la face avant :

Pour la face avant, la chaleur part de la plaque, traverse l'espace d'air un coefficient global d'échange interne $h_{int} = 6 \text{ w/ m}^2\text{k}$ traverse l'épaisseur de la vitre par conduction, puis passe dans l'air ambiant via le vent $h_w = 36.1 \text{ w/ m}^2\text{k}$.

✓ Espace d'air interne (Convection + Rayonnement) :

$$\text{➤ } R_{\text{plaque - vitre}} = \frac{1}{h_{int} * A}$$

$$\text{➤ } R_{\text{plaque - vitre}} = \frac{1}{6 * 2} = 0.0833 \text{ k/w}$$

✓ Conduction du verre

$$\text{➤ } R_{\text{Conduction du verre}} = \frac{e}{\lambda * A}$$

$$\text{➤ } R_{\text{Conduction du verre}} = \frac{0.004}{1 * 2} = 0.0020 \text{ k/w}$$

$$\text{➤ } R_{\text{avant}} = R_{\text{air int}} + R_{\text{verre}} + R_{\text{conv avant}}$$

$$\text{➤ } R_{\text{arrière}} = 0.08330 + 0.0020 + 0.0138 = 0.0991 \text{ k/w}$$

alors

$$R_{th \text{ eq}} = 0.991 + 0.7082 = 0.8073 \text{ k/w}$$

c- Le Coefficient Global de Pertes

Pertes Arrière U_{av}

$$U_{av} = \frac{1}{C / T_p * (T_p - T_a) 0.33] + 1/h_w} + \frac{\sigma(T_p^2 - T_a^2)(T_p + T_a)}{\frac{1}{\varepsilon_p + 0.05(1 - \varepsilon_p)} + \frac{2N + F - 1}{\varepsilon_v} - N}$$

Dans le mémoire de comparaison, nous retrouvons les résultats suivants :

$$F = 0.297$$

$$C = 308.49$$

$$N = 1$$

$$h_w = 5.7 + 3.8v = 5.7 + 3.8 * (8) = 36.1 \text{ w/m}^2 \text{ k}$$

$$U_{av} = \frac{1}{308.49 / 316 * (316 - 295) 0.33] + 1/36.1} + \frac{5.67 * 10^{-8} (316^2 - 295^2)(316 + 295)}{\frac{1}{0.20 + 0.05(1 - 0.20)} + \frac{2 * 1 + 0.297 - 1}{0.88} - 1}$$

$$U_{av} = 0.47 \text{ w/m}^2 \text{ k}$$

Perte arrière

$$U_{ar} = \frac{e_{isol}}{\lambda_{isol}} + \frac{1}{h_w}$$

$$U_{ar} = \frac{0.05}{0.036} + \frac{1}{36.1}$$

$$U_{ar} = 1.41 \text{ w/m}^2 \text{ k}$$

Donc

$$U = U_{ar} + U_{av} = 1.41 + 0.47$$

$$U = 1.88 \text{ w/m}^2 \text{ k}$$

d- Facteur de récupération F_R :

$$F_R = \frac{mcp}{A.U} \left[1 - \exp\left(-\frac{f'.A.U}{m cp}\right) \right]$$

$$F_R = \frac{0.192.1005}{2.1.88} \left[1 - \exp\left(-\frac{0.279.2.1.88}{0.192.1005}\right) \right]$$

$$F_R = 0.89$$

e- le rendement :

$$\eta = \frac{\varphi_u}{IG}$$

Dans le mémoire de comparaison, nous retrouvons les résultats suivants : $IG = 906.61$
w/m²

$$\varphi_{ab} = 785.8 \text{ w/m}^2$$

$$\varphi_u = Fr [\varphi_{ab} - U(T_e - T_a)]$$

$$\varphi_u = 0.89 [785.8 - 1.88 (26 - 22)]$$

$$\varphi_u = 689.3228 \text{ w/m}^2$$

$$\eta = \frac{689.3228}{906.61}$$

$$\eta = 0.76$$

IV.3. Résultats et discussions :

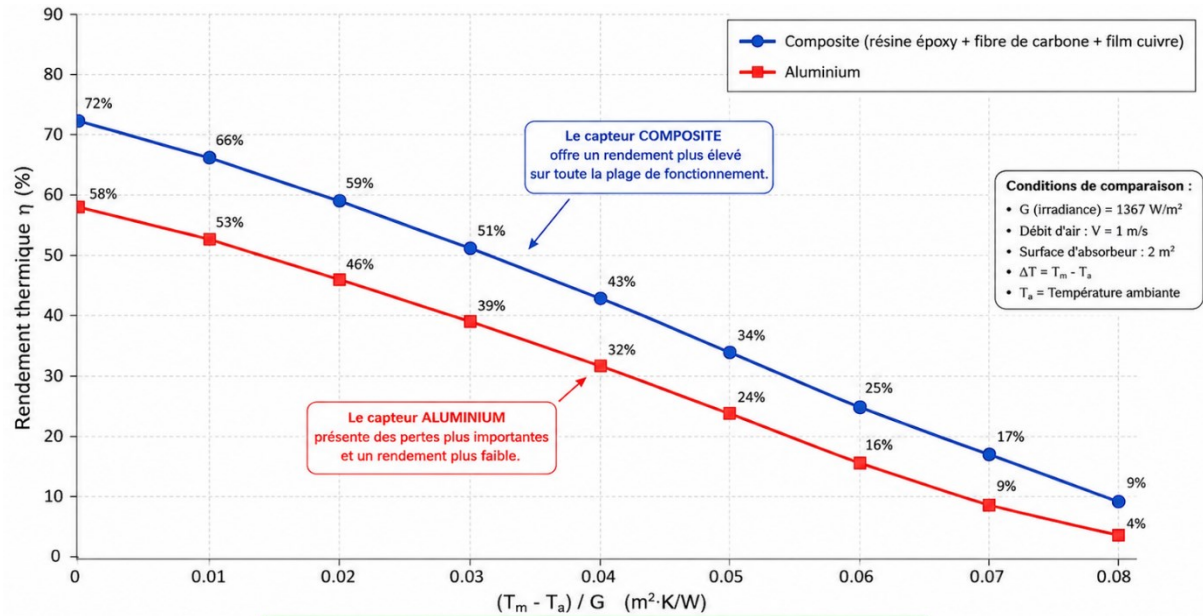


Figure IV.1. « Comparaison de rendement pour un capteur en composite et capteur en aluminium ».

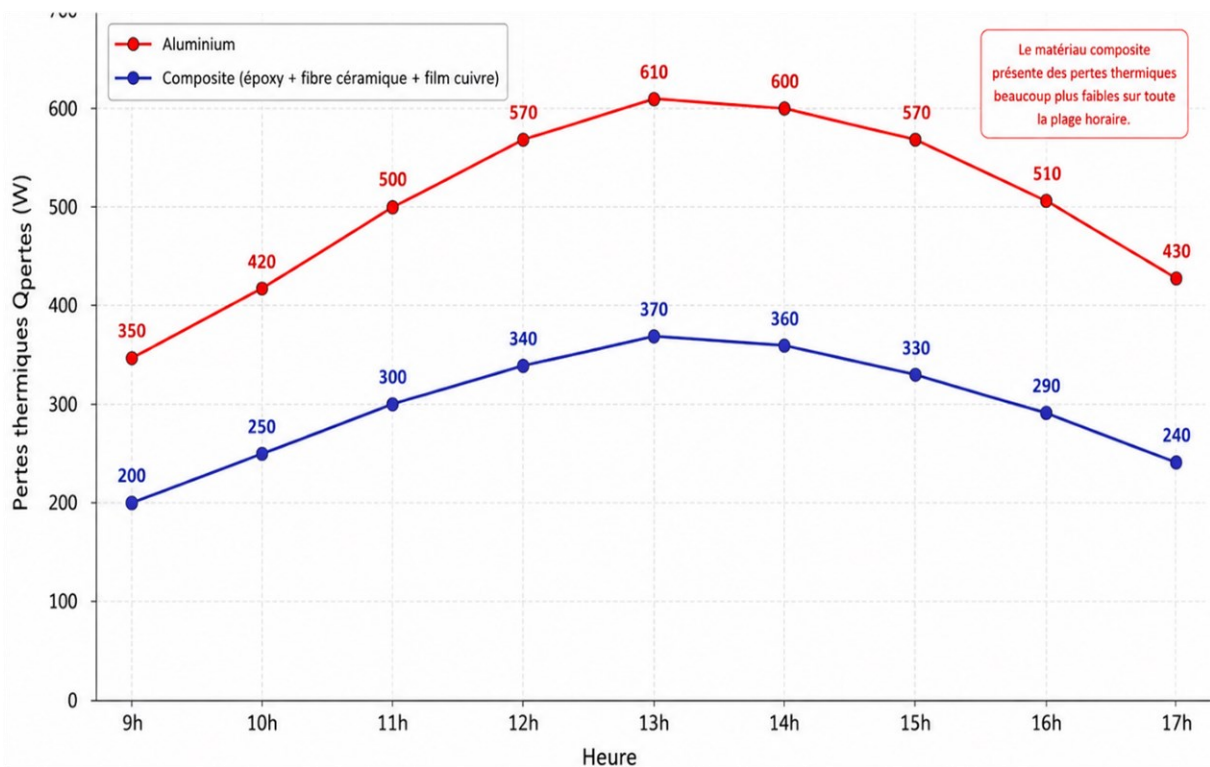


Figure IV.2. Evolution temporelle des pertes pour un capteur en composite et un capteur en aluminium.

Les résultats obtenus montrent clairement que l'utilisation d'un matériau composite dans le capteur solaire à air améliore considérablement les performances thermiques par rapport au capteur conventionnel en aluminium. Le capteur composite étudié est constitué d'une matrice en résine époxy renforcée par des fibres de carbone, avec l'ajout d'un film mince de cuivre au niveau de l'absorbeur afin d'augmenter la conductivité thermique et d'améliorer la diffusion de la chaleur. Les calculs ont montré que le rendement thermique (*Figure IV.1.*) du capteur composite atteint environ 45 % et 38 %. Ces valeurs restent supérieures à celles obtenues avec l'aluminium, ce qui confirme l'efficacité du matériau composite pour les applications solaires thermiques.

Cette amélioration du rendement s'explique par plusieurs facteurs thermiques et physiques. Tout d'abord, le film de cuivre possède une conductivité thermique très élevée, ce qui permet un transfert rapide de la chaleur absorbée vers l'air circulant à l'intérieur du capteur. Ensuite, la structure composite présente une meilleure résistance aux pertes thermiques grâce à la faible conductivité de la résine époxy, qui joue un rôle isolant. Ainsi, une plus grande partie de l'énergie solaire absorbée est transformée en énergie utile au lieu d'être dissipée vers l'environnement extérieur. De plus, la combinaison entre les fibres de céramique et la matrice polymère réduit l'inertie thermique du système, ce qui permet au capteur d'atteindre rapidement un état de fonctionnement stable.

La comparaison des courbes de rendement montre que le capteur composite conserve des performances plus élevées sur toute la plage de fonctionnement étudiée. Plus la différence de température entre l'absorbeur et l'ambiance augmente, plus les pertes deviennent importantes pour le capteur en aluminium, alors que le capteur composite maintient une meilleure stabilité thermique. Cela confirme que l'intégration des matériaux composites dans les capteurs solaires à air représente une solution prometteuse pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire le poids du système et limiter les pertes thermiques. Ces résultats démontrent également que les matériaux composites peuvent constituer une alternative performante et économique aux matériaux métalliques traditionnels dans les applications de conversion de l'énergie solaire.

Conclusion :

Cette recherche révèle que le recours à un matériau composite plutôt qu'à de l'aluminium dans le capteur solaire à air peut considérablement optimiser les performances thermiques de l'installation. Les analyses effectuées ont démontré que le capteur composite a une meilleure efficacité thermique en raison d'une gestion optimisée du transfert thermique et d'une diminution des déperditions thermiques vers l'environnement externe.

L'intégration d'une couche de cuivre sur l'absorbeur a contribué à améliorer la conductivité thermique globale du matériau composite, ce qui facilite une répartition rapide et uniforme de la chaleur vers l'air en circulation dans le capteur. Simultanément, la matrice polymère assure une fonction d'isolation qui réduit les pertes thermiques et optimise la rétention de l'énergie captée. Cette association conduit à un système plus performant et plus stable sur le plan thermique.

L'analyse comparative a aussi révélé que le capteur composite affiche une performance supérieure dans diverses conditions d'opération, contrairement au capteur en aluminium qui subit des pertes thermiques plus importantes à mesure que la température grimpe. En outre, l'analyse du flux a démontré que la convection thermique est renforcée dans le conduit d'air, ce qui participe à la hausse de la température du fluide à la sortie.

En plus des avantages thermiques, le matériau composite présente plusieurs avantages pratiques tels que la réduction du poids, la résistance à la corrosion et la possibilité d'améliorer la durée de vie du capteur solaire. Ces caractéristiques rendent les matériaux composites particulièrement adaptés aux applications de conversion de l'énergie solaire.

Cette recherche démontre finalement que l'emploi de composites dans les capteurs solaires aériens est une approche novatrice et performante pour optimiser l'efficacité énergétique et minimiser les déperditions thermiques, tout en présentant une option actuelle face aux matériaux métalliques classiques.

Conclusion générale

Ce mémoire a été consacré à l'étude thermique d'un capteur solaire plan à air équipé d'une plaque absorbante en matériau composite, dans le but d'évaluer l'influence de ce matériau sur les performances thermiques du capteur. Après avoir présenté les principes fondamentaux des capteurs solaires thermiques ainsi que les caractéristiques des matériaux composites, un modèle thermique a été développé afin d'analyser les différents mécanismes de transfert de chaleur et de déterminer les paramètres influençant le rendement du système.

L'étude comparative réalisée entre une plaque absorbante conventionnelle en aluminium et une plaque absorbante en matériau composite a montré que l'intégration d'un composite adapté peut constituer une solution prometteuse pour les applications solaires thermiques. Malgré une conductivité thermique généralement inférieure à celle des métaux, les matériaux composites présentent plusieurs avantages tels que la réduction du poids, une meilleure résistance à la corrosion et une bonne stabilité mécanique, tout en maintenant des performances thermiques satisfaisantes.

Les résultats obtenus ont également mis en évidence l'importance des propriétés thermo physiques du matériau absorbant sur les pertes thermiques, la puissance utile récupérée et le rendement global du capteur. L'optimisation de la conductivité thermique équivalente et de la résistance thermique du composite permet de limiter les déperditions énergétiques et d'améliorer l'efficacité du système solaire.

Ainsi, cette étude confirme que les matériaux composites représentent une alternative intéressante aux matériaux métalliques traditionnels pour la conception des plaques absorbantes des capteurs solaires plans. Leur utilisation contribue non seulement à l'amélioration des performances énergétiques mais également à la réduction du poids des installations et à l'augmentation de leur durée de vie.

Comme perspective, il serait intéressant d'approfondir cette recherche par des études expérimentales sur des prototypes réels, d'examiner différents types de composites renforcés par des fibres ou des particules à haute conductivité thermique, ainsi que d'évaluer leur comportement sous diverses conditions climatiques afin d'optimiser davantage les performances des capteurs solaires thermiques.

En conclusion, l'emploi des matériaux composites dans les capteurs solaires thermiques constitue une voie de développement prometteuse pour améliorer l'exploitation de l'énergie solaire et contribuer à la transition vers des systèmes énergétiques plus durables, plus performants et respectueux de l'environnement.

Références bibliographiques

- [1] Pr. Hicham LAKRAFLI , « cours énergie solaire thermique » , école Supérieure de Technologie de Khénifra, (2023).
- [2] BELOUI SARAH, « étude de performances d'un capteur solaire thermique plan », université BEJAIA, (2019-2020).
- [3] boumaraf-farid, cours/pdf « Chapitre 3: Energie Solaire », université batna 2
- [4] *Chapitre III (Partie 1b) : Capteurs Solaires Thermiques*, Université de Mila, Algérie.
- [5] BOUARAOUR KAMEL, « Cours de l'énergie solaire thermique », Université Ghardaia, 7 octobre 2020.
- [6] https://www.xpair.com/lexique/definition/eau_chaude_sanitaire.htm
- [7] <https://solar-energia.net/fr/energie-solaire-thermique/applications>
- [8] <https://www.swissolar.ch/fr/connaissances/technologies-solaires/solaire-thermique/application>
- [9] Dr. Oriol Planas , cours « Capteurs solaires plats » 30 mai 2018
- [10] <http://bibdSPACE.univ-tiaret.dz/bitstream/123456789/11834/4/CHAPITREII%28R%C3%A9par%C3%A9%29.pdf>
- [11] <https://dualsun.com/guides/production-rendement/calcul-performances-thermiques-capteurs-pvt/>
- [12]: Jones, R.M. *Mechanics of Composite Materials*, (1999).
- [13] Hull, D. *An Introduction to Composite Materials*, (1996).
- [14]: P. K. Mallick, *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd ed. Boca Raton FL, USA: CRC Press, 2007
- [15] Incropera, F.P. *Fundamentals of Heat Transfer*, (2011).
- [16] : Kalogirou, S. "Solar Thermal Systems", (2004).
- [17] Duffie, J.A. (2013).
- [18] Gibson, R.F. "Principles of Composite Material Mechanics". CRC Press, (2016).
- [19] Daniel, I.M., & Ishai, O. "Engineering Mechanics of Composite Materials". Oxford University Press. (2006).
- [20] Kaw, A.K. "Mechanics of Composite Materials". CRC Press. (2005).
- [21] DEMAGH, Yassine. Cours /PDF "*Chapitre III – 2ème Partie : Modélisation d'un capteur solaire plan*". Université Mustapha Ben Boulaid Batna 2.
- [22] Monsieur zedayria MEd , chapitre II, thèse de doctorat, Université de Biskra, 2010

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

[23]Belaid mouffak et benaouda ihab, « bilan énergétique d'un capteur solaire plan », Université Tlemcen, , (2020 2021).