

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

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

En : Génie mécanique

Spécialité : Energie renouvelable en Mécanique

Par: BENABADJI Ahmed

Kazi Tani Mohamed Sghir

Sujet

Étude de l'Influence des Matériaux Absorbants sur les Performances Énergétiques des Capteurs Solaires Plans

Soutenu publiquement, le 22/06/2022, devant le jury composé de :

Mme MOKHTARI Lila	MCA	Université de Tlemcen	Présidente
Mme SARI HASSOUN Hind	MAA	Université de Tlemcen	Examinatrice
M BENMANSOUR Abdelkrim	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme OURRAD Soumia	MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire : 2024/2025

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents qui m'ont constamment apporté leur soutien et m'ont offert une éducation ainsi qu'un amour inconditionnel pour me pousser à toujours donner le meilleur de moi-même.

À mon frère et mes sœurs qui ont toujours cru en moi et m'ont aidé à progresser jour après jour.

Je dédie ce travail à mes grands-parents et mes tantes qui m'ont toujours encouragée et soutenue tout au long de ces années d'études.

À mon oncle qui m'a particulièrement soutenu dans la réalisation de ce travail.

Je tiens finalement à remercier tous mes amis pour leurs aides et supports dans les moments difficiles.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ce qui, quels que soient les termes embrassés je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir qui n'a jamais dit non âmes exigence et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux mon adorable maman Nassima.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tous mon respect, Vous avez toujours été pour moi un exemple mon cher père Riad

A mon frère et ma sœur Vous avez toujours été à mes côtés avec vos mots, vos encouragements et vos précieux conseils.

A ma famille À toute ma famille qui m'a constamment soutenu et offert de l'affection.

Remerciements

Nous remercions Allah, le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la force et la volonté d'entreprendre et de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Monsieur BENMANSOUR Abdelkrim, notre encadrant, pour la qualité de son accompagnement, sa patience, sa rigueur et sa disponibilité tout au long de ce mémoire.

Nos sincères remerciements vont également à Madame OURRAD Soumia, notre co-encadrante, pour son encadrement attentif, ses conseils précieux et son soutien constant.

Nous remercions chaleureusement l'ensemble de nos enseignants pour leur dévouement et les connaissances qu'ils nous ont transmises tout au long de notre formation.

Nous adressons aussi nos remerciements les plus respectueux aux honorables membres du jury notre présidente Mme Mokhtari Lila et notre examinatrice Mme Sari Hassoun Hind, pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer notre travail, ainsi que pour l'attention bienveillante qu'ils lui accorderont.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tableau de nomenclature

Symbole / Terme	Signification	Unité
A	Surface du capteur exposée au rayonnement solaire	m ²
α (alpha)	Absorptivité de la surface absorbante	–
a ₁	Coefficient linéaire des pertes thermiques	W/m ² ·K
Cp	Capacité thermique spécifique du fluide caloporteur	J/kg·°C
d	Épaisseur du matériau	m / mm
ε (epsilon)	Émissivité de la surface	–
FR	Facteur de retraitement thermique	–
G / I	Irradiation solaire incidente	W/m ²
h	Rendement du capteur	%
hc	Coefficient de convection	W/m ² ·°C
K	Conductivité thermique du matériau	W/m·K
\dot{m} (m point)	Débit massique du fluide caloporteur	kg/s
η	Rendement du capteur (instantané ou global)	– ou %
η_0	Rendement optique à température nulle	–
ρ (rho)	Densité du matériau	kg/m ³
ρ_m	Masse volumique	g/cm ³
Q ₀ / Q _o	Pertes thermiques totales du capteur	W
Q _i	Énergie solaire incidente ou absorbée	J ou W
Q _u	Puissance thermique utile extraite	W
σ (sigma)	Constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8})	W/m ² ·K ⁴
S	Surface exposée au rayonnement solaire	m ²
T _a	Température ambiante extérieure	°C / K
T _c / T _m	Température moyenne du fluide ou de la surface absorbante	°C / K
T _i	Température d'entrée du fluide	°C / K
T _o	Température de sortie du fluide	°C / K

Tableau des abréviations

Abréviation	Signification
MDF	Panneau de fibres à densité moyenne (Medium Density Fiberboard).
W/m·K	Watt par mètre-kelvin (unité de conductivité thermique).
W/m²	Watt par mètre carré (unité de flux thermique ou irradiation).
°C	Degré Celsius (unité de température).
K	Kelvin (unité de température absolue).
FR	Facteur de retraitement thermique.
UL	Coefficient global de perte thermique.
Q_i	Énergie solaire incidente.
Q_u	Énergie utile extraite du capteur.
Q_o	Pertes thermiques du capteur.
A	Surface du capteur exposée au rayonnement solaire.
I	Irradiation solaire (densité de puissance solaire).
m	Débit massique du fluide caloporteur.
C_p	Capacité thermique spécifique du fluide.

Sommaire

Dédicaces	
Remerciements	
Tableau de nomenclature	
Tableau des abréviations	
Sommaire	
Liste des Figures	
Liste des Tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités	4
I.1 Introduction :	5
I.2 Transfert de chaleurs :	5
I.2.1 Conduction :	5
I.2.2 Convection thermique :	6
I.2.3 Rayonnement :	6
I.3 Panneaux solaire thermique :	7
I.3.1 Définition :	7
I.4 Capteur solaire :	8
I.4.1 Types de capteurs solaires :	8
I.4.1.1 Capteurs à concentration :	9
I.4.1.2 Capteurs à tube sous-vide :	11
I.4.1.3 Capteurs non vitrés :	12
I.4.1.4 Capteurs solaire plans (vitré) :	12
I.4.2 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré	13
I.4.2.1 Une couverture transparente :	13
I.4.2.2 Absorbeur :	14
I.4.2.3 Isolant :	16
I.4.2.4 Fluide caloporteur :	18
I.4.2.5 Coffre (L'enceinte) :	19
I.5 L'orientation et l'inclinaison d'un capteur:.....	20
I.6 Conclusion :	21
Chapitre II : Analyse Théorique	22
II.1 Introduction :	23

II.2	Énergie Solaire Reçue / Incidente	23
II.2.1	Énergie solaire incidente sur le capteur.	23
II.2.2	Énergie solaire reçue.....	24
II.3	Énergie Absorbée et Pertes Thermiques	24
II.3.1	Énergie réellement absorbée par le capteur.	24
II.3.2	Pertes thermiques	25
II.3.2.1	Pertes thermiques du capteur vers l'environnement.....	25
II.3.2.2	Types Pertes thermiques :.....	26
II.3.3	Énergie utile extraite du capteur.	27
II.4	Transfert au fluide caloporteur	28
II.4.1	Énergie transmise au fluide caloporteur.	28
II.5	Paramètre de performance	28
II.5.1	Facteur de retraitement thermique, indique l'efficacité du transfert d'énergie.....	28
II.5.2	Équation de Hottel-Whillier-Bliss : énergie nette extraite, corrigée par FR.....	29
II.6	Rendement du capteur	30
II.6.1	Rendement instantané basé sur l'énergie utile extraite.....	30
II.6.2	Forme linéarisée du rendement selon les pertes thermiques.....	30
II.6.3	Rendement basé sur le rendement optique idéal et les pertes thermiques linéaires.	
	31	
II.7	Conclusion :.....	32
Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants 33		
III.1	Introduction :	34
III.2	Conception et réalisation de l'expérience :.....	34
III.3	Choix des matériaux absorbants.....	35
III.3.1	Critères de sélection des matériaux :.....	35
III.3.2	Description des absorbeurs testés :.....	36
III.4	Caractéristiques des matériaux analysés :	39
III.5	Méthodologie expérimentale:	42
III.5.1	Configuration du dispositif expérimental :.....	42
III.5.1.1	Description du capteur solaire plan vitré :.....	42
III.5.1.2	Source d'éclairage artificiel.....	43
III.5.1.3	Capteur thermique numérique :	43

Sommaire

III.5.2	Conditions expérimentales :	44
III.5.3	Procédure expérimentale :	45
III.5.3.1	Préparation du dispositif :	45
III.5.3.2	Exposition à la lumière :	45
III.5.3.3	Mesure de la température :	46
III.5.3.4	Enregistrement et analyse des données :	46
III.6	Les pertes thermiques des absorbeurs :	46
III.7	Conclusion :	48
Chapitre IV	: Résultats Et Interprétations	49
IV.1	Introduction :	50
IV.2	Analyse Individuelle des Absorbeurs.....	50
IV.2.1	Etude de l'absorbeur acier inoxydable de 0,7 mm :	50
IV.2.2	Etude de l'absorbeur acier galvaniser de 0,55 mm	51
IV.2.3	Etude de l'absorbeur bronze de 0,48 mm :	51
IV.2.4	Etude de l'absorbeur de l'aluminium de 0,76 mm :	52
IV.2.5	Etude de l'absorbeur aluminium de 0,2 mm :	52
IV.3	Comparaison des Performances par Phase Thermique :	53
IV.3.1	Phase de lancement (0 à ~2 minutes) :	53
IV.3.2	Phase transitoire (de ~2 à ~40 minutes) :	54
IV.3.3	Phase de stagnation (après ~50 minutes) :	55
IV.4	Comparaisons Directes entre Matériaux.....	57
IV.4.1	Comparaison entre Galvanisé (0.55 mm) vs Bronze (0.48 mm) :	57
IV.4.2	Comparaison entre Inox (0.7 mm) vs aluminium1 (0.76 mm) :	58
IV.4.3	Comparaison entre Bronze (0.48 mm) vs aluminium2 (0.2 mm)	59
IV.4.4	Comparaison entre aluminium (0.76 mm) vs aluminium2 (0.2 mm).....	60
IV.5	Interprétation global	62
IV.6	Conclusion :	62
Conclusion générale	64
Références Bibliographiques	66
Annexe	70

Liste des Figures

Figure I.1 : Lois de Planck [5].....	7
Figure I.2 : Différents éléments d'un capteur à concentration [7]	9
Figure I.3 : Différents types des concentrateurs solaires [8].....	10
Figure I.4 : Capteur solaire à tube sous vide [10]	11
Figure I.5 : Schéma d'un collecteur à tubes sous vide [7].....	11
Figure I.6 : Capteur solaire non-vitré [7]	12
Figure I.7: capteur solaire plan a air[13]	13
Figure I.8 : capteur solaire plan a eau [13].....	13
Figure I.9 : absorbeur film d'eau[14]	15
Figure I.10 : Absorbeur tube S [14]	15
Figure I.11 : Absorbeur montage Tickelma [14].....	15
Figure I.12 : Schéma des différents pertes [16]	17
Figure I.13 : Schéma montrant l'inclinaison et l'orientation du capteur [20].....	20
Figure II.1 : un schéma qui représente les pertes thermiques dans un capteur [25].....	26
Figure III.1 : Plaque d'aluminium [28]	37
Figure III.2 : Plaque métallique de bronze [29]	38
Figure III.3 : Plaque métallique d'inox [30]	38
Figure III.4 : Plaque métallique en acier galvanisé [31]	39
Figure III.5 : Boite en mdf avec le vitrage	43
Figure III.6 : Projecteur d'éclairage	43
Figure III.7 : Capteur thermique numérique type k	44
Figure IV.1 : Evolution de la température en fonction du temps (INOX).....	50
Figure IV.2 : Evolution de la température en fonction du temps (acier galvanise).....	51
Figure IV.3 : Evolution de la température en fonction du temps (Bronze)	51
Figure IV.4 : Evolution de la température en fonction du temps (alu 1)	52
Figure IV.5 : Evolution de la température en fonction du temps (alu 2)	52
Figure IV.6 : Evolution de la température en fonction du temps pour les cinq absorbeurs testés.	53
Figure IV.7 : Phase de lancement de la température des absorbeurs	54
Figure IV.8 : Phase transitoire la montée en température et différenciation progressive des performances des absorbeurs.	55

Liste des Figures

Figure IV.9 : Phase de stagnation thermique des absorbeurs en fin d'exposition	56
Figure IV.10 : Comparaison entre l'acier galvanisé et bronze.....	58
Figure IV.11 : Comparaison entre l'inox et aluminium 1	59
Figure IV.12 : Comparaison entre bronze et aluminium 2.....	60
Figure IV.13 : comparaison entre aluminium 1 et aluminium 2	61

Liste des Tableaux

Tableau I.1 : types de collecteurs et le taux de concentration [1]	10
Tableau I.2 : Comparaison des matériaux de couverture [14]	14
Tableau I.3 : α et ϵ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [14].....	16
Tableau I.4 : Propriétés des isolants utilisés dans un capteur solaire plan.....	17
Tableau I.5 : différents fluides caloporteurs pour une installation solaire[17]	19
Tableau III.1 : Caractéristiques techniques comparées	40
Tableau III.2 : Impact de la peinture noir mat sur l'Aluminium.....	41
Tableau III.3 : Impact de la peinture noir mat sur le bronze	41
Tableau III.4 : Impact de la peinture noir sur l'Acier inoxydable.....	41
Tableau III.5 : impact de la peinture noir sur l'acier galvanise.....	42
Tableau IV.1 : Températures initiales et variation rapide durant la phase de lancement	54
Tableau IV.2 : Évolution thermique en phase transitoire.....	55
Tableau IV.3 : Températures de stagnation des absorbeurs	56

ملخص :

تهدف هذه الأطروحة إلى دراسة تأثير المواد الماصة على أداء المجمع الشمسي الحراري المسطح، في سياق الانتقال الطاقوي. تم اختبار أربعة مواد مطلية بالأسود غير اللامع: الألومنيوم، البرونز، الفولاذ المجلفن، والفولاذ المقاوم للصدأ، لاختلاف خصائصها الحرارية والميكانيكية. تم اعتماد نهج مزدوج: تحليل نظري وانتقال حراري، وتجارب مخبرية تحت إضاءة اصطناعية ثابتة. أظهرت النتائج أن الألومنيوم الرقيق يقدم أفضل أداء بفضل موصليته الحرارية العالية، حيث بلغ درجة حرارة الركود 55.2°C . يتميز البرونز بثبات حراري جيد، أما الفولاذ فكان أقل كفاءة حرارياً، لكنه يبقى مناسباً من حيث المتانة والتكلفة. تؤكد الدراسة على أهمية اختيار المادة الماصة حسب متطلبات كل تطبيق، وتقترح تحسين الأداء باستخدام طلاءات انتقائية أو مواد مركبة.

الكلمات المفتاحية: مجمعات الطاقة الشمسية الحرارية، والمواد الماصة، والتوصيل الحراري، وكفاءة الطاقة، وانتقال الطاقة.

Résumé :

Ce mémoire étudie l'effet de quatre matériaux absorbants (aluminium, bronze, acier galvanisé et acier inoxydable), tous peints en noir mat, sur la performance d'un capteur solaire thermique plan. L'objectif est d'évaluer leur capacité à convertir le rayonnement solaire en chaleur utile. Pour cela, une étude théorique et une expérience en laboratoire sous un éclairage constant ont été menées. Les résultats montrent que l'aluminium offre la meilleure performance grâce à sa forte conductivité thermique. Le bronze assure une bonne stabilité thermique. Les aciers sont moins performants thermiquement mais restent avantageux en termes de coût et de robustesse. L'étude souligne que le choix du matériau dépend de l'application visée et propose des pistes d'amélioration comme l'utilisation de revêtements sélectifs.

Mots-clés : Capteur solaire thermique, matériaux absorbants, conductivité thermique, efficacité énergétique, transition énergétique.

Abstract

This dissertation investigates how different absorber materials affect the energy performance of a flat-plate solar thermal collector, within the broader context of the energy transition. Four matte black-coated materials—aluminium, bronze, galvanized steel, and stainless steel—were studied for their distinct thermal and mechanical properties. Using both theoretical heat transfer analysis and controlled experiments under constant artificial irradiance, the study aimed to assess each material's thermal conversion efficiency. Results revealed that thin aluminium achieved the highest performance due to its superior thermal conductivity, reaching a stagnation temperature of 55.2 °C. Bronze showed good thermal stability, while steels performed poorly thermally but remain viable for low-cost or robust applications. The findings emphasize the need to select absorber materials based on application-specific needs and suggest improvements via selective coatings or composite materials

Key words: solar thermal collectors, absorbent materials, thermal conductivity, energy efficiency, energy transition.

Introduction générale

L'énergie solaire représente une des solutions les plus prometteuses pour répondre aux défis récents liés au réchauffement climatique, à l'épuisement des ressources fossiles et à la croissance de la population. L'énergie solaire est une ressource énergétique abondante et renouvelable, qui possède une disponibilité énergétique de haute qualité du fait de la haute température du soleil (proche de 5760 K). Par conséquent, l'énergie solaire peut être utilisée dans diverses applications qui requièrent des températures allant de basses à élevées. Les applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire comme unique source d'énergie ou en modes hybrides [1].

Les énergies renouvelables regroupent toutes les formes d'énergie provenant directement ou indirectement du soleil (énergie solaire, éolienne, hydraulique, biomasse), ainsi que celles issues du magma terrestre (géothermie) et de la gravitation (marémotrice). Bien que considérées inépuisables, elles restent limitées localement et temporairement, nécessitant une gestion durable, notamment pour la biomasse et la géothermie. Leur exploitation a peu d'effets négatifs sur l'environnement, mais peut générer des impacts locaux. Les énergies renouvelables présentent une variabilité dans leur capacité à fournir une puissance garantie : la géothermie est stable, tandis que le solaire et l'éolien sont intermittents. Le stockage d'énergie devient donc crucial pour leur valorisation. Leur compétitivité économique reste encore faible sans soutien public, comme la bonification du tarif d'achat pour l'électricité. Enfin, dans le domaine thermique, la biomasse reste largement utilisée principalement pour le chauffage individuel, avec des perspectives d'amélioration en termes de rendement énergétique et environnemental [2].

Les panneaux solaires thermiques en particulier représentent une technologie clé pour exploiter cette ressource naturelle et répondre à la demande croissante de chauffage, de production d'eau chaude et d'applications industrielles. Cette note explore l'importance des énergies renouvelables, en se concentrant sur les panneaux solaires thermiques et leur rôle dans la transition énergétique.

Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire se distingue par son omniprésence et sa disponibilité. Le soleil est une source d'énergie brute qui émet d'énormes quantités de rayonnement : $1,74 \times 10^{14}$ kW atteignent la haute atmosphère terrestre. Cette énergie, bien qu'intermittente et de faible densité, peut être captée et convertie en chaleur ou en électricité

grâce à des technologies adaptées telles que les panneaux solaires thermiques et photovoltaïques [3]. Les panneaux solaires thermiques sont conçus pour capter l'énergie solaire

et la convertir en chaleur, contrairement aux panneaux photovoltaïques qui produisent de l'électricité. Ils sont principalement utilisés pour le chauffage des bâtiments, la production d'eau chaude sanitaire et certaines applications industrielles comme le séchage ou le traitement thermique. Leur fonctionnement repose sur un principe simple mais efficace : un fluide caloporteur circule dans des tubes situés sous la surface d'un absorbeur, qui capte le rayonnement solaire et le convertit en chaleur. Cette chaleur est ensuite transférée vers des réservoirs de stockage ou utilisée directement pour répondre aux besoins énergétiques.

L'objectif principal de ce mémoire s'agit de comprendre comment les propriétés physiques et thermiques des matériaux utilisés comme absorbants affectent l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en énergie thermique. À travers une approche expérimentale, l'étude vise à comparer les performances de différents matériaux et à déterminer les choix optimaux pour améliorer le rendement des capteurs solaires plans. Pour faciliter la compréhension du lecteur de ce mémoire et de bénéficier des analyses, conclusions et résultats obtenus, on a organisé le travail en quatre chapitres à savoir :

- ✓ **Chapitre 1** : Ce chapitre présente les principes de fonctionnement des capteurs solaires plans, leurs principales composantes, ainsi que les différents types et applications existants. Il met en évidence l'importance de l'absorption solaire pour améliorer leur efficacité.
- ✓ **Chapitre 2** : Ce chapitre expose les bases théoriques nécessaires au calcul des performances d'un capteur solaire plan, notamment les formules du rendement thermique, du flux énergétique absorbé, et des pertes thermiques.
- ✓ **Chapitre 3** : Ce chapitre décrit le choix des matériaux, les propriétés thermiques et optiques analysées, la méthodologie expérimentale employée.
- ✓ **Chapitre 4** : Ce dernier chapitre détaille les essais réalisés sur les capteurs solaires plans équipés de différents matériaux absorbants, compare les résultats obtenus, et discute l'impact de chaque matériau sur la performance énergétique globale du capteur.

Chapitre I : Généralités

I.1 Introduction :

Ce chapitre présente les notions fondamentales de la conversion solaire thermique, les diverses sortes de capteurs disponibles, ainsi que leurs utilisations possibles. Le capteur solaire plan, considéré comme l'une des technologies les plus populaires et fréquemment exploitées pour des usages comme le chauffage de l'eau domestique, le réchauffement de fluides. Nous étudierons la structure, les éléments clés d'un capteur solaire plan, ainsi que les facteurs qui affectent ses performances. Il est crucial d'expliquer pour saisir pleinement l'importance de la recherche présentée dans ce mémoire, qui se concentre sur l'amélioration de l'efficacité énergétique de ce genre de capteur en sélectionnant les matériaux absorbants appropriés.

I.2 Transfert de chaleurs :

La chaleur est définie comme l'énergie transférée en vertu d'une différence de température. Elle circule des régions à température élevée vers des régions à température plus basse. Il est d'usage de désigner les différents types de mécanismes de transfert de chaleur par le terme de « modes ».

Les principaux modes de transfert de chaleur sont la conduction, le rayonnement et la convection [4] :

I.2.1 Conduction :

La conduction est le transfert de chaleur au sein d'un matériau ou entre deux matériaux en contact direct. Elle repose sur le principe de diffusion thermique, où l'énergie est transmise par vibration moléculaire ou mouvement des électrons libres [4].

Loi de Fourier :

- $\phi = k \cdot \frac{A}{d} \cdot (T_c - T_a)$ **I.1**
- ϕ est le flux de chaleur,
- k : Conductivité thermique [W/m·K]
- d : Épaisseur [m]
- T_c, T_a : Températures [K ou °C]

Étant de bons conducteurs et les isolants comme la laine de verre de mauvais conducteurs. L'équation de conduction en régime stationnaire permet de résoudre divers problèmes thermiques, notamment dans les solides.

I.2.2 Convection thermique :

La convection correspond au transfert de chaleur par le mouvement d'un fluide. Elle peut être :

- **Naturelle** (ou libre) : provoquée par des différences de densité dues aux variations de température (par exemple, l'air chaud qui monte).
- **Forcée** : générée par un dispositif mécanique (ventilateur, pompe, etc.) qui fait circuler le fluide.

Même si la convection implique le mouvement du fluide, le transfert d'énergie à l'échelle microscopique reste fondé sur la **conduction**, notamment à l'interface entre le fluide et la surface [4].

Loi de Newton du refroidissement :

$$\phi = hc \cdot A \cdot (T_c - T_a) \quad \text{I.2}$$

- hc : Coefficient de convection [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]
- T_c, T_a : Températures [K ou $^\circ\text{C}$]
- A : Surface du capteur [m^2]
 - Le transfert convectif est influencé par le nombre de Reynolds (Re)
 - Le nombre de Prandtl (Pr)
 - Le nombre de Nusselt (Nu) qui caractérisent l'écoulement et l'échange thermique.

I.2.3 Rayonnement :

Le rayonnement thermique désigne le processus par lequel un corps émet de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques en raison de sa température. Ce phénomène est indépendant de tout support matériel, ce qui signifie qu'il peut se propager dans le vide, contrairement à la conduction ou à la convection. Il joue un rôle essentiel dans les échanges thermiques, notamment à haute température, où il devient le mode de transfert prédominant. Plus un objet est chaud, plus l'intensité du rayonnement émis est grande, et plus le spectre de ce rayonnement se déplace vers des longueurs d'onde plus courtes, selon les lois de la physique telles que la loi de Planck et la loi de Stefan-Boltzmann.[4]

Loi de Stefan-Boltzmann :

$$\phi = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_c^4 - T_a^4) \quad \text{I.3}$$

- σ : est la constante de Stefan-Boltzmann égale à $5.66697 \cdot 10^{-8}$ [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$].

1. ϵ : l'émissivité du matériau
 - A : la surface
 - T_c, T_a : Températures [K ou °C]

Loi de Planck :

- Décrit la distribution spectrale du rayonnement d'un corps noir.

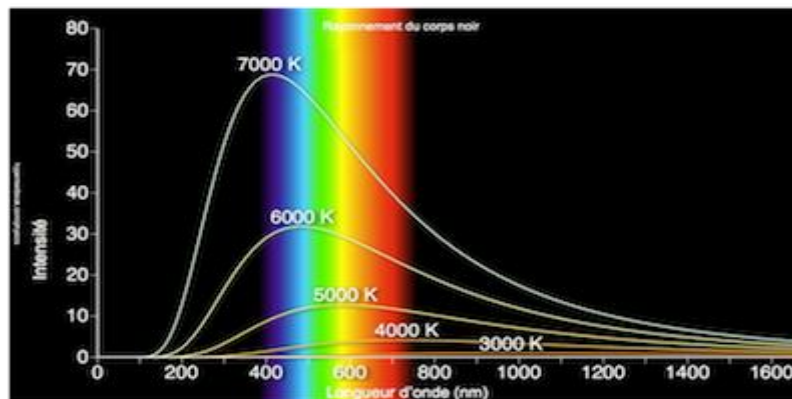


Figure I.1 : Lois de Planck [5]

Loi de Kirchhoff :

Pour un matériau en équilibre thermique l'émissivité et l'absorptivité sont égales. Les surfaces noires émettent le maximum de rayonnement, tandis que les surfaces réfléchissantes en émettent moins. Chaque mode peut agir seul ou en combinaison avec les autres, selon les conditions physiques et thermiques du système [4]

I.3 Panneaux solaire thermique :

I.3.1 Définition :

Les panneaux solaires thermiques sont des dispositifs qui permettent de capter l'énergie du soleil et de la transformer en chaleur, notamment pour chauffer l'eau ou l'air de nos habitations. Sur le plan énergétique et environnemental, les panneaux solaires thermiques constituent une alternative durable, propre et renouvelable aux systèmes de chauffage conventionnels fonctionnant aux énergies fossiles. En réduisant significativement les émissions de gaz à effet de serre et la dépendance aux ressources non renouvelables, ils contribuent à la transition énergétique et à la lutte contre le réchauffement climatique. Sur le plan économique, bien que l'investissement initial puisse être relativement élevé, ces systèmes présentent des

coûts d'exploitation faibles et permettent, à moyen et long terme, une réduction notable des dépenses énergétiques, notamment dans les régions bénéficiant d'un bon ensoleillement annuel.

En raison de leur simplicité de fonctionnement, de leur fiabilité, et de leur faible impact environnemental, les capteurs solaires thermiques s'intègrent de plus en plus dans les stratégies de développement durable et dans les politiques publiques de soutien aux énergies renouvelables. Ils font également l'objet de recherches constantes visant à améliorer leur rendement, leur durabilité, ainsi que leur intégration architecturale. [6]

I.4 Capteur solaire :

Les collecteurs d'énergie solaire sont des échangeurs de chaleur qui transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie interne du milieu de transport. Le principal composant de tout système solaire, c'est le capteur solaire. Il s'agit d'un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire entrant et le convertit en chaleur puis transfère cette chaleur à un fluide (généralement de l'air, de l'eau ou de l'huile), qui circule dans le collecteur. L'énergie solaire ainsi collectée est transportée par le fluide circulant, soit directement, soit vers l'eau chaude, vers un équipement de climatisation ou un réservoir de stockage d'énergie thermique dans lequel elle peut être puisée pour couvrir les besoins. Il existe essentiellement deux types de capteurs solaires : les capteurs non concentrés ou stationnaires et les capteurs concentrés.

Un capteur non concentrant a une surface équivalente pour intercepter et absorber le rayonnement solaire.

Tandis qu'un capteur solaire concentrant possède généralement des surfaces réfléchissantes concaves pour intercepter et concentrer le rayonnement solaire sur une surface de réception plus petite, ce qui permet d'augmenter le flux de rayonnement [3].

I.4.1 Types de capteurs solaires :

Tous les capteurs solaires thermiques ont pour objectif de transformer le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement optimal, en fournissant cette chaleur aux utilisateurs de manière efficace. On distingue plusieurs catégories de capteurs solaires thermiques : **les capteurs à concentration, les capteurs plans, les capteurs non-vitrés et les capteurs sous-vide**. Ces

Catégories varient considérablement en termes de qualité, de rendement, de conception et de coût [7].

I.4.1.1 Capteurs à concentration :

Les capteurs solaires à concentration reposent sur le principe de la concentration de la lumière du soleil. Grâce à des dispositifs optiques comme des miroirs paraboliques ou des lentilles, ces systèmes dirigent les rayons solaires vers un récepteur. La chaleur produite peut atteindre des températures très élevées.

Un capteur solaire thermique à concentration est composé [7]:

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

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

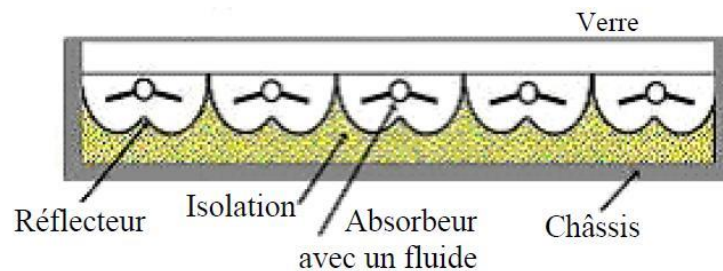


Figure I.2 : Différents éléments d'un capteur à concentration [7]

Les collecteurs concentrateurs se composent généralement d'un récepteur et d'un concentrateur qui aide à fournir de grandes quantités de l'irradiation solaire dans le récepteur. La concentration permet le fonctionnement à des niveaux de température élevés, ainsi que la réduction des pertes thermiques dues à la faible surface du récepteur.

Habituellement, des tubes sous vide sont utilisés comme récepteurs afin de minimiser les pertes thermiques à des températures de fonctionnement élevées.

Les technologies de concentration sont principalement utilisées pour des températures supérieures à 100 ou 150°C

Le niveau de température du collecteur à concentration dépend de son taux de concentration C [1].

$$C = \frac{\text{Ouverture totale du concentrateur}}{\text{Surface du récepteur}}$$

I.4

Type de collecteur à concentration	Taux de concentration	Température de fonctionnement	Caractéristiques	Exemples
Collecteurs concentrateurs imageants	> 10	200 – 500 °C	Focalisation directe de l'image solaire sur un point ou une ligne	Réflecteurs paraboliques (PTC), miroirs héliostats, réflecteurs paraboliques linéaires
Collecteurs concentrateurs non imageants	< 5	Jusqu'à 200 °C	Concentration diffuse sans focaliser l'image du soleil	Collecteurs paraboliques composés (CPC), tubes sous vide

Tableau I.1 : types de collecteurs et le taux de concentration [1]

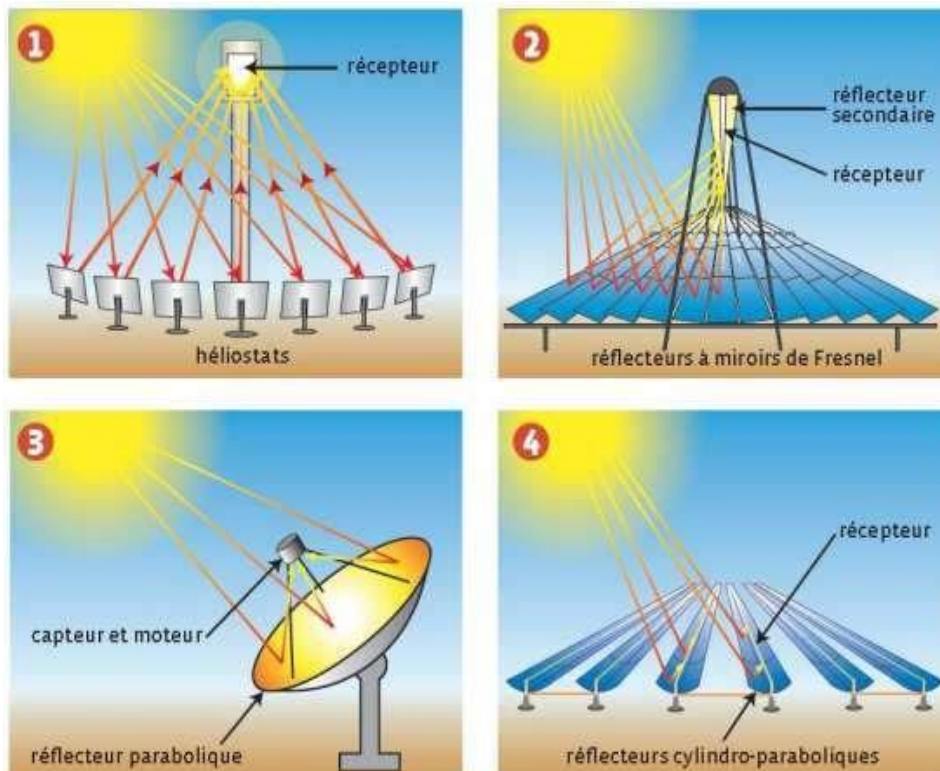


Figure I.3 : Différents types des concentrateurs solaires [8]

I.4.1.2 Capteurs à tube sous-vide :

Les capteurs solaires à tubes sous vide fonctionnent différemment des autres capteurs disponibles sur le marché offrent une protection naturelle contre le gel et la surchauffe grâce à leur régulation automatique de température. Les capteurs solaires à tubes sous vide sont une technologie avancée exploitant l'isolation sous vide pour maximiser leur efficacité, en particulier à des températures élevées. Contrairement aux capteurs plans, ces dispositifs conservent mieux la chaleur grâce au vide qui agit comme un excellent isolant. Même par temps froid, ils restent performants, car l'intérieur du tube peut atteindre des températures très élevées (jusqu'à 1508 °C), tandis que l'extérieur reste froid.[9]



Figure I.4 : Capteur solaire à tube sous vide [10]

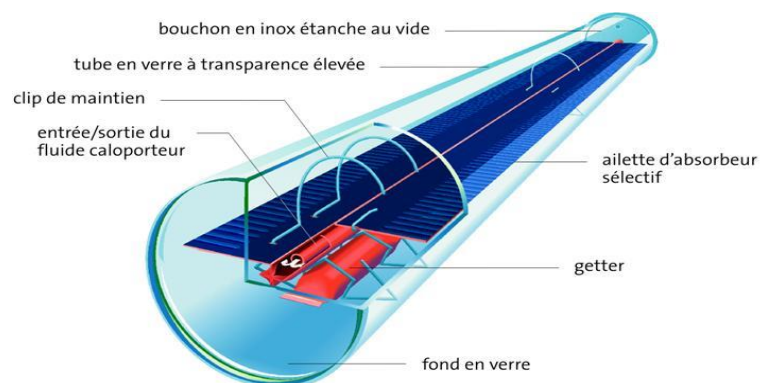


Figure I.5 : Schéma d'un collecteur à tubes sous vide [7]

I.4.1.3 Capteurs non vitrés :

Les capteurs solaires non vitrés se caractérisent par un absorbeur sans couverture de verre. Comme ces capteurs ne sont pas isolés, ils sont utilisés pour des applications à basse température, où la température demandée est inférieure à 30 °C. Les capteurs solaires non vitrés sont généralement fabriqués en plastique noir, stabilisé pour résister aux rayons ultraviolets. Comme ces capteurs n'ont pas de vitrage, une grande partie du rayonnement solaire est absorbée. D'autre part, ces capteurs ne sont pas isolés et une grande partie de la chaleur absorbée est perdue, en particulier dans des conditions extérieures venteuses et non chaudes. Par conséquent, l'efficacité de ces capteurs est inférieure à celle des capteurs plats.[11]



Figure I.6 : Capteur solaire non-vitré [7]

I.4.1.4 Capteurs solaire plans (vitré) :

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour capturer l'énergie solaire et la transférer à un fluide caloporteur, généralement de l'eau ou de l'air. Le fonctionnement de ce système repose sur le passage du rayonnement solaire à travers une couverture transparente jusqu'à une plaque absorbante noircie, qui possède une forte capacité d'absorption. Cette chaleur est ensuite transférée au fluide circulant dans des tubes fixés à la plaque. Pour minimiser les pertes thermiques, une isolation efficace est appliquée à l'arrière et sur les côtés du capteur, tandis qu'un couvercle transparent crée une couche d'air stagnant qui réduit les pertes par convection. L'effet de serre joue également un rôle crucial : le verre laisse passer les radiations solaires de courte longueur d'onde mais bloque les radiations infrarouges émises par la plaque absorbante.[12]

Le capteur solaire plat est composé :

- ❖ Une couverture transparente
- ❖ Un absorbeur,
- ❖ Tubes
- ❖ Une isolation thermique sur les côtés et à l'arrière de l'absorbeur
- ❖ Un cadre ou coffret

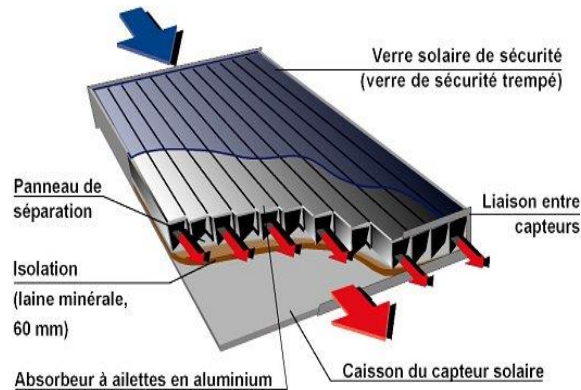


Figure I.7: capteur solaire plan a air[13]

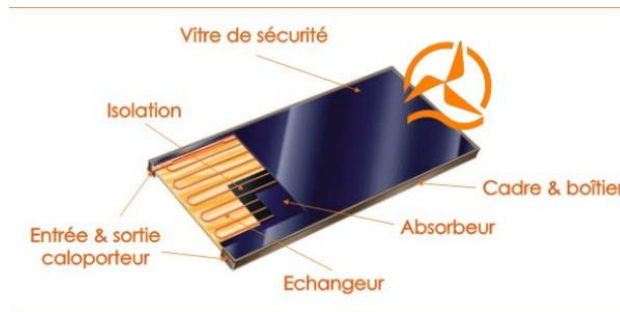


Figure I.8 : capteur solaire plan a eau [13]

I.4.2 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré

I.4.2.1 Une couverture transparente :

Elle a une fonction de protection mécanique mais elle permet surtout de réaliser l'effet de serre. Plusieurs matériaux sont utilisés mais le plus courant est le verre ordinaire pratiquement opaque dans l'infrarouge. [14]

Cette solution présente certains avantages [14] :

- Les pertes par convection avec l'air ambiant sont moindres
- Les pertes par infrarouge sont réduites de 25%, cependant il faut compter avec 5 à 10% de pertes dans le visible à chaque traversée de verre. D'autres matériaux sont aussi utilisés

Tableau I.2 : Comparaison des matériaux de couverture [14]

Caractéristiques	Lexan		Verre ordinaire moulé		Plaque acrylique moulé	Tedlar	Mylar	Teflon
	1	2	4	4				
Épaisseur(mm)	1	2	4	4				
Poids(kg/m ²)	1,2	2,4	10	10				
Résistance à l'impact	200	200	2	10				
Température maximale en utilisation continue(°C)	120	120	-	-				
Résistance au choc thermique	Très bonne	Très bonne	Très faible	Moyenne	Moyenne	bonne		
Indice de réfraction	1,59	1,59	1,52	1,52				
Transmission lumineuse à 600 mm(%)	90	89	88	88				
2.500 mm(%)	2	2	80	80	10			
Conductivité thermique (W/m.K)	0,21	0,21	1,16	1,16	0,2	0,12	0,25	0,19
Coefficient de dilatation thermique °C ⁻¹	60.10 ⁻⁶	60.10 ⁻⁶	9.10 ⁻⁶	9.10 ⁻⁶	80.10 ⁻⁶	46.10 ⁻⁶	70.10 ⁻⁶	105.10 ⁻⁶

I.4.2.2 Absorbteur :

En général, l'absorbteur se présente sous la forme d'une plaque métallique absorbe la plus grande partie possible du rayonnement à travers le vitrage tout en perdant le moins de chaleur possible vers l'atmosphère et vers le bas à travers l'arrière de la boîte. Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbteurs :

α : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1) ϵ : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

La conception du circuit emprunté par le fluide caloporteur revêt une grande importance, Il est essentiel d'assurer une irrigation optimale de l'absorbteur et d'optimiser le transfert thermique entre le fluide caloporteur et l'absorbteur afin d'éviter la formation de zones chaudes et d'améliorer le rendement, Les différents types [14]:

- **Film d'eau** : L'absorbteur se compose de deux feuilles métalliques et d'un système de chicane internes qui permet de retenir de fines lames de fluide caloporteur)

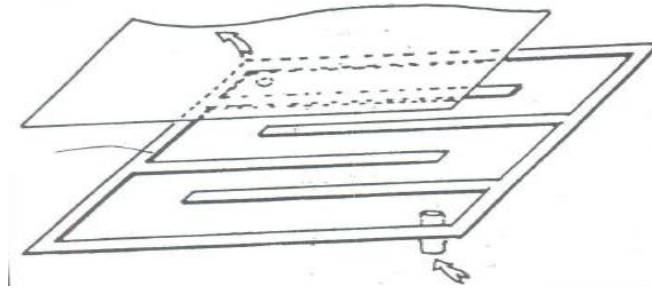


Figure I.9 : absorbeur film d'eau[14]

- **Tube en S** : L'absorbeur est constitué d'une plaque métallique avec un tube en forme de S dans lequel circule le fluide caloporteur. Ce type d'absorbeur présente l'inconvénient d'engendrer de fortes pertes de charge et d'offrir une distribution inégale de la température du fluide.[14]

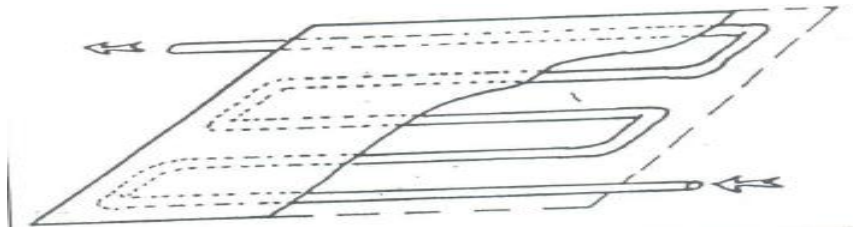


Figure I.10 : Absorbeur tube S [14]

- **Absorbeur avec tubes en parallèle montés en Tickelman** : C'est la technique la plus couramment utilisée. Elle consiste à souder sur une plaque de métal une série de tubes parallèles, espacés de 5 à 15 cm. Ces tubes sont connectés par deux collecteurs, en haut et en bas. L'entrée du fluide caloporteur se fait en bas, et la sortie, à l'opposé, en haut, garantissant ainsi un débit uniforme dans chaque tube.[14]

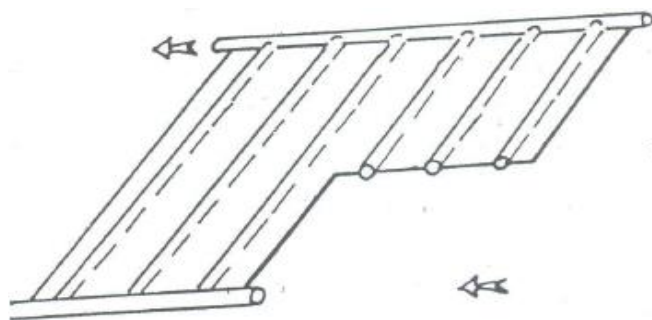


Figure I.11 : Absorbeur montage Tickelma [14]

On donne un tableau pour les valeurs de ε et α pour les matériaux absorbeur les plus utilisés dans les capteurs solaires plan :

Tableau I.3 : α et ε pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [14]

Support et traitement	Absorption α	Emission ε
Acier nickel noir sur nickel	0,95	0,07
Acier et chrome noir sur nickel	0,95	0,09
Acier et chrome noir	0,91	0,07
Cuivre et chrome noir	0,95	0,14
Acier galvanisé et chrome noir	0,95	0,16
Cuivre et cuivre noir	0,88	0,15
Acier et oxyde de fer	0,85	0,08
Aluminium et oxyde de manganèse	0,70	0,08
Acier et couche organique sur chrome noir	0,94	0,20
Peinture noir époxy	0,95	0,18
Peinture blanche époxy	0,25	0,91

I.4.2.3 Isolant :

L'isolation est indispensable dans les capteurs solaires thermiques, car elle permet de retenir et de concentrer l'énergie solaire. En réduisant les pertes de chaleur par les faces arrière et latérales, une couche isolante d'environ 5 à 10 cm optimise l'efficacité du capteur en maximisant la chaleur collectée, laquelle est ensuite transmise au fluide caloporteur. Pour assurer cette performance, l'isolant doit présenter une faible conductivité thermique. Pour un choix optimal d'un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés [15]:

- ❖ Masse volumique
- ❖ Température maximale d'utilisation
- ❖ Résistance aux feux, aux rongeurs et à la putréfaction
- ❖ Sensibilité à l'humidité
- ❖ Son coût

Matériau	Conductivité thermique	Densité	Résistance thermique	Stabilité thermique (°C)
Laine de verre	0,035 - 0,045	10 - 20	2,2 - 2,8	Jusqu'à 250
Laine de roche	0,035 - 0,040	50 - 150	2,5 - 2,8	Jusqu'à 750
Mousse polyuréthane	0,020 - 0,030	30 - 50	3,3 - 5,0	Jusqu'à 120
Polystyrène expansé	0,030 - 0,040	15 - 30	2,5 - 3,3	Jusqu'à 75
Laine de chanvre	0,038 - 0,042	25 - 40	2,4 - 2,6	Jusqu'à 150
Liège expansé	0,040 - 0,050	100 - 150	2,0 - 2,5	Jusqu'à 120

Tableau I.4 : Propriétés des isolants utilisés dans un capteur solaire plan

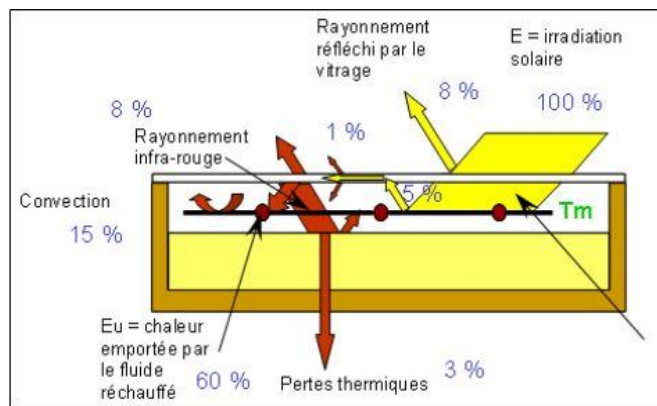


Figure I.12 : Schéma des différents pertes [16]

La figure 1.12 présente de manière schématique les différentes pertes générées par les constituants du capteur solaire plan. On remarque aisément que sur une base de 100% à la surface du vitrage du capteur, seulement 60% du rayonnement arrivent directement à l'absorbeur. Quant aux 40% restants ils ne sont pas complètement perdus mais ils vont jouer un rôle par l'intermédiaire de l'effet de serre,

I.4.2.4 Fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur fait partie des éléments essentiels dans une installation de panneaux solaires thermiques. Il existe plusieurs fluides caloporteurs pouvant être utilisés dans un projet de chauffage solaire.

En fonction du fluide employé, l'efficacité énergétique des systèmes de chauffage solaire peut varier. Ainsi, le choix d'un fluide caloporteur doit se faire en tenant compte de ses diverses caractéristiques ainsi que du projet d'installation de panneaux solaires.

Chaque fluide présente des caractéristiques thermo physiques distinctes : capacité calorifique, viscosité, conductivité thermique, point d'ébullition, point de congélation, corrosivité, etc. Ces propriétés influencent directement l'efficacité énergétique globale du système. Par exemple, un fluide avec une haute capacité calorifique permettra de transporter plus de chaleur avec un débit réduit, ce qui peut améliorer l'efficacité et réduire la consommation électrique de la pompe de circulation. Il existe plusieurs fluides caloporteurs avec différentes propriétés selon l'utilisation souhaitée. [17].

Fluide Caloporteur	Avantages	Inconvénients	Remarques / Usage Spécifique
Eau	- Excellente conductivité thermique	- Risque de gel (nécessite des additifs antigels)	Utilisée principalement dans les systèmes où le risque de gel est faible ou avec additifs.
Air	- Non corrosif, facile à manipuler	- Faible conductivité thermique par rapport à l'eau	Adapté aux systèmes de ventilation ou de chauffage de l'air dans les bâtiments.
Huiles synthétiques	- Stabilité thermique élevée, adaptées aux hautes températures	- Coût élevé	Utilisées dans les systèmes industriels nécessitant des températures élevées.
Nanofluides	- Amélioration significative du transfert thermique	- Fortes pertes de charge	En développement pour des applications avancées

Fluide Caloporteur	Avantages	Inconvénients	Remarques / Usage Spécifique
			de capteurs solaires thermiques.
Glycol (mélangé à l'eau)	- Résistant au gel, bonne stabilité chimique	- Moins efficace que l'eau pure en termes de transfert thermique	Couramment utilisé dans les climats froids pour éviter le gel.
CO₂ (gazeux)	- Bonne performance dans les systèmes haute pression	- Nécessite des équipements spécifiques	Étudié pour des applications industrielles ou des centrales solaires thermiques.
Hélium (He)	- Propriétés thermiques intéressantes	- Coût élevé et complexité d'utilisation	Également étudié pour des systèmes industriels ou des centrales solaires.

Tableau I.5 : différents fluides caloporteurs pour une installation solaire[17]

I.4.2.5 Coffre (L'enceinte) :

Appelé aussi le box constitue l'enveloppe arrière et latérale du collecteur ; ses fonctions sont multiples : il assure l'étanchéité, la protection mécanique, la fixation et la cohésion de l'ensemble.

Voici quelques matériaux couramment utilisés pour fabriquer le coffre :

- ❖ **Aluminium** : Le coffre peut être fabriqué à partir d'une tôle en aluminium d'épaisseur 0,8 mm, obtenue par emboutissage. C'est un matériau léger et résistant à la corrosion.
- ❖ **Bois** : Certains coffres sont également fabriqués en bois, souvent en sapin, avec un fond en panneau MDF. Les lattes de bois sont traitées avec une peinture spéciale pour résister aux températures élevées [18].

I.5 L'orientation et l'inclinaison d'un capteur:

L'efficacité des surfaces solaires est influencée par deux éléments essentiels : l'angle et l'orientation. Durant certaines situations, des restrictions peuvent s'appliquer pour positionner le capteur solaire ou le panneau à une inclinaison et une orientation optimale. Dans ce contexte, il est nécessaire de modifier l'orientation et l'inclinaison pour optimiser la collecte du rayonnement solaire. Des recherches précédentes ont démontré que la meilleure orientation est le sud. Comme les capteurs solaires plans sont placés à un certain angle par rapport à l'horizon, il est crucial de déterminer l'inclinaison idéale pour optimiser la quantité d'énergie recueillie.

En utilisant le maximum d'énergie solaire grâce à une inclinaison optimale, nous sommes en mesure d'exploiter l'énergie [19]

- ❖ **L'orientation** : elle dépend essentiellement du fonctionnement du capteur pendant la journée, où on distingue :
 - Fonctionnement pendant la matinée orientation Est ;
 - Fonctionnement pendant l'après-midi orientation Ouest ;
 - Fonctionnement durant toute la journée orientation Sud.
- ❖ **L'inclinaison** : elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année:
 - Fonctionnement estival Angle d'inclinaison =Latitude-10°
 - Fonctionnement hivernal Angle d'inclinaison =Latitude+20
 - Fonctionnement annuel Angle d'inclinaison =Latitude+10°
 - En plus, en tenant compte les paramètres liés au site.

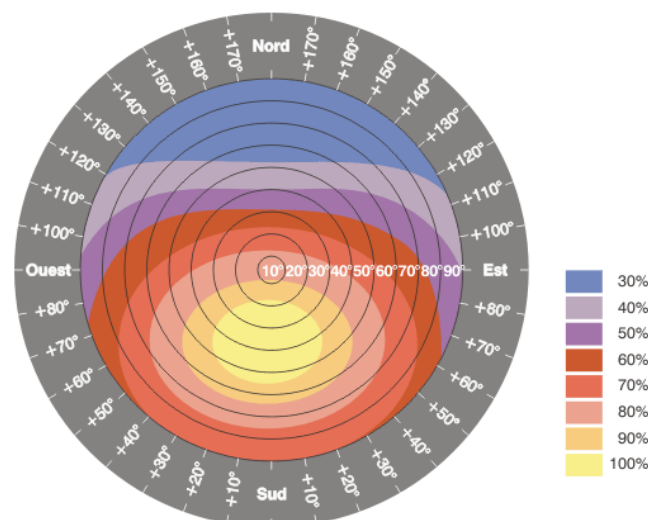


Figure I.13 : Schéma montrant l'inclinaison et l'orientation du capteur [20]

Exemple : (la ville de Tlemcen)

On va prendre notre ville Tlemcen comme un exemple

- **Orientation optimale :** Comme Tlemcen est située dans l'hémisphère nord, l'orientation idéale pour un capteur solaire est vers le sud ; Cette orientation permet aux panneaux de capter un maximum de rayonnement solaire tout au long de la journée.
- **Inclinaison optimale :** L'inclinaison optimale dépend de la latitude de Tlemcen, qui est d'environ $34,8^\circ$ nord . Les études montrent que l'angle d'inclinaison optimal est généralement égal ou légèrement ajusté par rapport à la latitude du lieu ; En général, une inclinaison entre 30° et 35° est recommandée pour maximiser la captation des rayons solaires en moyenne annuelle.

Toutefois, cette inclinaison peut être ajustée selon les saisons :

- **En hiver :** une inclinaison plus élevée (par exemple, $+15^\circ$ par rapport à la latitude) permet de mieux capter les rayons solaires, qui sont plus bas sur l'horizon.
- **En été :** une inclinaison plus faible (par exemple, -15° par rapport à la latitude) est préférable, car le soleil est plus haut dans le ciel

I.6 Conclusion :

Ce chapitre a montré les règles de base de la transformation thermique du soleil et les différentes façons de transférer la chaleur. Il a souligné l'intérêt des capteurs solaires thermiques, notamment les capteurs plats en verre, beaucoup utilisés pour chauffer l'eau. Les types de capteurs, leurs parties et ce qu'ils sont capables de faire ont été expliqués clairement. L'efficacité d'un capteur dépend beaucoup du choix des matériaux, de l'isolation, du fluide qui transporte la chaleur et de sa position. L'inclinaison et la place géographique touchent aussi le résultat énergétique. L'amélioration de ces systèmes est très importante pour une transition énergétique durable. Ce chapitre est une base essentielle pour comprendre les points techniques liés à l'amélioration des capteurs solaires.

Chapitre II : Analyse Théorique

II.1 Introduction :

Ce chapitre vise à établir un cadre théorique de base pour évaluer les performances thermiques des capteurs solaires plans. Il présente les équations fondamentales qui quantifient la réception, l'absorption et la conversion ultime en énergie thermique utile. Cette base mathématique et physique est essentielle pour comprendre les mécanismes de transfert d'énergie dans les capteurs et les pertes de chaleur inhérentes à leur fonctionnement. En mettant l'accent sur des concepts tels que le rayonnement solaire, l'efficacité instantanée, la conduction, la convection et les pertes par rayonnement, et même sur des paramètres de performance tels que le facteur de retraitement de la chaleur, ce chapitre constitue la base analytique qui permet l'interprétation des résultats expérimentaux et la comparaison des efficacités de différents matériaux absorbants dans les chapitres suivants.

II.2 Énergie Solaire Reçue / Incidente

II.2.1 Énergie solaire incidente sur le capteur.

$$\bullet \quad Q_i = A \cdot I \quad \text{II.1}$$

L'équation $Q_i = A \cdot I$ représente une expression essentielle pour déterminer l'énergie solaire incidente (ou la puissance solaire reçue) sur une surface soumise aux rayons solaires. Elle est fréquemment utilisée dans le secteur des détecteurs solaires thermiques et photovoltaïques.

Q_i : Énergie solaire incidente (ou puissance solaire reçue) sur la surface du capteur.

Si on intègre cette puissance sur une durée, Q_i peut être exprimée en Joules (J) ou en kWh (kilowattheures).

A : Surface du capteur exposé au rayonnement solaire. [m^2]

Cette surface correspond à la zone active du capteur qui reçoit directement les rayons solaires.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire). [W/m^2]

Cela représente la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface.

II.2.2 Énergie solaire reçue

$$\bullet \quad E_s = G \cdot S \cdot \Delta t \quad \text{II.2}$$

L'équation $E_s = G \cdot S \cdot \Delta t$ illustre l'énergie solaire captée par une surface exposée au rayonnement solaire sur une période spécifiée. Elle est indispensable pour déterminer le volume total d'énergie solaire qui atteint un capteur ou une surface donnée, sur la base de l'irradiation solaire, de la superficie exposée et du temps d'exposition. [21]

Es : Énergie solaire reçue.

C'est la quantité totale d'énergie solaire captée par la surface pendant la durée Δt .

G : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire). [W/m²]

G représente la puissance solaire reçue par unité de surface à un instant donné.

S : Surface exposée au rayonnement solaire [m²]

C'est la zone active qui reçoit les rayons solaires.

Δt : Durée d'exposition au rayonnement solaire. [s]

II.3 Énergie Absorbée et Pertes Thermiques

II.3.1 Énergie réellement absorbée par le capteur.

$$\bullet \quad Q_i = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha \quad \text{II.3}$$

L'équation $Q_i = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha$ symbolise l'énergie que capte le collecteur solaire thermique. C'est une élaboration de l'équation antérieure $Q_i = A \cdot I$, qui inclut deux paramètres essentiels définissant les caractéristiques optiques du capteur : τ (taux de transmission) et α (taux d'absorption) [22].

Qi: Énergie absorbée par le collecteur (ou puissance solaire absorbée).[W]

Si on intègre cette puissance sur une durée, Q_i peut être exprimée en Joules (J) ou en kWh (kilowattheures).

A : Surface du collecteur exposé au rayonnement solaire. [m²]

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire) W/m²

τ : Transmittance du matériau transparent (généralement du verre ou un autre revêtement) couvrant le collecteur C'est la fraction de l'énergie solaire incidente qui traverse le matériau transparent pour atteindre l'absorbeur.

Valeur typique : $\tau \approx 0,9$ (90 % de transmittance pour un verre de bonne qualité).

II.3.2 Pertes thermiques

II.3.2.1 Pertes thermiques du capteur vers l'environnement

La formule représente les pertes thermiques d'un capteur solaire thermique vers l'environnement (perte thermique Globale) Ces pertes sont un phénomène inévitable dans les systèmes solaires thermiques, une partie de l'énergie absorbée par le capteur est perdue sous forme de chaleur à cause des différences de température entre le capteur et son environnement [23].

$$Q_o = UL \cdot A \cdot (T_c - T_a) \quad \text{II.4}$$

Q_o : Pertes thermiques du collecteur (ou puissance thermique perdue).

Watts (W) si on considère une puissance instantanée. Si on intègre cette puissance sur une durée, Q_o peut être exprimée en Joules (J) ou en kWh (kilowattheures).

UL : Coefficient global de perte thermique. [W/m²·K]

Ce coefficient caractérise la capacité du capteur à perdre de la chaleur vers l'environnement. Il dépend des matériaux utilisés, de l'isolation thermique et de la conception du capteur.

A : Surface du collecteur exposé aux échanges thermiques. [m²]

T_c : Température moyenne du fluide caloporteur (ou de la surface absorbante) dans le collecteur. [K ou °C]

T_a : Température ambiante de l'environnement extérieur. [K ou °C]

II.3.2.2 Types Pertes thermiques :

- a. **Pertes par convection** : Échange de chaleur entre le capteur et l'air ambiant à cause des mouvements naturels de l'air autour du capteur.

hc est le coefficient de convection [24].

$$\bullet \quad Q_{conv} = hc \cdot A \cdot (T_c - T_a) \quad \text{II.5}$$

hc : [W/m²·°C] , A : [m²], Tc : [°C ou K] Ta : [°C ou K]

- b. **Pertes par conduction** : Transfert de chaleur à travers les matériaux constituant le capteur (parois latérales, arrière non isolé, etc.)[24].

$$\bullet \quad Q_{con} = k \cdot \frac{A}{d} \cdot (T_c - T_a) \quad \text{II.6}$$

K : [W/m·K] ΔT : [K ou °C] d : épaisseur du matériau [m],

A : [m²]

Où k est la conductivité thermique, d l'épaisseur du matériau.

- c. **Pertes par rayonnement** : Emission de chaleur sous forme de rayonnement infrarouge à partir de la surface chaude du capteur vers l'environnement [24].

$$\bullet \quad Q_{rayo} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_c^4 - T_a^4) \quad \text{II.7}$$

Tc, Ta : températures en Kelvin Où ε est l'émissivité de la surface

σ est la constante de Stefan-Boltzmann

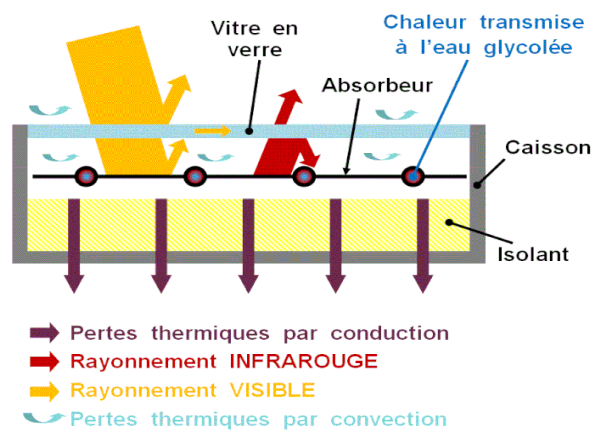


Figure II.1 : un schéma qui représente les pertes thermiques dans un capteur [25]

II.3.3 Énergie utile extraite du capteur.

$$\bullet \quad Q_u = Q_i - Q_o = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha - UL A (T_c - T_a) \quad \text{II.8}$$

L'énergie utilisable dérivée d'un capteur thermique solaire est déterminée par l'équation

Elle permet d'évaluer la quantité nette d'énergie réellement récupérée par le fluide caloporteur, après prise en compte des pertes thermiques vers l'environnement. Question : Énergie exploitable obtenue à partir du capteur (ou puissance exploitable).

Qu : Énergie utile extraite du capteur

Qi : Énergie solaire absorbée par le capteur

$$\text{Formule : } Q_i = A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha.$$

Il s'agit de l'énergie solaire incidente qui est réellement captée par le collecteur après avoir traversé le matériau transparent (τ) et été absorbée par la surface qui a un coefficient d'absorption (α).

Qo : Pertes thermiques du capteur vers l'environnement

$$\text{Formule : } Q_o = UL \cdot A \cdot (T_c - T_a).$$

Ces pertes sont dues aux différences de température entre le capteur (T_c) et l'environnement (T_a).

A : Surface du collecteur exposé au rayonnement solaire.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

τ : Transmittance du matériau transparent.

α : Absorptivité de la surface absorbante.

UL : Coefficient global de perte thermique.

Tc : Température moyenne du fluide caloporteur (ou de la surface absorbante)

Ta : Température ambiante de l'environnement extérieur.

Interaction de l'énergie avec le capteur (absorption, pertes, rendement net).

II.4 Transfert au fluide caloporteur

II.4.1 Énergie transmise au fluide caloporteur.

$$\bullet \quad Q_u = \dot{m} \cdot C_p \cdot (T_o - T_i) \quad \text{II.9}$$

L'équation illustre la connexion entre l'énergie bénéfique obtenue par un capteur solaire thermique et les caractéristiques du fluide caloporteur qui véhicule cette énergie. Elle permet d'évaluer la quantité d'énergie transmise au fluide sur la base de son débit massique (\dot{m}), de sa capacité thermique spécifique (C_p), et du différentiel de température entre l'entrée (T_i) et la sortie (T_o) du fluide à travers le capteur [26].

Qu: Énergie utile extraite du capteur (ou puissance utile).

ṁ: Débit massique du fluide caloporteur.

C'est la masse de fluide qui traverse le capteur par unité de temps.

cp: Capacité thermique spécifique du fluide caloporteur.

Cette propriété indique la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un kilogramme de fluide de 1 °C.

To: Température du fluide à la sortie du capteur.

Ti: Température du fluide à l'entrée du capteur.

To–Ti: Différence de température entre la sortie et l'entrée du fluide.

Liens entre l'énergie utile et le fluide qui transporte la chaleur.

II.5 Paramètre de performance

II.5.1 Facteur de retraitement thermique, indique l'efficacité du transfert d'énergie.

$$\bullet \quad FR = \frac{A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha}{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_c - T_i)(T_o - T_i)} \quad \text{II.10}$$

Dans l'évaluation des performances d'un capteur solaire thermique, le facteur de retraitement thermique (FR) est un indicateur essentiel. Il indique la portion de l'énergie solaire captée qui est réellement transmise au fluide caloporteur, en prenant en compte les pertes de chaleur et les caractéristiques du système (débit massique, capacité thermique spécifique, etc.) [23].

FR : Facteur de retraitement thermique (sans unité). C'est un nombre compris entre 0 et 1 qui caractérise l'efficacité avec laquelle l'énergie solaire absorbée est transférée au fluide caloporteur.

A : Surface du collecteur exposé au rayonnement solaire.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

τ : Transmittance du matériau transparent.

α : Absorptivité de la surface absorbante.

\dot{m} : Débit massique du fluide caloporteur.

c_p : Capacité thermique spécifique du fluide caloporteur.

T_c : Température moyenne du fluide caloporteur (ou de la surface absorbante) dans le collecteur.

T_i : Température du fluide à l'entrée du capteur.

T_o : Température du fluide à la sortie du capteur.

II.5.2 Équation de Hottel-Whillier-Bliss : énergie nette extraite, corrigée par FR.

L'équation de Hottel-Whillier-Bliss est une formule essentielle pour simuler les performances des capteurs solaires thermiques plans. Elle permet de déterminer l'énergie utile extraite (Q_u) en considérant l'énergie solaire captée, les pertes thermiques et les conditions d'exploitation (température du fluide porteur de chaleur, température environnante, etc.).

$$\bullet \quad Q_u = FR \cdot A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha - UL \cdot A \cdot (T_i - \mu T_a) \quad \text{II.11}$$

Q_u : Énergie utile extraite par le capteur (ou puissance utile).

FR : Facteur de retraitement thermique (sans unité).

C'est un paramètre qui caractérise l'efficacité avec laquelle l'énergie solaire absorbée est transférée au fluide caloporteur.

A : Surface du collecteur exposé au rayonnement solaire.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

τ : Transmittance du matériau transparent.

α : Absorptivité de la surface absorbante.

UL: Coefficient global de perte thermique.

Ti: Température du fluide à l'entrée du capteur.

Ta : Température ambiante de l'environnement extérieur.

Indicateurs de performance globale du système.

II.6 Rendement du capteur

II.6.1 Rendement instantané basé sur l'énergie utile extraite.

L'équation illustre l'efficacité instantanée d'un capteur solaire thermique. Ce rendement évalue la portion de l'énergie solaire incidente qui est véritablement transformée en énergie bénéfique extraite par le fluide caloporteur

$$\bullet \quad \eta = \frac{Q_u}{(A \cdot I)} \quad \text{II.12}$$

η : Rendement instantané du capteur (sans unité).

C'est un nombre compris entre 0 et 1 (ou 0 % et 100 %) qui indique l'efficacité du capteur à transformer l'énergie solaire incidente en énergie utile.

Qu : Énergie utile extraite du capteur (ou puissance utile).

Formule : $QU=FR \cdot A \cdot I \cdot \tau \cdot \alpha - FR \cdot UL \cdot A \cdot (Ti - Ta)$.

A : Surface du collecteur exposé au rayonnement solaire.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

II.6.2 Forme linéarisée du rendement selon les pertes thermiques.

L'expression linéaire du rendement d'un capteur solaire thermique est une version simplifiée qui rend possible la modélisation du rendement (η) en lien avec les paramètres cruciaux du système : les caractéristiques optiques, les déperditions thermiques, et les conditions de fonctionnement (température du capteur, température extérieure, irradiation solaire) [26].

$$\bullet \quad \eta = (FR \cdot (\tau \cdot \alpha) - \left(\frac{UL}{I}\right) \cdot (T_c - T_a)) \quad \text{II.13}$$

η : Rendement instantané du capteur (sans unité).

C'est un nombre compris entre 0 et 1 (ou 0 % et 100 %).

FR : Facteur de retraitement thermique (sans unité).

τ : Transmittance du matériau transparent.

α : Absorptivité de la surface absorbante.

UL : Coefficient global de perte thermique.

I : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

T_c : Température moyenne du fluide caloporteur (ou de la surface absorbante) dans le collecteur.

T_a : Température ambiante de l'environnement extérieur.

II.6.3 Rendement basé sur le rendement optique idéal et les pertes thermiques linéaires.

L'équation représente le rendement instantané d'un capteur solaire thermique, prenant en compte les pertes de chaleur proportionnelles au différentiel de température entre le capteur et son environnement. Cette relation est souvent employée pour représenter les performances des capteurs thermiques plans solaires [27].

$$\bullet \quad \eta = \eta_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} \quad \text{II.14}$$

η : Rendement instantané du capteur (sans unité).

C'est un nombre compris entre 0 et 1 (ou 0 % et 100 %) qui indique la fraction de l'énergie solaire incidente qui est effectivement convertie en énergie utile.

η_0 : Rendement optique à température nulle (sans unité).

Représente le rendement maximal du capteur lorsque les pertes thermiques sont négligeables ($T_m = T_a$).

Il dépend des propriétés optiques du capteur, comme la transmittance (τ) et l'absorptivité (α).

a₁ : Coefficient linéaire des pertes thermiques.

Ce coefficient caractérise la sensibilité des pertes thermiques à la différence de température entre le capteur et l'environnement.

T_m: Température moyenne du fluide caloporteur (ou de la surface absorbante) dans le capteur.

T_a : Température ambiante de l'environnement extérieur.

G : Irradiation solaire (ou densité de puissance solaire).

Indique la performance en % d'énergie utile par rapport à l'énergie reçue.

II.7 Conclusion :

Tout au long de ce chapitre, nous avons établi les relations de base qui contrôlent le fonctionnement des capteurs solaires thermiques. Les équations développées permettent de calculer l'énergie incidente, l'énergie absorbée, l'énergie perdue et l'énergie utile, en tenant compte des paramètres thermiques et optiques du système. Ces outils théoriques sont essentiels pour analyser rigoureusement les performances des capteurs solaires plans. Ils serviront de référence pour l'interprétation des données expérimentales et pour la comparaison des différents matériaux absorbants testés. Cette analyse théorique constitue donc un pilier important pour soutenir les observations pratiques décrites dans les sections suivantes et guider le choix de la technologie pour parvenir à l'optimisation énergétique.

**Chapitre III : Méthodologie Expérimentale
et Caractérisation des Matériaux
Absorbants**

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

III.1 Introduction :

Ce mémoire, axé sur l'impact des matériaux absorbants sur l'efficacité énergétique des capteurs solaires plans, inclut une section dédiée à la description des matériaux employés pour la partie expérimentale. Le choix des matériaux est primordial, car il influence directement les performances, la durabilité et l'efficacité du système. Chaque matériau est sélectionné en fonction de ses propriétés thermiques (conductivité, capacité à absorber, capacité à émettre), de sa résistance aux conditions extérieures et de son coût. Ainsi, ce chapitre constitue un fondement pour saisir les décisions techniques prises dans la section pratique du projet.

III.2 Conception et réalisation de l'expérience :

Lors de cette expérience, l'objectif était d'étudier comment quatre matériaux absorbants différents, placés à l'intérieur d'un capteur solaire plan vitré, influencent ses performances thermiques. Chaque absorbeur a été préalablement peint en noir mat, une finition idéale pour maximiser l'absorption du rayonnement lumineux (visible et proche infrarouge), car elle réduit fortement la réflexion et favorise la conversion de l'énergie solaire en chaleur.

Le dispositif expérimental a consisté à exposer chaque capteur à un éclairage constant de 400 W/m^2 , produit par un projecteur situé à une distance fixe de 20 cm, simulant ainsi des conditions stables d'ensoleillement jusqu'à ce que la température de chaque absorbeur se stabilise, c'est-à-dire lorsque l'énergie captée par le matériau devient égale à l'énergie perdue vers l'environnement par convection, conduction et rayonnement. En plus de mesurer la température maximale atteinte, on a également pris en compte le temps nécessaire pour atteindre cette stabilisation, ce qui donne une indication importante sur la réactivité thermique de chaque matériau.

Au début de l'expérience, la température de chaque absorbeur augmente progressivement, car l'énergie reçue est supérieure aux pertes thermiques. Cette phase appelée régime transitoire, varie selon les caractéristiques du matériau : certains s'échauffent rapidement, d'autres plus lentement. Une fois l'équilibre atteint, la température reste pratiquement constante : c'est le régime permanent.

Bien que tous les matériaux soient recouverts de la même peinture noire, leurs performances thermiques diffèrent nettement selon leurs propriétés intrinsèques, comme la conductivité thermique, la capacité calorifique ou encore l'épaisseur. En revanche, ils peuvent aussi perdre plus facilement la chaleur par conduction ou rayonnement. À l'inverse, certains

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

matériaux légers ou poreux, bien que moins conducteurs, peuvent stocker davantage de chaleur au début et maintenir une température élevée plus longtemps avant de se stabiliser.

Cette étude montre donc que si la peinture noire joue un rôle essentiel dans l'absorption initiale du rayonnement, la nature du matériau sous-jacent influence fortement la vitesse d'échauffement, la température maximale atteinte et la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre thermique et le rôle de l'épaisseur. Ces paramètres sont cruciaux pour optimiser l'efficacité énergétique des capteurs solaires utilisés dans des applications concrètes telles que le chauffage d'air, la production d'eau chaude sanitaire ou le séchage thermique.

III.3 Choix des matériaux absorbants

III.3.1 Critères de sélection des matériaux :

Lors du choix des matériaux absorbants pour cette étude, plusieurs critères ont été pris en compte :

- **Conductivité thermique (λ)**: est un facteur clé qui détermine la capacité d'un matériau à transférer la chaleur qu'il a absorbée vers le fluide caloporteur (comme l'eau, l'air ou d'autres) circulant dans le capteur. Un matériau présentant une conductivité élevée, tel que le cuivre ou l'aluminium, permet un transfert de chaleur rapide et efficace, ce qui contribue à minimiser les pertes thermiques locales. Toutefois, une conductivité trop élevée peut entraîner une dissipation excessive de la chaleur vers l'environnement si le système d'isolation n'est pas adéquatement conçu. Par conséquent, il est essentiel de trouver un équilibre entre une conductivité suffisante pour un transfert rapide et une gestion appropriée des pertes thermiques.
- **Capacité calorifique spécifique (c)** : désigne la quantité d'énergie requise pour augmenter la température d'une unité de masse d'un matériau. Un matériau avec une capacité calorifique élevée, tel que l'eau ou certains polymères, est capable de stocker une plus grande quantité d'énergie thermique, ce qui aide à atténuer les fluctuations d'ensoleillement (comme les nuages ou l'intermittence). Cependant, cela peut également retarder l'augmentation initiale de la température du capteur. Ce facteur est essentiel pour les applications qui nécessitent une stabilité thermique sur de longues périodes ou dans des conditions météorologiques changeantes.
- **Émissivité (ϵ)** : L'émissivité évalue la capacité d'un matériau à réémettre la chaleur qu'il a absorbée sous forme de rayonnement infrarouge. Plus un matériau présente une

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

émissivité élevée, plus il est enclin à perdre de la chaleur vers l'extérieur. Dans le cas d'un capteur solaire, il est donc essentiel de minimiser ces pertes thermiques. Il est donc préférable d'opter pour des matériaux ayant une faible émissivité, afin de maximiser la chaleur captée par le rayonnement solaire. Pour améliorer cette propriété, des revêtements spéciaux, appelés "revêtements sélectifs", sont fréquemment appliqués sur les surfaces absorbantes.

- **Absorption du rayonnement solaire (α)** : Le coefficient d'absorption, désigné par, indique α la fraction du rayonnement solaire incident qui est captée par le matériau plutôt que réfléchi. Un coefficient plus élevé signifie une meilleure efficacité du matériau en tant qu'absorbeur de chaleur. Les matériaux sombres, tels que les noirs mats ou certains oxydes métalliques, se montrent particulièrement performants dans ce domaine, car ils retiennent une grande partie du rayonnement visible et du proche infrarouge. Une absorption élevée permet ainsi de transformer l'énergie solaire en énergie thermique de manière plus efficace.
- **Disponibilité et coût** : Il est crucial de considérer des éléments pratiques tels que la disponibilité du matériau sur le marché ainsi que son coût. Même si un matériau possède des caractéristiques thermiques idéales, il ne sera pas choisi s'il est trop rare, difficile à produire ou trop onéreux. L'objectif est d'atteindre un bon compromis entre performance technique et viabilité économique, en particulier lorsque l'application concerne un usage industriel ou domestique à grande échelle.

Ces critères ont permis de sélectionner des matériaux dont les propriétés thermiques et optiques peuvent influencer de manière significative les performances du capteur solaire plan vitré.

III.3.2 Description des absorbeurs testés :

Dans cette étude, cinq types d'absorbeurs ont été testés : deux échantillons d'aluminium (d'épaisseurs différentes), un échantillon de cuivre, un échantillon d'inox (acier inoxydable) et un échantillon d'acier galvanisé. Tous ces matériaux ont été choisis en raison de leurs propriétés thermiques et optiques différentes, qui peuvent influencer les performances du capteur solaire plan vitré.

a) **Aluminium** :

L'aluminium est un matériau léger et bon conducteur thermique, ce qui en fait un choix intéressant pour des applications où la rapidité de réponse thermique est cruciale.

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

Les deux échantillons testés présentent des épaisseurs différentes : l'un de 0,2 mm et l'autre de 0,76 mm. Cette différence d'épaisseur influence leurs comportements thermiques :

- L'échantillon plus épais possède une masse plus importante, ce qui lui confère une capacité accrue à stocker la chaleur. Cependant, il sera probablement plus lent à se chauffer.
- À l'inverse, l'échantillon plus fin a une masse plus faible, ce qui limite sa capacité de stockage, mais il peut s'échauffer plus rapidement en réponse au rayonnement reçu.

L'aluminium a été sélectionné comme matériau d'étude en raison de ses propriétés intéressantes et présente un rapport qualité-prix avantageux, ce qui en fait un choix courant dans les applications thermiques.

Afin d'évaluer l'influence de la masse sur le comportement thermique du matériau, deux échantillons d'épaisseurs différentes ont été testés : l'un de 0,2 mm et l'autre de 0,7 mm. Ces différences d'épaisseur permettent d'analyser comment la quantité de matériau impacte l'absorption, le stockage et la dissipation de la chaleur.



Figure III.1 : Plaque d'aluminium [28]

b) Bronze :

Le bronze est un matériau qui combine une bonne conductivité thermique, une résistance mécanique élevée et une excellente résistance à la corrosion, ce qui le rend idéal pour des applications en extérieur. L'échantillon, d'une épaisseur de 0,48 mm, possède une masse suffisante pour garantir une bonne rétention de la chaleur tout en permettant une montée en température relativement rapide. Lorsqu'il est recouvert d'une peinture noire mate, sa capacité d'absorption est considérablement améliorée, ce qui le rend efficace en tant que surface de captation. Il a été sélectionné en raison de sa robustesse, de sa stabilité thermique et de sa performance dans un système de captation solaire.

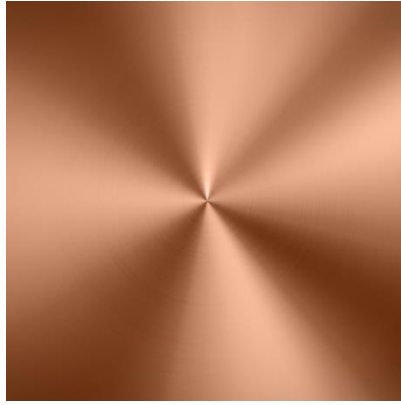


Figure III.2 : Plaque métallique de bronze [29]

c) Acier inoxydable :

L'acier inoxydable, souvent désigné par le terme inox, est un matériau prisé en raison de sa robustesse et de sa durabilité, particulièrement dans des conditions extérieures. Bien qu'il ait une conductivité thermique inférieure à celle du cuivre ou de l'aluminium, il se distingue par sa résistance à la corrosion, ce qui le rend adapté à des applications solaires nécessitant une longévité accrue.

Un échantillon d'inox d'une épaisseur de 0,7 mm a été soumis à des tests. Sa masse relativement importante lui confère une capacité à emmagasiner la chaleur. Néanmoins, sa conductivité thermique limitée pourrait entraver un transfert rapide de la chaleur accumulée, ce qui pourrait influencer sa réactivité thermique face à des variations brusques d'ensoleillement.

L'acier inoxydable a été sélectionné en raison de sa forte résistance à la corrosion, tout en offrant une stabilité thermique et mécanique satisfaisante sur le long terme. Toutefois, sa conductivité thermique reste un point à considérer.



Figure III.3 : Plaque métallique d'inox [30]

d) Acier galvaniser :

L'acier galvanisé est un matériau couramment utilisé dans les applications industrielles grâce à sa bonne résistance mécanique et sa protection contre la corrosion, assurée par un

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

revêtement en zinc. Bien qu'il ne soit pas aussi bon conducteur thermique que l'aluminium ou le cuivre, il reste intéressant pour des structures solaires nécessitant robustesse et durabilité.

Un seul échantillon d'acier galvanisé de 0,55 mm d'épaisseur a été testé. Avec cette épaisseur intermédiaire, le matériau présente une masse suffisante pour stocker une quantité modérée de chaleur, mais sa faible conductivité thermique peut ralentir le transfert de celle-ci vers le fluide ou l'air environnant. Il pourrait donc se montrer moins réactif aux variations d'ensoleillement, tout en maintenant une température relativement stable une fois chauffé.

L'acier galvanisé a été intégré à cette étude pour représenter une solution économique et robuste, souvent utilisée dans les installations industrielles ou domestiques où le coût est un critère décisif.



Figure III.4 : Plaque métallique en acier galvanisé [31]

Tous les absorbeurs ont été peints en noir mat afin de maximiser l'absorption du rayonnement solaire, notamment dans les longueurs d'onde visibles et proches infrarouges. Cette finition réduit fortement la réflexion et favorise la conversion de l'énergie lumineuse en chaleur.

III.4 Caractéristiques des matériaux analysés :

Plusieurs matériaux métalliques ont été sélectionnés et testés en vue de leur utilisation dans un capteur solaire plan vitré. L'objectif était d'évaluer leurs performances thermiques en fonction de leurs propriétés physiques

Chaque matériau a été analysé avec une épaisseur spécifique afin d'étudier son comportement face au rayonnement solaire.

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

Propriété	Aluminium (0,2 mm / 0,76 mm)	Bronze (0,48 mm)	Inox (0,7 mm)	Acier galvanisé (0,55 mm)
Conductivité thermique (W/m·K)	~237	~50–120	~16–24	~50–60
Densité (kg/m ³)	~2700	~8800	~7900	~7850
Masse volumique (g/cm ³)	2,7	8,8	7,9	7,85
Capacité calorifique (J/kg·K)	~900	~350–400	~500	~460
Émissivité (ϵ)	0,02 – 0,3	0,1 – 0,7 (selon alliage)	0,15 – 0,4	0,1 – 0,8
Absorption solaire (α)	0,2 – 0,9	0,3 – 0,8	0,3 – 0,6	0,4 – 0,85

Tableau III.1 : Caractéristiques techniques comparées

❖ Aluminium

- Avantages : léger, bon marché, conductivité thermique élevée.
- Inconvénients : faible inertie thermique si très fin.

❖ Bronze

- Avantages : Bonne résistance à la corrosion, bonne absorption solaire avec peinture, usinage facile.
- Inconvénients : Moins bonne conductivité thermique que l'aluminium, matériau lourd et coûteux.

❖ Inox (AISI 304)

- Avantages : très résistant à la corrosion, longue durée de vie.
- Inconvénients : faible conductivité thermique.

❖ Acier galvanisé

- Avantages : économique, robuste mécaniquement.
- Inconvénients : conductivité moyenne, revêtement sensible à haute température.

**Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux
Absorbants**

Propriété	État naturel	Avec peinture noire mate
Conductivité thermique (W/m·K)	~237	~237
Absorption solaire (α)	0,2 – 0,3	0,85 – 0,95
Émissivité (ϵ)	0,02 – 0,05	0,8 – 0,9
Réactivité thermique	Lente à moyenne	Rapide
Pertes thermiques	Faibles	Élevées

Tableau III.2 : Impact de la peinture noir mat sur l'Aluminium

Propriété	Bronze – État naturel	Bronze – Avec peinture noire mate
Conductivité thermique (W/m·K)	~50–120	~50–120
Absorption solaire (α)	0,3 – 0,5	0,85 – 0,95
Émissivité (ϵ)	0,1 – 0,3	0,8 – 0,9
Réactivité thermique	Moyenne	Très rapide
Pertes thermiques	Faibles	Élevées

Tableau III.3 : Impact de la peinture noir mat sur le bronze

Propriété	État naturel	Avec peinture noire mate
Conductivité thermique (W/m·K)	~400	~400
Absorption solaire (α)	0,15 – 0,3	0,85 – 0,95
Émissivité (ϵ)	0,03 – 0,05	0,8 – 0,9
Réactivité thermique	Moyenne	Très rapide
Pertes thermiques	Faibles	Élevées

Tableau III.4 : Impact de la peinture noir sur l'Acier inoxydable

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

Propriété	État naturel	Avec peinture noire mate
Conductivité thermique (W/m·K)	~50 – 60	~50 – 60
Absorption solaire (α)	0,4 – 0,5	0,85 – 0,9
Émissivité (ϵ)	0,1 – 0,2	0,8 – 0,9
Réactivité thermique	Moyenne	Rapide
Pertes thermiques	Modérées	Élevées

Tableau III.5 : impact de la peinture noir sur l'acier galvanisé

III.5 Méthodologie expérimentale:

III.5.1 Configuration du dispositif expérimental :

III.5.1.1 Description du capteur solaire plan vitré :

- **Boîtier du capteur**

Le dispositif expérimental est enfermé dans un boîtier en MDF (panneau de fibres à densité moyenne), un matériau à la fois rigide, économique et relativement isolant, ce qui permet de limiter les pertes thermiques vers l'environnement. Le boîtier sert à maintenir l'ensemble des composants du capteur en place tout en assurant une protection contre les influences extérieures telles que le vent, la poussière ou l'humidité.

Le MDF est un matériau avantageux pour la fabrication de boîtiers de capteurs solaires grâce à sa bonne isolation thermique, sa facilité de mise en forme, son faible coût et sa surface lisse qui facilite les finitions. Il est stable face aux variations climatiques, ne se déforme que très peu, et peut être traité pour résister à l'humidité. De plus, étant fabriqué à partir de fibres de bois recyclées, il représente une option écologique et durable. Ces caractéristiques en font un choix pratique, économique et performant pour des applications techniques comme les capteurs solaires plans.

- **Vitrage**

La partie supérieure du capteur est dotée d'un vitrage en verre d'une épaisseur de 3 mm. Ce vitrage a pour fonction de laisser passer le rayonnement solaire tout en minimisant les pertes de chaleur par convection et rayonnement vers l'extérieur. Sa transparence permet d'absorber une grande quantité d'énergie solaire, tout en générant un effet de serre à l'intérieur du capteur, ce qui contribue à améliorer l'efficacité globale du système.

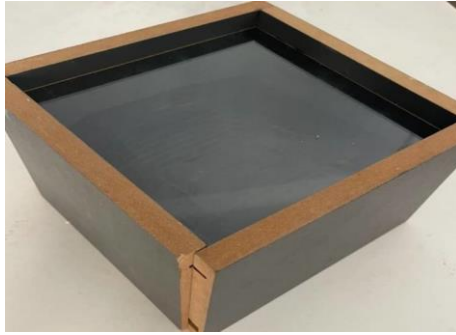


Figure III.5 : Boite en mdf avec le vitrage

III.5.1.2 Source d'éclairage artificiel

Pour reproduire les conditions d'ensoleillement, un projecteur a été employé comme source de lumière. Ce dernier offre un éclairage constant de 400 W/m^2 , ce qui correspond à peu près à un ensoleillement moyen durant une journée estivale. Le projecteur est positionné à une distance fixe de 20 cm du capteur solaire, garantissant ainsi une intensité lumineuse stable tout au long de l'expérience.



Figure III.6 : Projecteur d'éclairage

III.5.1.3 Capteur thermique numérique :

Un capteur thermique numérique a été employé pour mesurer avec précision la température des absorbeurs dans le capteur solaire plan vitré. Ce dispositif est placé directement sur la surface de chaque matériau absorbant, ce qui permet un suivi en temps réel de l'évolution thermique. L'objectif principal de cette mesure est de déterminer la température maximale atteinte par chaque absorbeur, ainsi que le temps requis pour atteindre un état de stabilisation thermique, c'est-à-dire un moment où la température ne connaît plus d'augmentation significative.

Les relevés de température sont réalisés à des intervalles réguliers. Au début de l'essai, lorsque la température augmente rapidement, les mesures sont prises toutes les deux minutes.

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

Cependant, à mesure que l'augmentation de la température ralentit, notamment à l'approche de la stabilisation thermique, l'intervalle entre les relevés est étendu à sept minutes. Cette adaptation de la fréquence de mesure permet d'optimiser le suivi thermique tout en évitant la collecte excessive de données redondantes, tout en maintenant une bonne précision dans l'analyse des performances thermiques des divers matériaux absorbants.



Figure III.7 : Capteur thermique numérique type k

III.5.2 Conditions expérimentales :

Pour garantir la **fiabilité** et la **comparabilité** des résultats obtenus avec différents matériaux absorbants, plusieurs précautions sont prises durant les expériences.

- a) **Température ambiante** : Avant de débiter chaque essai, la température ambiante de la pièce est mesurée à l'aide d'un thermomètre ou d'un capteur thermique. Cette mesure est cruciale, car elle affecte la façon dont les matériaux absorbent et retiennent la chaleur. Elle est enregistrée de manière systématique pour permettre une interprétation précise des résultats et une comparaison adéquate entre les différents essais.
- b) **Répétition des essais** : Afin de garantir que les résultats ne résultent pas du hasard ou d'erreurs isolées, chaque matériau est soumis à un minimum de trois tests. Cette approche permet de confirmer la reproductibilité des mesures. Lorsque les trois essais produisent des résultats cohérents, il est alors possible de considérer que les données sont fiables.
- c) **Contrôle rigoureux des paramètres** : Pour garantir la validité scientifique de l'expérience, il est crucial que certains paramètres demeurent constants d'un essai à l'autre :
 - **L'éclairage** : le projecteur utilisé permet de simuler une exposition solaire stable.

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

- **La position des absorbeurs** : chaque plaque métallique est placée de manière identique dans le boîtier en MDF.
- **Le capteur thermique** : il est systématiquement installé au même endroit sur la surface de l'absorbeur afin que les mesures de température soient comparables.

Ces mesures garantissent que seule la nature du matériau absorbant à un impact sur les résultats.

III.5.3 Procédure expérimentale :

La procédure suit une série d'étapes précises pour garantir que les données recueillies sont représentatives et exploitables.

III.5.3.1 Préparation du dispositif :

Avant de commencer chaque expérience :

- On choisit un absorbeur (plaque métallique d'aluminium, inox, etc.) et on le fixe soigneusement à l'intérieur d'un boîtier en MDF (matériau isolant).
- Une plaque de verre (épaisseur 3 mm) est placée sur le dessus du boîtier. Ce vitrage imite le comportement d'un capteur solaire plan vitré, en limitant les pertes de chaleur par convection et en laissant passer la lumière.
- Le capteur thermique numérique est posé en contact direct avec le matériau absorbant, généralement au centre de la plaque, afin de mesurer la température là où l'absorption est maximale.

III.5.3.2 Exposition à la lumière :

Une fois le montage prêt :

- On allume le projecteur et on le place perpendiculairement au capteur, à une distance fixe L'intensité lumineuse est évaluée et ajustée pour atteindre 400 W/m^2 , une mesure indicative d'une exposition solaire modérée.
- Cette lumière simule les rayons solaires, chauffant le matériau comme s'il se trouvait à l'extérieur

III.5.3.3 Mesure de la température :

Pendant l'exposition :

- La température est enregistrée en continu à l'aide du capteur de température. Celui-ci enregistre la température à intervalles de temps réguliers (par exemple, toutes les secondes ou toutes les minutes).
- La température s'élève progressivement. Ce phénomène est appelé la phase transitoire.
- Lorsque la température ne varie plus (c'est-à-dire qu'elle augmente toujours mais plus très vite), on dit que le système a atteint un état d'équilibre thermique ou un régime permanent.
- À ce moment, on note la température maximale qu'a atteinte le système. Cette température représente un paramètre clé des performances thermiques du matériau.

III.5.3.4 Enregistrement et analyse des données :

Une fois l'expérience terminée :

- Les données sont reportées sous forme de tableaux numériques : chaque ligne correspond à une mesure (temps en minutes) et la valeur de la température associée.
- On peut ensuite utiliser ces données pour représenter des graphes : on obtient des représentations graphiques représentant la température en fonction du temps qu'il fait.
- Ces graphiques permettent de comparer :
 - Le taux de montée en température.
 - Le pic de température.
 - La stabilité des matériaux face à la température.

Les résultats détermineront l'efficacité thermique de chaque type d'absorbeur et permettront d'améliorer les performances des capteurs solaires.

III.6 Les pertes thermiques des absorbeurs :

Lors de cette expérience on a voulu savoir la température d'équilibre mais pour que le système atteigne l'équilibre il faut que :

$$Q \text{ entrant} = Q \text{ sortant}$$

On a :

$$Q \text{ entrant} = \sum \text{perte thermique}$$

$$Q \text{ entrant} = Q \text{ convection} + Q \text{ conduction} + Q \text{ rayonnement}$$

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

Données utiliser

- ✓ Irradiation : $G = 400 \text{ W/m}^2$
- ✓ Distance du projecteur : $0,2 \text{ m}$
- ✓ Surface du vitrage : $S = 0,115 \times 0,105 = 0,012075 \text{ m}^2$
- ✓ Epaisseur du vitrage : $e_{\text{vitre}} = 0,003 \text{ m}$
- ✓ Surface d'absorbants : $S_{\text{abs}} = 10,2 \times 10,2 \text{ m} = 0,010404 \text{ m}^2$
- ✓ Température ambiante : $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($293,15 \text{ K}$)

Parois

- ✓ Surface total : 5 faces (on néglige celle du vitrage)
- ✓ Dimensions internes : $0,14 \times 0,14 \text{ m}$
- ✓ Epaisseur : $e = 0,016 \text{ m}$
- ✓ Surface des parois : $S_{\text{parois}} = 5 \times 0,14 \times 0,14 = 0,098 \text{ m}^2$

Formules :

1. Puissance reçue :

$$Q_{\text{entrant}} = G \times S_{\text{vitrage}}$$

2. Perte thermique :

a) Perte par rayonnement :

$$Q_{\text{rayonnement}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_{\text{eq}}^4 - T_{\text{amb}}^4)$$

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

b) Perte par convection :

$$Q_{\text{convection}} = h \cdot S_{\text{abs}} \cdot (T_{\text{eq}} - T_{\text{amb}})$$

c) Perte par conduction (parois) :

$$Q_{\text{conduction}} = \frac{k \cdot S_{\text{parois}}}{e} (T_{\text{eq}} - T_{\text{amb}})$$

On a 3 équations pour résoudre ce problème en doit utiliser le programme Matlab pour faciliter les calculs :

Le code Matlab

Après l'exécution du Matlab on a obtenu les résultats suivants :

$$T_{\text{équilibre}} = 54,30 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$k = 0,005 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Chapitre III : Méthodologie Expérimentale et Caractérisation des Matériaux Absorbants

1. Puissance reçue

$$Q_{entrant} = 400 \times 0,012075$$

$$Q_{entrant} = 4,83 \text{ w}$$

2. Pertes thermique

a) Perte par rayonnement

$$Q_{rayonnement} = 0,95 \times 5,67 \times 10^{-8} \times (327,45^4 - 293,15^4)$$

$$Q_{rayonnement} = 2,14 \text{ w}$$

b) Perte par convection

$$Q_{convection} = 5 \times 0,010404 \times (327,45 - 293,15)$$

$$Q_{convection} = 1,78 \text{ w}$$

Coefficient de convection : $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

c) Perte par les parois

$$Q_{conduction} = \frac{0,005 \times 0,098}{0,016} (327,45 - 293,15)$$

$$Q_{conduction} = 0,91 \text{ w}$$

Conductivité thermique : $k = 0,005 \text{ w/m.K}$

$$Q_{total} = 2,14 + 1,78 + 0,91 = 4,83 \text{ w}$$

$$Q_{entrant} = Q_{total}$$

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a présenté de manière détaillée les matériaux absorbants étudiés, leurs caractéristiques physico-chimiques, ainsi que la méthodologie expérimentale adoptée. Les dimensions, épaisseurs et propriétés thermiques des matériaux (cuivre, aluminium, inox, acier galvanisé) ont été précisées afin de permettre une comparaison rigoureuse. Les conditions expérimentales ont été strictement contrôlées (température ambiante, éclairage constant, positionnement du capteur) pour garantir la fiabilité des résultats. La procédure d'essai a été structurée et reproductible, de la préparation du montage jusqu'à l'enregistrement des données. Cette démarche méthodologique fournit une base solide pour l'analyse des performances thermiques du capteur solaire plan vitré, en lien direct avec le choix du matériau absorbant

Chapitre IV : Résultats Et Interprétations

IV.1 Introduction :

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus dans une étude comparative de différents absorbeurs métalliques utilisés dans les capteurs solaires plans. L'objectif principal est de mettre en évidence l'influence de la nature et de l'épaisseur du matériau absorbant sur les performances thermiques du capteur. À cette fin, une série d'expériences a été menée sur cinq types d'absorbeurs (aluminium double couche, bronze, acier galvanisé et acier inoxydable) et les a soumis aux mêmes conditions d'irradiation solaire simulée. Les courbes température-temps permettent de suivre l'évolution thermique de chaque matériau, de distinguer des phases caractéristiques (démarrage, montée transitoire, stagnation) et d'en déduire des performances relatives. L'analyse de ces résultats nous permet d'interpréter les mécanismes thermiques mis en jeu et d'identifier l'absorbant le plus efficace dans la gamme étudiée.

IV.2 Analyse Individuelle des Absorbeurs

IV.2.1 Etude de l'absorbant acier inoxydable de 0,7 mm :

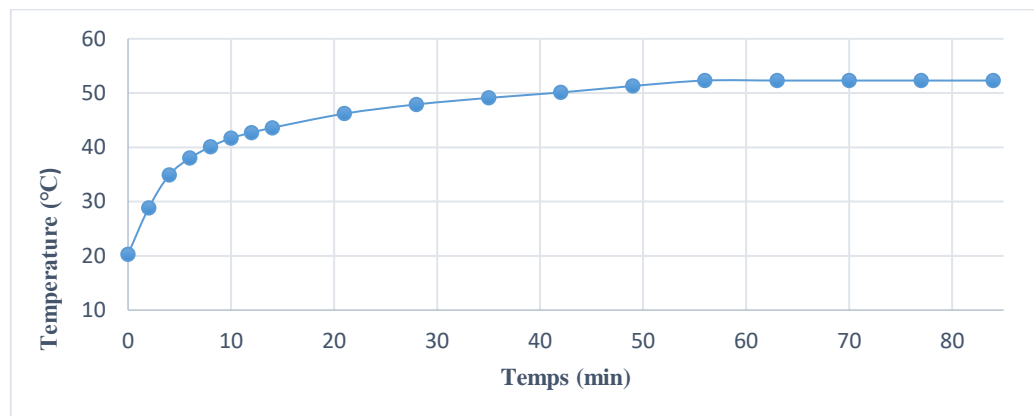


Figure IV.1 : Evolution de la température en fonction du temps (INOX)

Ce graphique indique une augmentation graduelle de la température de 20,3 °C à 52,3 °C sur une période de 56 minutes, suite à quoi la température demeure stable jusqu'à 84 minutes. Cela signifie que, bien que l'acier inoxydable soit robuste sur le plan mécanique et résistant à la corrosion, sa faible conductivité thermique limite sa capacité à recueillir rapidement l'énergie solaire. L'inertie thermique joue un rôle significatif, ce qui retarde l'établissement de l'état stable. Concernant l'efficacité énergétique, cet absorbant présente des performances moindres, principalement en raison de la composition du matériau.

IV.2.2 Etude de l'absorbeur acier galvaniser de 0,55 mm

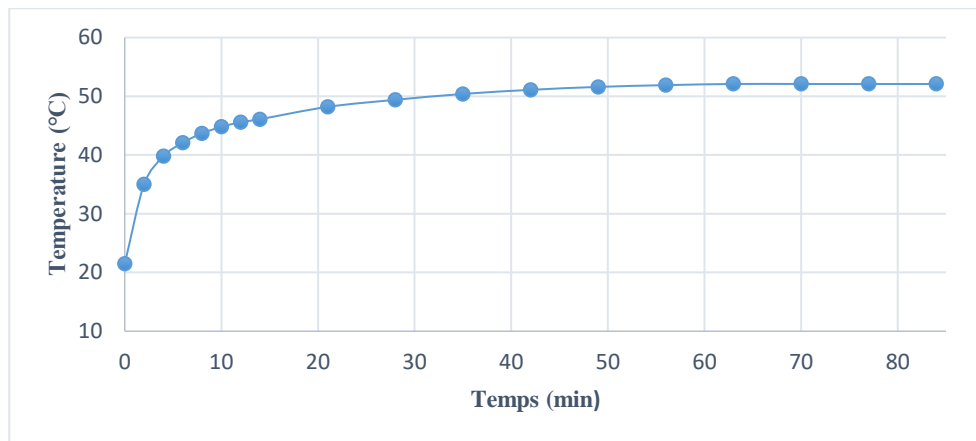


Figure IV.2 : Evolution de la température en fonction du temps (acier galvanise)

Ce graphe montre une progression thermique plus rapide que celle de l'acier inoxydable, commençant à 21,5°C pour culminer à 52,1°C en 63 minutes. Même si l'élévation de température est plus rapide dans les premières minutes, le niveau thermique reste en dessous de celui des métaux ayant une meilleure conductivité. Ceci est dû à la conductivité thermique moyen de l'acier galvanisé, qui, bien qu'elle soit supérieure à celle de l'inox, demeure inférieure par rapport à l'aluminium. Cet absorbeur présente un équilibre intéressant entre coût, longévité et performance, cependant il ne brille pas par son efficacité thermique.

IV.2.3 Etude de l'absorbeur bronze de 0,48 mm :

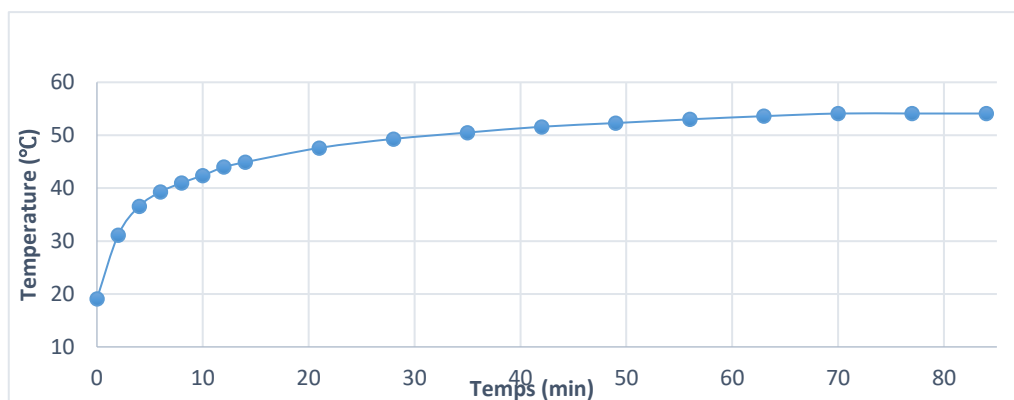


Figure IV.3 : Evolution de la température en fonction du temps (Bronze)

Le graphique du bronze indique une augmentation rapide de la température, passant de 19,1°C à 54,4°C en l'espace de 77 minutes. L'avancement est constant, avec une stabilisation évidente vers la finalisation de l'expérience. Le bronze a une grande conductivité thermique, facilitant une efficace absorption et transmission de chaleur. Ce matériau présente une performance comparable à celle de l'aluminium fin, ce qui en fait un choix judicieux pour des

capteurs solaires efficaces, même s'il est généralement plus cher et plus lourd. Son ascension thermique constante illustre sa faculté à convertir efficacement la radiation solaire en chaleur.

IV.2.4 Etude de l'absorbeur de l'aluminium de 0,76 mm :

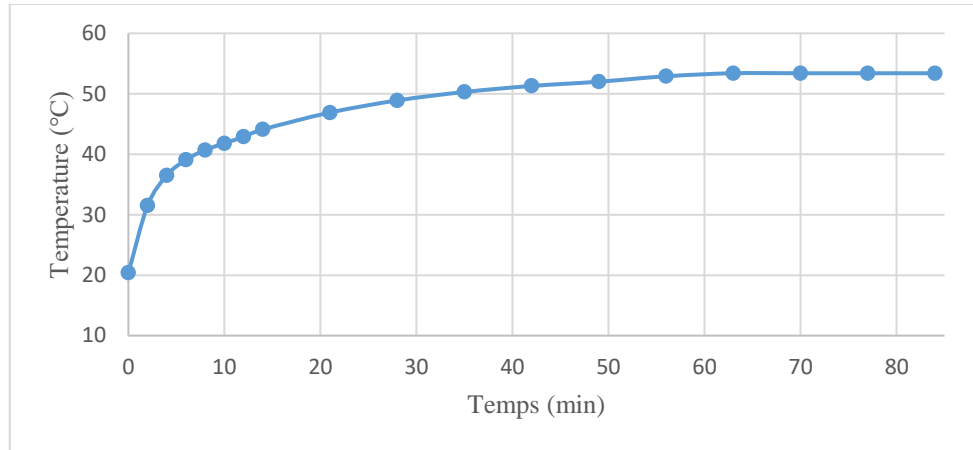


Figure IV.4 : Evolution de la température en fonction du temps (alu 1)

Le graphe de l'absorbeur en aluminium de 0,76 mm indique une augmentation progressive de la température, allant de 20,4 °C à 53,4 °C en 63 minutes, avant d'atteindre la stabilisation. Cette courbe illustre une aptitude efficace de l'absorbeur à recueillir l'énergie solaire de manière graduelle et constante. La bonne efficacité de transfert thermique est illustrée par la stabilisation thermique réalisée dans un laps de temps raisonnable, bien que l'épaisseur du matériau entraîne une inertie légèrement supérieure.

IV.2.5 Etude de l'absorbeur aluminium de 0,2 mm :

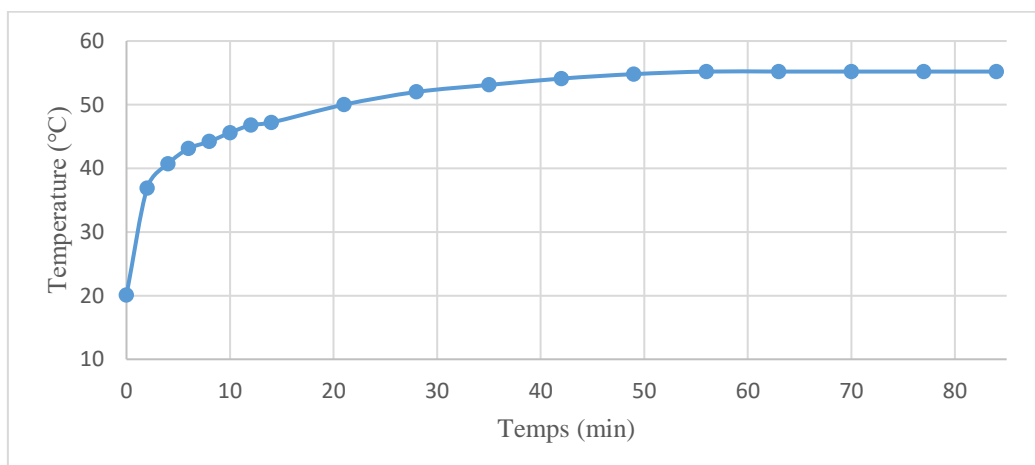


Figure IV.5 : Evolution de la température en fonction du temps (alu 2)

Ce dernier graphe représente l'absorbeur le plus performant. Il indique une augmentation de température de 20,1 °C à 55,2 °C dès la 56e minute, avec une température complètement stable jusqu'à la stagnation de l'expérience. L'aluminium, étant un très bon conducteur de

chaleur et possédant une épaisseur très légère, favorise une absorption et une dissipation thermique extrêmement rapide. C'est l'absorbeur qui, en un temps record, atteint la température la plus haute tout en présentant une excellente stabilité. Cette performance atteste que l'amélioration de la matière et de l'épaisseur est essentielle pour optimiser l'efficacité d'un capteur solaire plan.

IV.3 Comparaison des Performances par Phase Thermique :

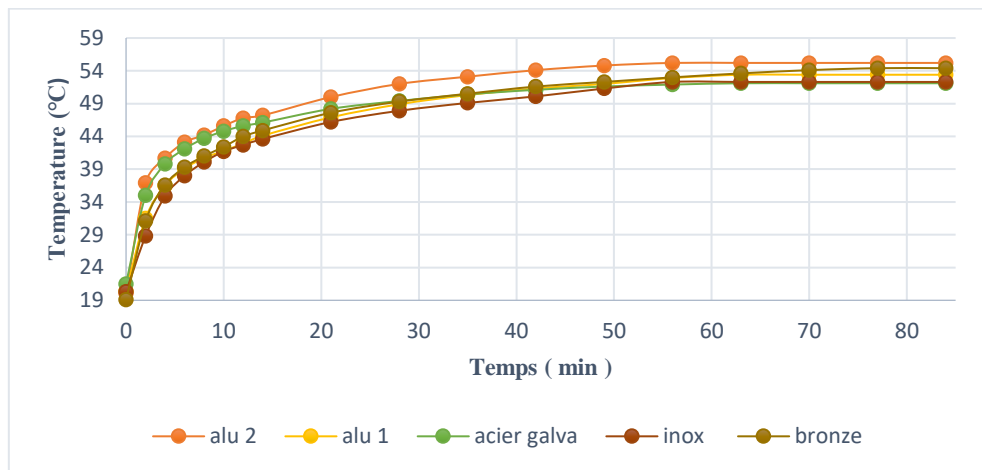


Figure IV.6 : Evolution de la température en fonction du temps pour les cinq absorbeurs testés.

Le graphe illustre l'évolution de la température au cours du temps pour les cinq absorbeurs examinés. Cette évolution se découpe en trois phases distinctes, facilement repérables sur les graphiques : phase initiale, phase intermédiaire et phase de stabilisation. Chaque phase révèle des caractéristiques thermiques propres aux matériaux, liées à leur composition, leur épaisseur et leur pouvoir de conduction thermique.

IV.3.1 Phase de lancement (0 à ~2 minutes) :

Tous les absorbeurs débutent l'expérience à une température ambiante avoisinant les 20 °C. Au cours des premières minutes, une inclinaison marquée est visible sur toutes les courbes, signalant une absorption accélérée de l'énergie solaire. Cette augmentation brusque est attribuée à l'inertie thermique initiale minimale, puisque les matériaux demeurent froids et absorbent rapidement le flux incident. L'aluminium de 0,2 mm se démarque immédiatement par une inclinaison plus abrupte, mettant en évidence son aptitude remarquable à réagir instantanément aux radiations, du fait de son épaisseur minimale et de sa conductivité supérieure. En revanche, les aciers (inoxydable et galvanisé) manifestent une réaction plus

lente, indiquant une conductivité thermique inférieure dès le début. Voici un tableau qui synthétise toute cette étape :

Absorbeur	Température initiale (°C)	Température à 2min (°C)	ΔT rapide en 2 min
Aluminium 0,2 mm	20,1	36,9	+16,8
Bronze 0,48 mm	19,1	31,1	+12,0
Aluminium 0,76 mm	20,4	31,5	+11,1
Inox 0,7 mm	20,3	28,8	+8,5
Galvanisé 0,55 mm	21,5	35	+13,5

Tableau IV.1 : Températures initiales et variation rapide durant la phase de lancement

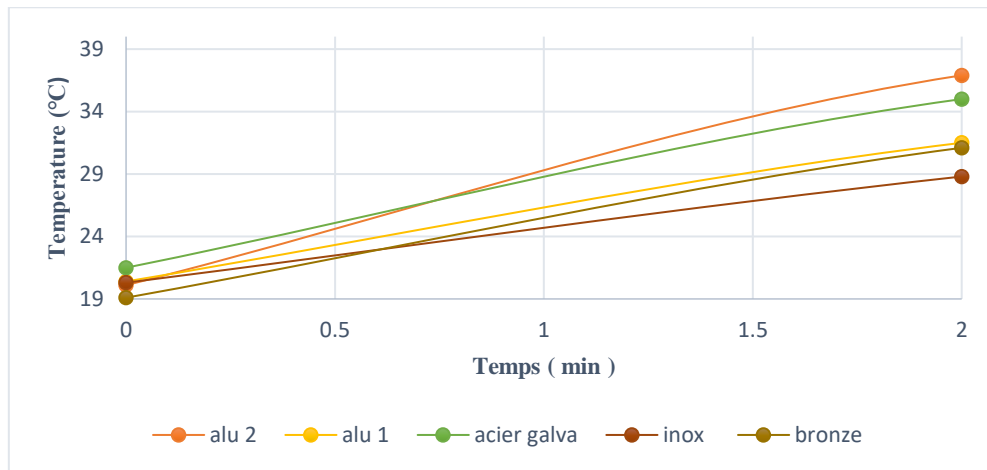


Figure IV.7 : Phase de lancement de la température des absorbeurs

Ce graphique montre une montée rapide de la température dès les premières minutes :

- L'aluminium de 0,2 mm se caractérise par la pente la plus abrupte.
- Le suivi du galvanisé de 0,55 mm est surprenamment bon, mais cela ne pourra pas durer.
- D'autres substances comme l'acier inoxydable se chauffent plus lentement en raison de leur inertie thermique.

IV.3.2 Phase transitoire (de ~2 à ~40 minutes) :

Au cours de cette étape, on observe une croissance régulière de la température des absorbeurs, bien que moins rapide. Cette partie du graphique illustre le mieux les variations de performances. Effectivement, l'aluminium de 0,2 mm montre une progression constante vers les 55 °C, suivi de près par le bronze de 0,48 mm et l'aluminium de 0,76 mm qui présentent

aussi une bonne dynamique thermique. En ce qui concerne l'acier inoxydable et l'acier galvanisé, leur montée semble plus graduelle avec des températures qui demeurent en dessous des autres courbes. Cela souligne leur capacité limitée à transférer rapidement la chaleur à travers le matériau. La différence en matière de performances thermiques devient alors évidente. Voici le tableau correspondant à cette étape.

Absorbeur	Température à 2 min (°C)	Température à 40 min (°C)	ΔT transitoire
Aluminium 0,2 mm	36,9	~54	+17,1
Bronze 0,48 mm	31,1	~51	+19,9
Aluminium 0,76 mm	31,5	~51	+19,5
Inox 0,7 mm	28,8	~50	+21,2
Galvanisé 0,55 mm	35	~51	+16,0

Tableau IV.2 : Évolution thermique en phase transitoire

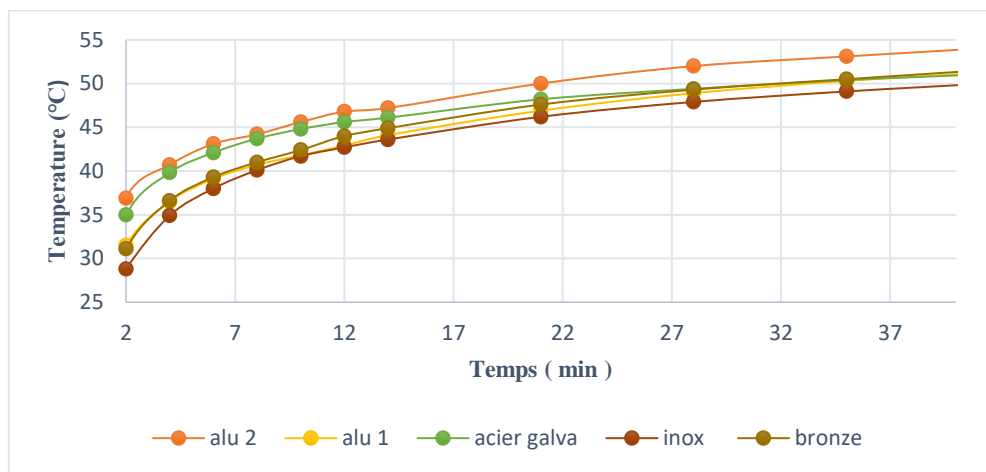


Figure IV.8 : Phase transitoire la montée en température et différenciation progressive des performances des absorbeurs.

C'est à ce point que les écarts de performance commencent à se manifester :

- L'aluminium de 0,2 mm conserve constamment un atout.
- L'augmentation du bronze de 0,48 mm et de l'aluminium de 0,76 mm est constante.
- L'acier inoxydable et le galvanisé affichent une montée plus douce, présentant des graphes plus étalés.

IV.3.3 Phase de stagnation (après ~50 minutes) :

À partir d'environ 50 minutes, toutes les courbes ont tendance à se stabiliser, ce qui révèle que les absorbeurs ont atteint un équilibre thermique. Chaque absorbeur possède une

température limite qu'il atteint, après celle-ci ne change plus, même en cas d'exposition prolongée au rayonnement. Par conséquent, l'absorbeur de 0,2 mm en aluminium atteint et conserve la température maximale la plus élevée, validant ainsi l'hypothèse concernant l'aluminium. Le bronze et l'aluminium à 0,76 présentent également des sommets assez élevés et constants, même s'ils sont inférieurs. En revanche, l'acier inoxydable et le galvanisé atteignent juste en dessous, autour de 52 °C. Ce constat est en accord avec l'hypothèse selon laquelle ils réagiraient de manière modérée aux variations de rayonnement, ce qui indique une conservation modérée de la chaleur. Il est légitime de noter que tous les absorbeurs présentent ce point, bien que leur température équilibrée varie pour les deux. Voici un résumé de cette période de stagnation sous forme de tableau :

Absorbeur	Température max (°C)	Temps stabilisation (min)
Aluminium 0,2 mm	55,2	56
Bronze 0,48 mm	54,4	77
Aluminium 0,76 mm	53,4	63
Inox 0,7 mm	52,3	56
Galvanisé 0,55 mm	52,1	63

Tableau IV.3 : Températures de stagnation des absorbeurs

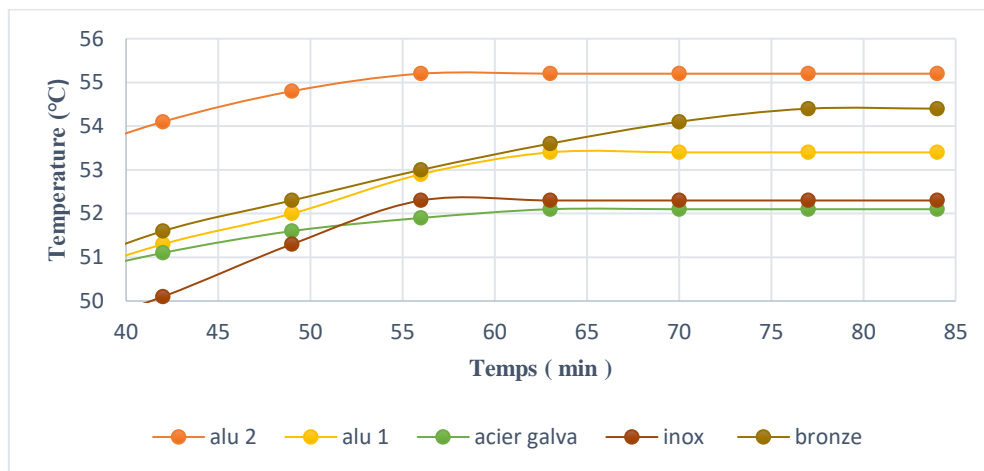


Figure IV.9 : Phase de stagnation thermique des absorbeurs en fin d'exposition

Les courbes commencent lentement à se stabiliser vers leur température maximale :

- L'aluminium de 0,2 mm parvient à obtenir et à conserver la température de plateau la plus haute (~55,2 °C).
- Les niveaux du bronze et de l'aluminium de 0,76 mm ne dépassent pas des valeurs légèrement inférieures.

- Les aciers (inoxydable et galvanisé) conservent leur stabilité à des températures plus basses ($\sim 52,1-52,3$ °C), ce qui atteste de leur aptitude.

IV.4 Comparaisons Directes entre Matériaux

IV.4.1 Comparaison entre Galvanisé (0.55 mm) vs Bronze (0.48 mm) :

a) Phase de lancement :

- **Galvanisé** : Température qui s'élève progressivement (20-30 °C en 10 minutes) grâce à une conductivité thermique moyenne.
La chaleur est en partie captée à la surface, puis se diffuse graduellement vers le centre du matériau conformément à la loi de Fourier.
- **Bronze** : Réaction thermique rapide (atteint 40–50 °C en 10 minutes) dû à sa conductivité qui est 2,2 fois plus grande que celle de l'acier galvanisé.
La chaleur se diffuse de manière efficace, diminuant les temps d'activation.

b) Phase transitoire :

- **Galvanisé** : Atteint des températures adéquates, mais présente une certaine inertie en réponse aux fluctuations. La limitation de la conduction thermique devient un élément défavorable.
- **Bronze** : Conserve une excellente dynamique thermique. Le matériau assure une distribution uniforme de la chaleur, garantissant ainsi des performances constantes.

c) Phase de stagnation :

- **Galvanisé** : Se fixe à une température respectable, bien que plus basse que celle du bronze. Les pertes thermiques sont plus marquées.
- **Bronze** : Garde une température élevée grâce à ses excellentes capacités de conduction et à sa capacité thermique appropriée. Le bronze est toujours plus efficace que l'acier galvanisé en matière de performance thermique, du fait de sa conductivité supérieure et de sa faculté à conserver une température constante. Toutefois, l'utilisation de l'acier galvanisé est toujours pertinente pour des applications qui requièrent une résistance à la corrosion ou qui sont économiques.

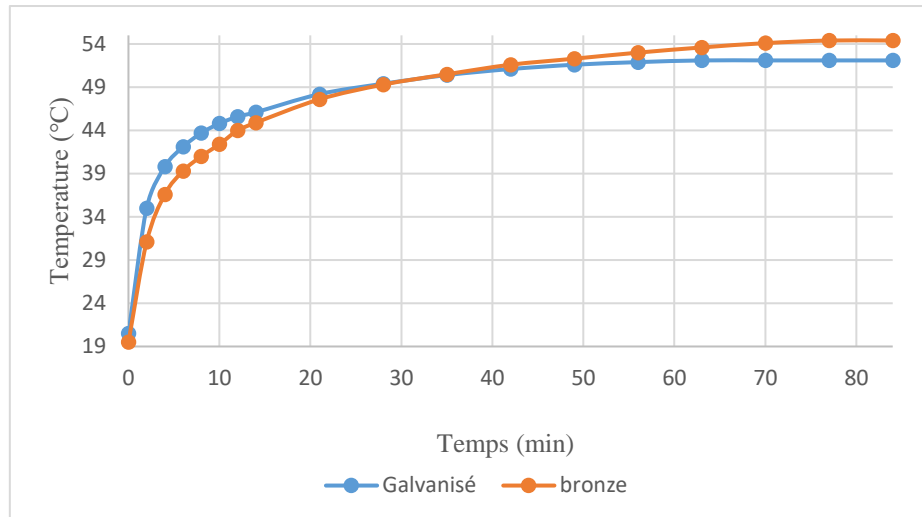


Figure IV.10 : Comparaison entre l'acier galvanisé et bronze

IV.4.2 Comparaison entre Inox (0.7 mm) vs aluminium1 (0.76 mm) :

a) Phase de lancement :

- **Inox** : lente augmentation de la température (10–15 °C en 5 min) due à sa faible conductivité thermique. La chaleur reste localisée à la surface, avec une diffusion interne limitée.
- **Alu1** : Avec une conductivité thermique élevée (~200 W/m·K), il capte et dissipe rapidement la chaleur. Grâce à sa minceur relative (0,76 mm), il se chauffe rapidement.

b) Phase transitoire :

- **Inox** : Progrès graduel vers des températures modérées. Grâce à sa capacité thermique et son épaisseur, il a une inertie thermique notable qui lui permet d'accumuler de la chaleur. Cependant, cette dernière se disperse difficilement.
- **Alu1** : il maintient une température constante et élevée
Efficacité énergétique élevée : plus de 80 % de l'énergie absorbée est transformée en chaleur bénéfique.

c) Phase de stagnation :

- **Inox** : Se stabilise à une température nettement inférieure à Alu1. Ses performances maximales sont limitées par ses caractéristiques intrinsèques.
- **Alu1** : Conserve un niveau de chaleur élevé, témoignant de son avantage pour les usages qui requièrent une chaleur constante grâce à sa conductivité thermique élevée et à sa réactivité

- L'Aluminium 1 surpasse l'Inox en tant qu'absorbeur de chaleur. Toutefois, l'Inox demeure pertinent lorsque la résistance chimique ou la solidité mécanique sont prioritaires.

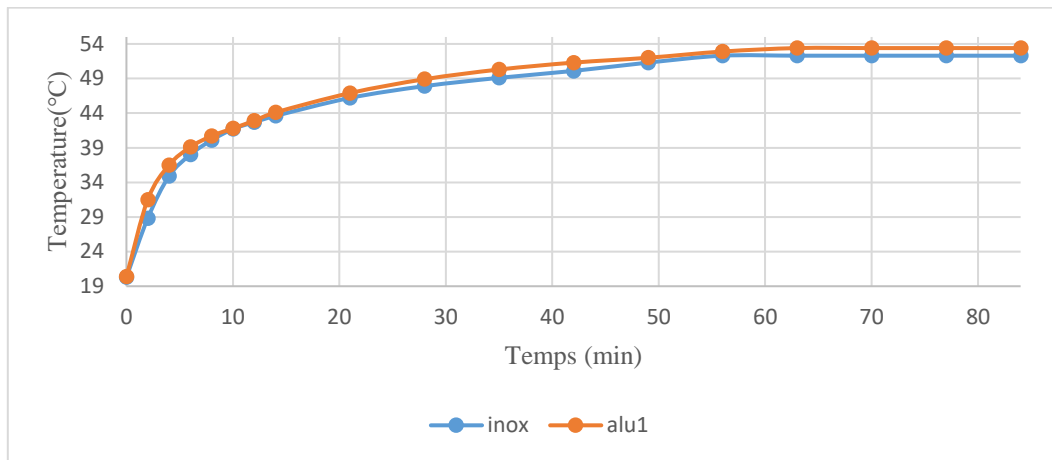


Figure IV.11 : Comparaison entre l'inox et aluminium 1

IV.4.3 Comparaison entre Bronze (0.48 mm) vs aluminium2 (0.2 mm)

a) Phase de lancement :

- **Alu2** : Étant donné son épaisseur minimale (0,2 mm) et sa haute conductivité, il monte à 60-70 °C en moins de 30 secondes, ce qui le rend parfait pour les usages qui demandent une réaction instantanée.
- **Bronze** : Bien que sa conductivité soit inférieure, son importante capacité thermique freine la rapidité de l'élévation

Réaction plus graduelle mais constante adaptée aux systèmes évitant les pics thermiques brusques.

b) Phase transitoire :

- **Alu2** : Commence à révéler ses limites face à de fortes variations de température. L'inertie extrêmement basse se transforme en un désavantage.
- **Bronze** : Poursuit la fourniture de performances constantes et prévisibles. La chaleur est distribuée de façon uniforme.

c) Phase de stagnation :

- **Alu2** : Perds rapidement ses bénéfices initiaux, Il y a une baisse notable de la température.

- **Bronze** : Retient 70 à 80 % de sa chaleur pendant 30 minutes. La densité et la capacité thermique de ce matériau réduisent les pertes.
Performances idéales pour les applications continues (par exemple : échangeurs de chaleur, plaques de cuisson).

L'Aluminium 2, bien qu'extrêmement réactif, est instable sur les cycles longs en raison de son manque d'inertie. Le Bronze, par sa masse thermique et sa capacité à conserver la chaleur, assure une régulation thermique équilibrée, parfaite pour des processus durables. La décision finale sera basée sur la priorité :

- Réaction immédiate → Alu2.
- Durabilité et stabilité → Bronze.

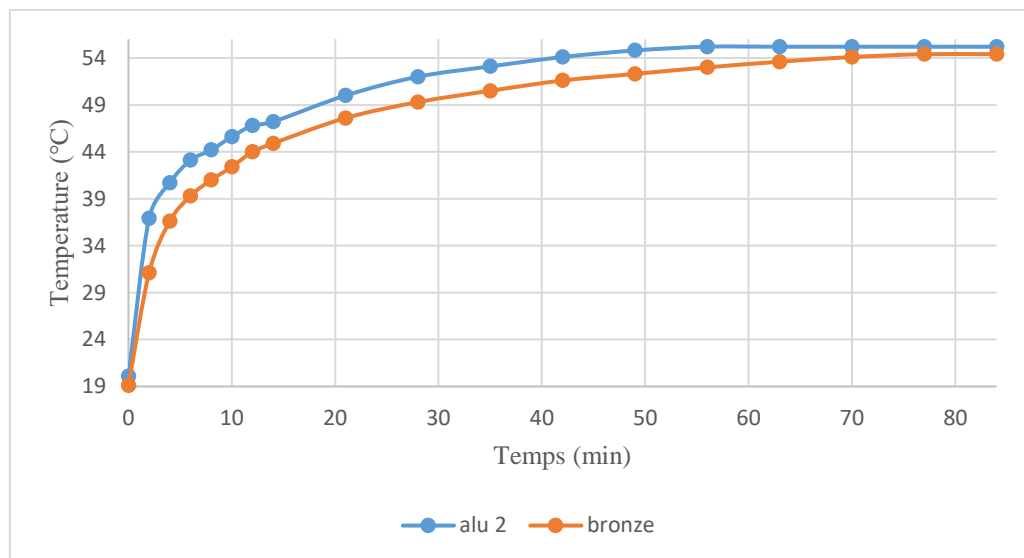


Figure IV.12 : Comparaison entre bronze et aluminium 2

IV.4.4 Comparaison entre aluminium (0.76 mm) vs aluminium2 (0.2 mm)

a) Phase de lancement :

- **Alu2** : Doté d'une minceur de 0,2 mm, sa capacité thermique est extrêmement limitée. L'élévation de sa température nécessite une chaleur minimale, ce qui permet un réchauffement presque immédiat. Toutefois, cette capacité de réaction est restreinte par le volume de stockage : l'énergie accumulée est faible.
- **Alu1** : Son épaisseur (0,76 mm) signifie qu'il faut chauffer une masse 3,8 fois plus importante que l'Alu2 (à superficie équivalente). L'élévation de la température est donc initialement plus progressive (temps de 2 à 5 secondes). Cependant, du fait de sa plus grande inertie thermique, il surpasse rapidement Alu2 en température après la phase initiale, étant donné qu'il rassemble plus d'énergie.

b) Phase transitoire :

- **Alu2** : A atteint un sommet thermique en quelques secondes, mais a été soumis à des fluctuations violentes (variation de $\pm 10-20\%$). Sa légèreté le rend vulnérable aux pertes par convection (loi de Newton) et rayonnement (loi de Stefan-Boltzmann). Il est souvent soumis à des cycles de chauffage et de refroidissement, ce qui limite sa stabilité.
- **Alu1** : Assure une courbe de température lissée par son inertie. Les fluctuations externes (par exemple : perturbations dans le flux d'air) sont réduites. Continue à emmagasiner de la chaleur même en mode dynamique, tout en affichant une efficacité énergétique accrue.

c) Phase de stagnation :

- **Alu2** : Refroidissement rapide (baisse de 30 à 50 % en 10 à 30 secondes). La masse réduite favorise les pertes de chaleur ainsi que le coefficient de convection. Inapproprié pour les applications qui requièrent une conservation prolongée de la chaleur.
- **Alu1** : Retient 60–80 % de sa chaleur pendant 1 à 2 minutes. Sa dimension sert «barrière » contre les pertes, prolongant l'effet bénéfique et parfaitement adapté aux processus où la stabilité thermique est primordiale.

Le choix entre Alu1 et Alu2 repose sur le compromis entre la réactivité et la stabilité. Alu2 brille dans les applications qui requièrent une réaction ultra-rapide, mais présente des faiblesses en matière de durabilité. Alu1, étant plus volumineux, fournit une gestion thermique solide, parfaite pour les processus de longue durée ou cycliques.

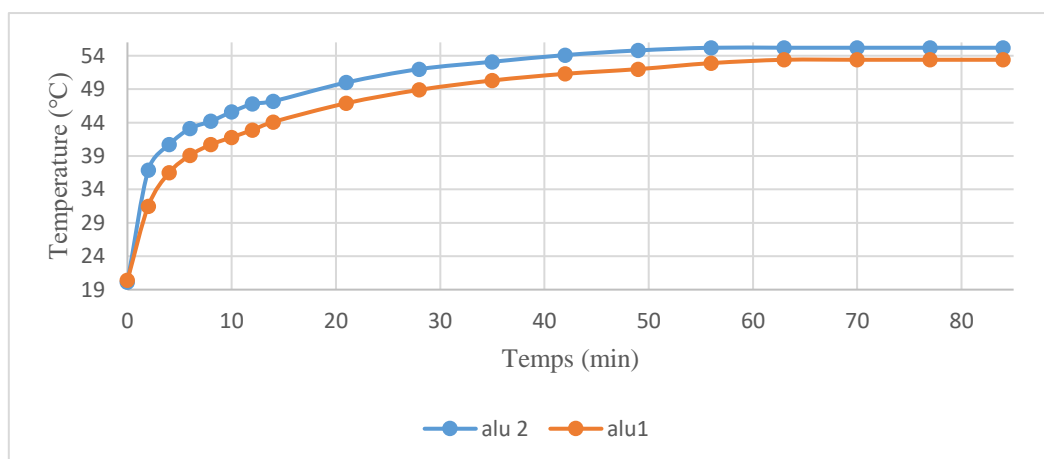


Figure IV.13 : comparaison entre aluminium 1 et aluminium 2

IV.5 Interprétation global

a) Meilleur matériau : Aluminium 1

- Conductivité thermique optimale pour une performance énergétique maximale.
- Léger et facile à intégrer dans la structure du capteur.
- Le recours à un revêtement protecteur règle le problème de l'oxydation.
- Utilisations : absorbeurs, plaques pour le transfert de chaleur.

b) Alternative avancée : Bronze

- Un équilibre optimal entre la conductivité, l'inertie thermique et la durabilité.
- Aucune manipulation supplémentaire n'est nécessaire pour améliorer la résistance aux conditions humides ou salines.
- Usage : Détecteurs dans les régions côtières ou industrielles

c) Alternative réactive et légère : Aluminium 2

- Réactivité maximale due à son épaisseur minimale (0,2 mm).
- Une conductivité thermique élevée (~ 237 W/m·K) est optimale pour les courtes périodes de forte insolation.
- Économique et extrêmement léger.

Inconvénients :

- Moindre inertie thermique \rightarrow Refroidissement rapide sans stockage additionnel.
- Sensibilité aux déformations mécaniques et à la corrosion sans aucun traitement.
- Utilisations : Capteurs temporaires ou mobiles.

d) Le choix économique : l'acier galvanisé

- Diminuer les dépenses tout en obtenant une résistance à la corrosion acceptable.
- Parfait pour les projets ayant des budgets restreints ou des montages temporaires.
- Utilisations : Des capteurs solaires domestiques dans des conditions non extrêmes.

e) Évitez : l'acier inoxydable (Inox)

- La faible conductivité thermique réduit considérablement l'efficacité, Cela ne se justifie que si la résistance mécanique est primordiale.

IV.6 Conclusion :

L'analyse expérimentale a mis en évidence des différences significatives entre les absorbeurs testés, qui sont principalement liées à leurs propriétés thermo physiques. L'aluminium de 0,2 mm se distingue par son absorption rapide et sa température de stagnation

élevée, ce qui en fait le matériau le plus performant dans les applications qui nécessitent une réponse rapide. Bien que légèrement moins réactif, le bronze présente une excellente stabilité thermique, prouvant son adéquation aux systèmes nécessitant une rétention de chaleur pendant de longues périodes. En revanche, l'acier inoxydable et l'acier galvanisé, tout en offrant des avantages en termes de durabilité et de coût, ont des performances thermiques inférieures en raison de leur conductivité thermique plus faible. L'aluminium de 0,76 mm offre un compromis intéressant entre inertie thermique et rendement.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce document a permis de mettre en évidence l'influence des matériaux capteurs sur les performances d'un capteur solaire plan vitré avec des expérimentations adaptées. Le capteur solaire plan vitré, composé d'un matériau absorbant rapporté, a été équipé de cinq matériaux capteurs différents :

Tôles d'aluminium (deux épaisseurs), du bronze de l'inox et de l'acier galvanisé. Ils ont été essayés dans les mêmes conditions d'éclairage, de vitrage et d'isolation. Cette méthode expérimentale a permis de comparer en toute objectivité, et sur les seuls critères thermiques, divers matériaux de capteurs.

Le produit de cinq grandeurs physiques essentielles, la conductivité thermique, la capacité calorifique, l'émissivité et bien sûr les dimensions, peut être identifié comme essentiel afin de prononcer un avis sur la performance de répondant du capteur. L'aluminium montre, de par sa bonne conductibilité thermique, de très bon retours en température. L'épaisseur du matériau a également un rôle important :

Si un matériau de petite épaisseur répond rapidement mais emmagasine moins de chaleur, à l'inverse, un autre de plus grande épaisseur va réagir lentement tout en conservant une plus grande quantité de chaleur. Dans ces matières moins rayonnantes, le bronze a réussi à se mesurer en efficacité aux absorbeurs d'aluminium habituellement employés, à condition qu'il soit de plus grande épaisseur que les absorbeurs utilisés. Les matériaux ici employés, l'acier inoxydable et l'acier galvanisé, sont des absorbeurs négatifs moins performants que les absorbeurs en aluminium. Ils présentent une mauvaise performance énergétique car, par leur conception, ils possèdent une conductivité thermique faible et transmettent plus de chaleur depuis le capteur. Ceci est dû au fait que ces matériaux absorbants ne sont pas de bons capteurs solaires en eux-mêmes, c'est-à-dire qu'ils reflètent très efficacement la lumière solaire. Cependant, bien que l'inox et l'acier galvanisé puissent être intéressants en raison de leur coût et de leur durabilité, il arrive qu'ils soient peu efficaces en tant qu'absorbants, car ils protègent les vitrages contre la surchauffe et le risque de casse dû au choc thermique.

Finalement, cette étude démontre que le choix du matériau pour le panneau a une grande incidence sur sa performance. Il ne suffit pas simplement de couvrir le panneau de peinture noire mate ; la dynamique interne du matériau influence la vitesse de chauffe (ou d'absorption), sa température maximale et sa faculté à retenir la chaleur. Cette étude vise à souligner l'importance de sélectionner minutieusement les matériaux en tenant compte de l'application prévue, du budget et des performances désirées.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] E. Bellos and C. Tzivanidis, “A review of concentrating solar thermal collectors with and without nanofluids,” *J. Therm. Anal. Calorim.*, vol. 135, no. 1, pp. 763–786, 2019.
- [2] J.-L. Bal and B. Chabot, “Les énergies renouvelables. État de l’art et perspectives de développement,” *C. R. Acad. Sci. - Ser. IIA - Earth Planet. Sci.*, vol. 333, no. 12, pp. 827–834, 2001.
- [3] S. A. Kalogirou, “Solar thermal collectors and applications,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 30, no. 3, pp. 231–295, 2004.
- [4] W. M. Rohsenow, J. P. Hartnett, and Y. I. Cho, Eds., **Handbook of Heat Transfer**, 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 1998.
- [5] Timetoast, “Étapes de la découverte des rayons thermiques,” Disponible: <https://www.timetoast.com/timelines/etapes-de-la-decouverte-des-rayons-thermique>.
- [6] A.-S. Benichou, “Fonctionnement des panneaux solaires thermiques,” **Isolations.fr**, 19 oct. 2023. Disponible: <https://www.isolations.fr/panneau-solaire/panneau-solaire-thermique/fonctionnement/>
- [7] Guidenr, “Différents types de capteurs solaires thermiques,” [En ligne]. Disponible: http://www.solairethermique.guidenr.fr/I_différent-type-capteur-solaire-thermique.php
- [8] A. Cheham and S. El Magbed, **Commande robuste d’un concentrateur solaire cylindro-parabolique**, Mémoire de Master, Univ. Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2018.
- [9] M. A. Alghoul et al., “Review of materials for solar thermal collectors,” **Anti-Corros. Methods Mater.**, vol. 52, no. 4, pp. 199–206, 2005.
- [10] Fujisol France, “Collecteurs solaires,” [En ligne]. Disponible: <https://fujisol.fr/collecteurs-solaires/>
- [11] L. Evangelisti, R. D. L. Vollaro, and F. Asdrubali, “Latest advances on solar thermal collectors: A comprehensive review,” **Renew. Sustain. Energy Rev.**, vol. 114, p. 109318, 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.109318.
- [12] Hbn S'hra, “Capteur plan vitré,” [En ligne]. Disponible: <https://fr.scribd.com/document/470445128/Capteur-plan-vitre>
- [13] L. Abdelkader, “Contribution à la simulation des charges thermiques dans un habitat à plancher chauffant,” Mémoire ou thèse, 2021. doi: 10.13140/RG.2.2.34496.61445.
- [14] SukaJanda, “Chapitre 3: Capteurs solaires thermiques plans,” **FOAD UADB**, 2015. Disponible: <http://www.foad.uadb.edu.sn/mod/book/tool/print/index.php?id=2429#ch14>
- [15] D. Taloub, A. Djegham, A. Bouras, and Z. Driss, “Amélioration des performances thermiques d’un convertisseur solaire plan à eau: étude numérique,” 2021.

Références Bibliographiques

- [16] S. Saadi, *Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan*, Mémoire de Magistère, Univ. Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [17] Espace Aubade, "Fluide caloporteur solaire: comment bien le choisir?", 22 nov. 2023. Disponible: <https://www.espace-aubade.fr/blog/energie-renouvelables/tout-savoir-sur-le-fluide-calporteur-solaire.html>
- [18] H. Abdi, *Contribution à la détermination des performances de capteurs plans à contact direct eau-plaque d'absorption*, Mémoire de Magister, Univ. de Blida, Algérie, 1999.
- [19] A. Kocer, I. Yaka, G. Sardogan, and A. Gungor, "Effects of tilt angle on flat-plate solar thermal collector systems," *Br. J. Appl. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 1, pp. 77–85, Jan. 2015, doi: 10.9734/BJAST/2015/17576.
- [20] Dualsun, "Inclinaison orientation panneau solaire: votre toit est-il compatible?", *Dualsun Guides – Installation & Entretien*, Disponible: <https://dualsun.com/guides/installation-entretien/inclinaison-orientation-panneau-solaire/>
- [21] G. N. Tiwari, *Solar Energy: Fundamentals, Design, Modelling and Applications*. CRC Press, 2002.
- [22] H. C. Hottel and A. Whillier, "Evaluation of flat-plate solar collector performance," *Trans. Conf. Use Sol. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 74–104, 1958.
- [23] R. W. Bliss, "The derivations of several plate-efficiency factors useful in the design of flat-plate solar heat collectors," *Sol. Energy*, vol. 3, no. 4, pp. 55–64, 1959.
- [24] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. Wiley, 2017.
- [25] M2E-MarcSeguin, "Rendement des capteurs thermiques," NouvÉnergie – e-formation solaire. Disponible: <https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/rendement-capteurs/>
- [26] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Wiley, 2013.
- [27] F. Kreith and D. Y. Goswami, *Handbook of Energy Efficiency and Renewable Energy*. CRC Press, 2007.
- [28] "Panneau Composite Aluminium Brossé 2 mm – 30 × 140 cm," *Cdiscount*, produit vendu par E-FORUM. Disponible: <https://www.cdiscount.com/bricolage/revetement-mural/panneau-composite-aluminium-brosse-2-mm30-x-140-cm/f-1661701-sig3666765000425.html>
- [29] Freepik, "Fond: plaque métal bronze brillant,". Disponible: https://fr.freepik.com/photos-premium/fond-plaque-metal-bronze-brillant_19085661.htm

Références Bibliographiques

[30] Ma Pièce Sur Mesure, “Plaque en inox sur mesure,” Disponible: <https://www.ma-piece-sur-mesure.com/plaque-inox-sur-mesure/>

[31] “Tôle acier galvanisé lisse Ép. 0,5 mm, 100 × 50 cm,” *Castorama*. [En ligne]. Disponible: https://www.castorama.fr/tole-acier-galvanise-lisse-ep-0-5-mm-100-x-50-cm/3232630221457_CAFR.prd

Annexe

Annexe

```
% Données
E = 400; % W/m² (hypothèse que l'éclairement reste 400 malgré la distance de 20 cm)
L_vitre = 0.115;
l_vitre = 0.105;
S_vitrage = L_vitre * l_vitre;
Q_entrant = E * S_vitrage;

% Température ambiante
T_amb = 20 + 273.15; % K

% Absorbeur
L_abs = 0.102;
l_abs = 0.102;
S_absorbeur = L_abs * l_abs;
epsilon = 0.95;
sigma = 5.67e-8;
h = 5;
```

```
% Parois de la boîte
k = 0.005; % conductivité thermique mise à jour
e = 0.016; % épaisseur en m
S_parois = 5 * 0.14 * 0.14; % surface totale parois (5 faces)

% Fonction pertes thermiques totales
pertes_total = @(T_eq) ...
    epsilon * sigma * S_absorbeur * (T_eq.^4 - T_amb.^4) + ... % rayonnement
    h * S_absorbeur * (T_eq - T_amb) + ... % convection
    (k * S_parois / e) * (T_eq - T_amb); % conduction

% Equation d'équilibre : pertes = Q_entrant
equilibre = @(T_eq) pertes_total(T_eq) - Q_entrant;

% Résolution numérique
T_guess = T_amb + 30; % estimation initiale (K)
T_eq = fzero(equilibre, T_guess);
T_eq_C = T_eq - 273.15;
```

```
% Résultats pertes
q_r = epsilon * sigma * S_absorbeur * (T_eq.^4 - T_amb.^4);
q_c = h * S_absorbeur * (T_eq - T_amb);
q_k = (k * S_parois / e) * (T_eq - T_amb);
q_total = pertes_total(T_eq);

% Affichage résultats
fprintf('Température d'équilibre : %.2f °C\n', T_eq_C);
fprintf('Q entrant : %.2f W\n', Q_entrant);
fprintf('Pertes par rayonnement : %.2f W\n', q_r);
fprintf('Pertes par convection : %.2f W\n', q_c);
fprintf('Pertes par conduction : %.2f W\n', q_k);
fprintf('Pertes totales : %.2f W\n', q_total);
```