

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Thème

Étude comparative des réchauffeurs d'air solaires à plaques avec et
sans nervures (rugosité artificielle)

Devant le jury composé de:

Présenté par :

Président

- BELDJANI Hicham

Examineur

- BELHADI Brahim

Dr. Ali BOUKHARI

Encadreur

2024/2025

Dédicaces

À celui qui possède une biographie riche et une pensée éclairée.

Il a été le premier à m'aider à faire des études supérieures.

(Mon père bien-aimé), que Dieu lui accorde une vie éternelle.

*À celui qui m'a mis sur le chemin de la vie et m'a rendu fort. Et qui
a pris soin de moi jusqu'à l'âge adulte.*

(Ma chère mère), que Dieu lui accorde une vie éternelle.

*À mes frères et sœurs, qui m'ont aidé à surmonter de nombreux
obstacles et difficultés.*

À tous mes honorables professeurs qui n'ont pas hésité à m'aider.

Je vous dédie mes recherches à l'adresse suivante :

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions ALLAH (SWT) qui nous a aidé à mener à bien ce travail.

Un message qui a éclairé notre chemin et notre réussite dans notre mission scientifique.

Nous remercions les parents qui nous ont généreusement encouragés à rédiger ce mémoire.

Nous remercions également les professeurs enseignants pour leurs efforts. Et qui nous ont aidé à préparer ce mémoire, car ils nous ont fourni tout ce qui était cohérent avec nos recherches.

Nous remercions tous les professeurs et employés de l'Université de Hama Lakhdar pour leur contribution à l'éducation dans notre pays.

Et en particulier le département de génie mécanique. Le chef du département et tous les enseignants.

N'oublions pas nos sincères remerciements à tous les collègues de la faculté de technologie.

Résumé :

Dans ce travail, nous avons mené une étude expérimentale visant à comparer un capteur solaire à air à plaque plane conçu pour le séchage des produits agricoles à l'énergie solaire. Le système a été installé dans la région d'Oued Souf (Sud-Est de l'Algérie), où l'énergie thermique solaire peut être exploitée de manière efficace. Le capteur à l'étude a été testé dans un nombre limité de configurations, notamment avec ou sans obstacles, ainsi qu'avec des obstacles perforés ou inclinés disposés soit en position parallèle, soit en zigzag. Ces modifications avaient pour but d'améliorer le transfert de chaleur vers les canaux de fonctionnement, et les résultats expérimentaux ont confirmé nos attentes.

Mots-clés : Obstacle, Séchage solaire, Capteur d'énergie solaire, Fluide caloporteur, Transfert de chaleur.

Abstract:

In this work, we conducted an experimental study comparing a flat-plate solar air collector designed for agricultural product solar drying. The system was installed in the Oued Souf region (southeastern Algeria), where the high solar thermal energy potential can be efficiently harnessed. The studied collector was tested under a finite number of configurations, including with and without baffles, as well as twisted or inclined baffles arranged either in parallel or staggered positions. These modifications aimed to enhance heat transfer to the working fluid. The experimental results met our expectations.

Keywords: Obstacle, Solar drying, Solar energy collector, Heat transfer fluid, Heat transfer.

ملخص:

في هذا العمل، أجرينا دراسة تجريبية لمقارنة مجمع هواء شمسي ذي لوحة مسطحة مصمم لتجفيف المنتجات الزراعية بالطاقة الشمسية. رُكب النظام في منطقة وادي سوف (جنوب شرق الجزائر)، حيث يمكن استغلال الطاقة الحرارية الشمسية الكامنة بكفاءة. اختُبر المجمع قيد الدراسة في عدد محدود من التكوينات، بما في ذلك مع حواجز وبدونها، بالإضافة إلى حواجز مثقوبة أو مائلة مرتبة إما في أوضاع متوازية أو متعرجة. هدفت هذه التعديلات إلى تحسين نقل الحرارة إلى مسالك التشغيل، وقد لبّت النتائج التجريبية توقعاتنا.

الكلمات المفتاحية: حاجز، التجفيف الشمسي، جامع الطاقة الشمسية، سائل نقل الحرارة، نقل الحرارة.



Table des matières

Table des matières

Dédicaces.....	ii
Remerciements	iii
Table des matières	i
Liste des figures.....	iv
Notations et abréviations	vi
Introduction générale	1
I. Chapitre I: Généralités sur les capteurs solaires.....	4
I.1 Introduction	4
I.2 Gisement solaire	4
I.2.1 Energie solaire photovoltaïque.....	4
I.2.2 Energie solaire thermique.....	4
I.2.3 Irradiation solaire	4
I.3 Classification des capteurs solaires	5
I.3.1 Capteurs à concentration	5
I.3.2 Capteurs hybrides et émergents:	12
I.3.3 Collecteurs non concentrant	15
I.4 Techniques d'amélioration des performances des capteurs solaires.....	18
I.4.1 Modifications de surface (Améliorer l'absorption et réduire les pertes de chaleur).....	18
I.4.2 Amélioration du transfert thermique	18
I.3.1 Isolation et vitrage(réduire les pertes de chaleur).....	19
I.4.3 Systèmes de suivi	20
I.3.2 Intégration au stockage d'énergie	20
I.5 Conclusion.....	21

II. Chapitre II Modélisation mathématique	22
II.1 Introduction.....	22
II.2 Equation d'énergie.....	22
L'équation de l'énergie, dérivée de la thermodynamique, est exprimée sous la forme suivante.....	22
II.3 Bilan de conservation de l'énergie	23
II.3.1 Produit efficace transmission-absorption de l'absorbeur	24
II.4 Analyse des pertes de chaleur:	25
II.5 Facteur d'évacuation de chaleur du capteur (FR):	28
II.6 Orientation des capteurs solaires:	28
II.7 Rendement du capteur (η)	32
II.8 Conclusion	32
III. Chapitre III: Matériels et méthodes	33
III.1 Introduction	33
III.2 Outils et équipements utilisés	33
III.2.1 Capteur solaire	33
III.2.2 Thermocouples	35
III.2.3 Thermomètre	35
III.2.4 Pyranomètre(solari-mètre).....	36
III.3 Méthodes de mesure	37
III.4 Conclusion	38
IV. Chapitre IV: Résultats et discussion.....	39
IV.1 Introduction	39
IV.2 Première expérience: Chicane placée en séquence	39
IV.2.1 Distribution de la température à l'intérieur du capteur en fonction de la température ambiante:	40
IV.2.2 Quantité d'énergie utile (QU)	41

IV.2.3	Efficacité du capteur solaire (η)	42
IV.3	Deuxième expérience: Chicanes placées en quinconce	43
IV.3.1	Quantité d'énergie utile (QU)	45
IV.3.2	Efficacité des capteurs solaires (η)	46
IV.4	Conclusion.....	47
	Conclusion générale	48
	Références bibliographiques.....	viii



Liste des figures

Liste des figures

Figure II-1:Schéma d'un collecteur parabolique[5].....	7
Figure II-2:Schéma d'un collecteur cylindrique parabolique[6].	8
Figure II-3:Schéma d'une tour solaire ou d'un système de réception central[8].	10
Figure II-4:Types d'absorbeurs de collecteurs paraboliques composés[9]	11
Figure II-5:Réflecteur de Fresnel linéaire[11].....	12
Figure II-6:Schéma d'un capteur hybride PV/T[13].....	13
Figure II-7:Chauffe-eau solaire utilisant trois types de MCP [17]	14
Figure II-8:Schéma du RCM-CSP[18]	15
Figure II-9:Composants d'un capteur plan[20].....	16
Figure II-10:Principaux composants du système de capteurs solaires à tubes sous vide[22]	17
Figure II-11:Bilan de conservation d'énergie d'un capteur solaire CNVT.....	23
Figure II-12:Processus de transmission, d'absorption et de réflexion du rayonnement dans le système transparent de recouvrement-absorption	25
Figure II-13:Composition de la perte de chaleur totale d'un collecteur	26
Figure II-14:Schéma en réseau thermique du capteur solaire	27
Figure V-1: La couverture et l'absorbeur du capteur plan à air.....	33
Figure V-2:Isolation thermique du capteur plan à air	34
Figure V-3: Cadre de capteur plan à air.....	34
Figure V-4: Thermocouple de type k	35
Figure V-5:Thermomètre"Lutron ICBTM-4208SD"	36
Figure V-6: Thermomètre"LUTRON AM- 4206M"	36
Figure V-7:Pyranomètre" PYR1307"	37
Figure V-8:Installation expérimentale	38

Figure IV-1: <i>capteurs solaires pour la première expérience</i>	39
Figure IV-2: <i>Variations de température en fonction du temps</i>	40
Figure IV-3: <i>Variation de la quantité d'énergie utile de capteur</i>	41
Figure IV-4: <i>l'évolution de l'efficacité des trois capteurs solaires (C1, C2, C3) en fonction du temps</i>	42
Figure IV-5: <i>Deuxième configuration expérimentale du système</i>	43

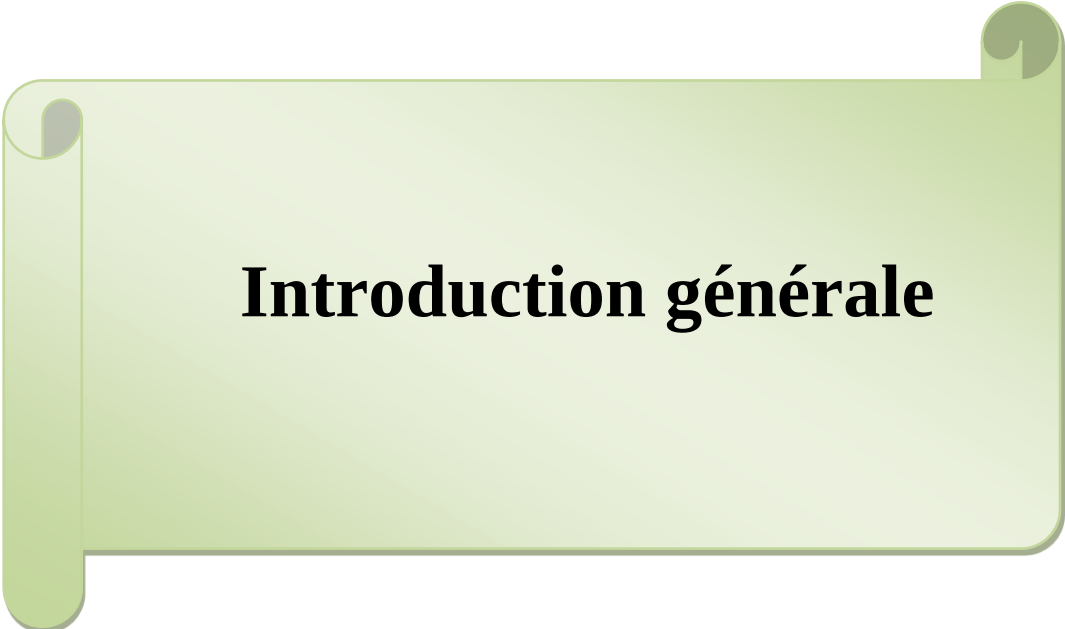


Notations et abréviations

Notations et abréviations

CSP	Capteurs Solaires Paraboliques
FCT	Fluide Caloporteur Thermique
STE	Stockage d'Energie Thermique
CPC	Capteur Parabolique Composé
PV/T	Capteur Photovoltaïque Thermique
PV	Photovoltaïque
MCP	Matériaux à Changement de Phase
CSTV	Capteur Solaire à Tubes Sous Vide
RCM	Réseau de Caloducs à Micro-Canaux
CSP	Capteur Solaire à Plaque Plane
RCM-CSP	Capteur Solaire Plan avec Réseau de Caloducs à Micro-canaux
CNVT	Capteurs Solaires en Céramique Noire Vanadium-Titane
Q_s	Augmentation de l'énergie interne dans le collecteur en énergie par unité de temps (W)
$Q_{l,o}$	Perte optique du collecteur (W)
$Q_{l,h}$	Perte de chaleur totale du capteur (W)
Q_u	Énergie utile produite par le capteur (W)
C_p	Capacité thermique spécifique du fluide (J/kgK)
q_m	Débit massique du fluide (kg/s)
$T_{f,o}$	Température moyenne du fluide (°C)

T_{abs}	Température de l'absorbeur (°C)
T_{abs}^*	Température supposée de l'absorbeur (°C)
T_a	Température ambiante (°C)
S_a	Surface d'ouverture du collecteur (m ²)
S_e	Surface des parois du bord du collecteur
T_f	Température moyenne du fluide (°C)
α	Absorption de l'absorbeur
U_L	Coefficient de perte de chaleur totale du capteur (W/m ² K)
U_t	Coefficient de perte de chaleur du haut du capteur (W/m ² K)
U_b	Coefficient de perte de chaleur du fond du capteur (W/m ² K)
U_e	Coefficient de perte de chaleur des parois périphériques du capteur (W/m ² K)
Q_t	Perte de chaleur par le haut du capteur (W)
Q_b	Perte de chaleur par le bas du capteur (W)
Q_e	Perte de chaleur par les parois du bord du capteur (W)
F_R	Facteur d'évacuation de la chaleur
F'	Facteur d'efficacité
H_b	Rayonnement total du faisceau sur une surface horizontale
H_d	Rayonnement diffus total sur une surface horizontale
R_b	Facteur géométrique,
τ	Transmission du couvercle transparent



Introduction générale

Introduction générale

Dans la quête permanente de l'humanité vers des sources d'énergie durables et efficaces, l'énergie solaire apparaît comme une option stratégique indispensable pour relever les défis environnementaux et économiques actuels. Parmi le large éventail de technologies de récupération d'énergie solaire, les capteurs solaires thermiques occupent une place de choix en raison de leur capacité à convertir le rayonnement solaire en énergie thermique utilisable dans diverses applications, du chauffage de l'eau et du séchage des produits agricoles au chauffage des locaux et à la production d'électricité. Dans ce contexte, les réchauffeurs d'air solaires revêtent une importance particulière, car ils offrent une solution simple et efficace pour les applications de chauffage nécessitant de l'air chaud. Ils n'utilisent pas non plus de fluides caloporteurs susceptibles de geler ou de se corroder, ce qui réduit la complexité du système et les besoins de maintenance.

Ce modeste travail vise à approfondir la compréhension et l'amélioration des performances des réchauffeurs d'air à panneaux solaires, à travers une étude comparative analytique et expérimentale entre les réchauffeurs à ailettes et les réchauffeurs conventionnels sans ailettes. L'idée de base est que l'ajout de nervures à la surface de l'absorbeur peut améliorer la zone d'échange de chaleur entre la surface du collecteur et l'air qui circule, augmentant potentiellement l'efficacité du transfert de chaleur et améliorant les performances globales du collecteur. Cependant, cette amélioration peut s'accompagner d'une augmentation de la résistance aérodynamique, ce qui nécessite une étude minutieuse des effets de ces nervures sur les performances thermodynamiques.

Cette recherche comprend des chapitres interconnectés organisés comme suit:

Chapitre premier: Informations générales sur les capteurs solaires

Ce chapitre fournit un aperçu complet du concept d'énergie solaire et de ses sources, en mettant l'accent sur le rayonnement solaire et la classification des différents capteurs solaires, y compris les capteurs à concentration et non à concentration. Le chapitre aborde également les techniques permettant d'améliorer les performances des capteurs solaires en général, en soulignant celles qui peuvent être pertinentes pour les réchauffeurs d'air solaires, telles que les modifications de la surface de l'absorbeur pour améliorer l'absorption et réduire les pertes, l'amélioration du transfert de chaleur, l'isolation et les systèmes de suivi.

Chapitre deuxième: Modélisation mathématique

Ce chapitre est consacré au développement du cadre théorique et mathématique nécessaire pour décrire le comportement thermique des réchauffeurs d'air à panneaux solaires. Le chapitre présente les équations énergétiques et le bilan de conservation énergétique appliqués à ces complexes. Il se concentre également sur l'analyse des différentes pertes de chaleur du collecteur et détermine le produit de transmission-absorption effectif de l'absorbeur. Le concept de facteur d'élimination de la chaleur du capteur (FR) et d'efficacité du capteur (η) est également introduit, avec les équations adaptées à la spécificité des réchauffeurs d'air solaires et incluant l'effet de nervure potentiel dans les modèles.

Chapitre troisième: Matériel et méthodes

Ce chapitre passe en revue les outils et équipements utilisés dans l'aspect expérimental de l'étude comparative. Cela comprend une description détaillée de la conception et de la fabrication des réchauffeurs d'air solaires (avec et sans ailettes), ainsi que des appareils de mesure utilisés tels que les thermocouples pour mesurer les températures, les thermomètres et les pyranomètres pour mesurer le rayonnement solaire et les débitmètres d'air pour déterminer le débit massique de l'air. Ce chapitre détaille également les méthodologies de mesure et les protocoles de test utilisés pour garantir l'exactitude et la comparabilité des données collectées.

Chapitre quatrième: Résultats et discussion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus à partir d'une étude comparative entre des capteurs solaires d'air avec et sans chicanes (rugosité artificielle), et les discute selon une modélisation mathématique. Le chapitre comprend des mesures actuelles de la distribution de température à l'intérieur des deux types de capteurs considérés en les comparant aux valeurs mesurées d'un autre capteur plan à air jouant le rôle de témoin, en comparant la quantité d'énergie utile gagnée (Q_U) et l'efficacité des capteurs (η) dans différentes conditions de fonctionnement (par exemple, vitesses d'écoulement de l'air et niveaux de rayonnement). La discussion vise à évaluer l'impact quantitatif et qualitatif de l'ajout d'obstacles (chicanes) sur la performance thermique globale du système, en identifiant les avantages et les inconvénients de chaque conception.

Nous espérons que cette initiation à la recherche contribuera à améliorer la compréhension scientifique des réchauffeurs d'air à panneaux solaires, en fournissant des données précieuses et des recommandations pratiques qui peuvent guider la conception future de ces

technologies, en soutenant l'expansion de l'utilisation de l'énergie solaire pour répondre aux besoins de chauffage de manière efficace et durable.

Chapitre I:
Généralités sur les capteurs
solaires

Chapitre I: Généralités sur les capteurs solaires

I.1 Introduction

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes, qui suscite un intérêt croissant compte tenu des défis environnementaux et économiques associés aux sources d'énergie traditionnelles. L'exploitation de cette ressource naturelle abondante constitue une option stratégique pour répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant l'environnement. Ce chapitre vise à fournir un aperçu complet de l'énergie solaire, en commençant par la compréhension de la géographie solaire (ou du corps solaire) et en distinguant les types d'énergie solaire tels que le photovoltaïque et le thermique, jusqu'à la classification des types de capteurs solaires (thermiques) et des techniques permettant d'améliorer leurs performances.

I.2 Gisement solaire

I.2.1 Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire, peut être photovoltaïque ou bien thermique. Cette énergie est récupérée à partir des rayons solaires qui se reflètent sur des panneaux. L'énergie est ensuite envoyée vers les villes. L'utilisation de cette énergie permet de faire d'importantes économies et ainsi d'alimenter les habitations en électricité[1].

I.2.2 Energie solaire thermique

Pour utiliser l'énergie solaire thermique, on doit installer des panneaux solaires sur le toit des habitations. Ces panneaux pourront ainsi réfracter la chaleur des rayons du soleil afin de permettre le réchauffement du fluide caloporteur [1].

I.2.3 Irradiation solaire

L'irradiation solaire est la magnitude qui mesure l'énergie par unité de surface du rayonnement solaire incident sur une surface placée dans un lieu et une plage de temps bien spécifiés. C.-à-d. que tout le rayonnement solaire généré par le Soleil n'atteint pas la Terre. La magnitude qui décrit le rayonnement solaire qui atteint la terre est l'irradiante. L'éclairement énergétique est exprimé en unités de puissance par surface, généralement en watts par mètre

carré. Lorsque nous parlons d'irradiation solaire, nous entendons la quantité irradiante reçue dans un temps donné[2].

Il existe plusieurs types mesurés d'irradiation solaire:

- Irradiation solaire totale
- Irradiation normale directe
- Rayonnement horizontal diffus ou rayonnement ciel diffus
- Irradiation horizontale globale

I.3 Classification des capteurs solaires

Le capteur solaire est le composant principal d'un système d'énergie solaire; Il collecte la chaleur solaire puis la transfère pour la stocker ou la récupérer. Il existe plusieurs types de complexes et ils intéressent toujours les chercheurs. Plusieurs critères peuvent être utilisés pour distinguer les différents capteurs solaires:

- les caractéristiques optiques.
- le rapport de concentration détermine les températures opératoires.
- les caractéristiques géométriques.
- les modes de pointage.
- les positions relatives de l'absorbeur et du concentrateur.

La classification suivante est une classification générale des capteurs solaires:

I.3.1 Capteurs à concentration

Un dispositif appelé « capteur solaire » ou « capteur solaire à concentration » permet de concentrer le rayonnement solaire sur une petite surface grâce à des surfaces réfléchissantes. Il permet l'absorption et la conversion de l'énergie thermique en énergie électrique grâce à des dispositifs SPV. Les concentrateurs peuvent multiplier le flux de rayonnement solaire jusqu'à 1000 fois. Ces types de capteurs sont couramment utilisés pour les applications à haute température, telles que la détoxification thermique et la production de vapeur pour la production d'électricité. Les capteurs à concentration sont particulièrement adaptés aux régions bénéficiant de longues périodes de ciel clair[3]. Il existe deux principaux types de capteurs à concentration: les capteurs paraboliques et les capteurs cylindro-paraboliques

I.3.1.A. Capteursparaboliques

Les capteurs paraboliques sont un type de collecteur d'énergie solaire concentrée (CSP) qui utilise des réflecteurs paraboliques pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur situé au foyer de la parabole. Cette concentration de la lumière solaire produit des températures élevées dans le récepteur, qui peuvent ensuite être utilisées pour diverses applications[4]. Ses principaux composants sont:

- a) **Réflecteur parabolique:** Surface courbe de forme parabolique précise, généralement en métal poli ou recouverte d'un matériau réfléchissant tel que du verre argenté ou des films polymères réfléchissants. La forme parabolique permet à toute la lumière solaire incidente parallèle à l'axe de la parabole d'être réfléchi vers une ligne focale.
- b) **Récepteur (ou absorbeur):** Situé le long de la ligne focale du réflecteur. Le récepteur absorbe le rayonnement solaire concentré et le convertit en chaleur. Il peut s'agir d'un tube contenant un fluide caloporteur (tel que de l'huile thermique, de l'eau ou du sel fondu) ou d'un absorbeur solide connecté au système de transfert de chaleur.
- c) **Structure de support et système de suivi:** Le réflecteur et le récepteur sont soutenus par une structure rigide. Pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire captée, les capteurs paraboliques sont généralement équipés d'un système de suivi à axe unique qui suit le mouvement du soleil d'est en ouest tout au long de la journée. Certains systèmes plus avancés peuvent également disposer d'un suivi à deux axes pour améliorer la capture de l'énergie solaire en ajustant l'inclinaison en fonction des saisons

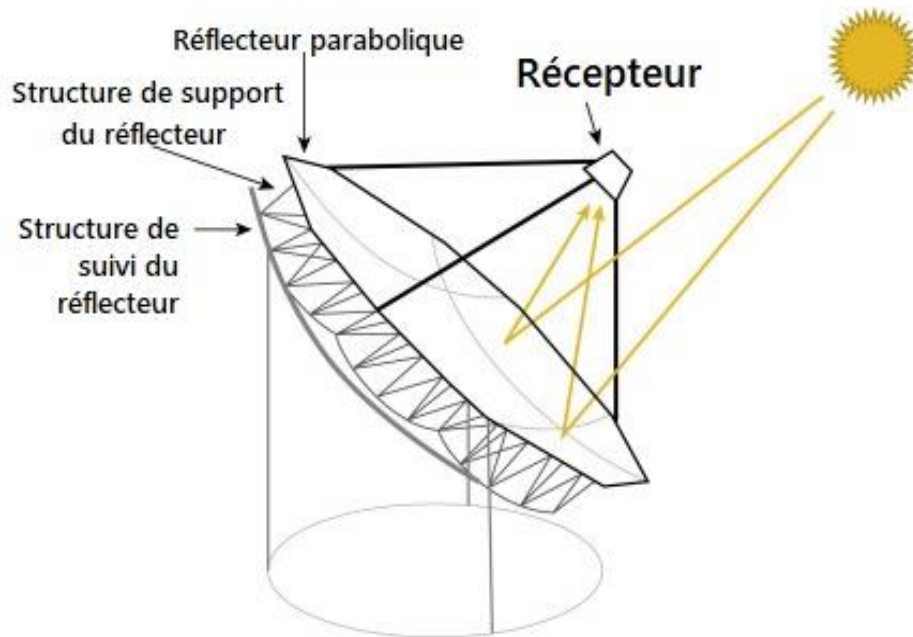


Figure I-1: Schéma d'un collecteur parabolique[5].

I.3.1.B. Capteurs cylindro-paraboliques

Les capteurs solaires à concentration, utilisant des gouttières en U, concentrent le rayonnement solaire sur le tube récepteur. Un fluide actif (comme l'eau) est disposé tout au long du foyer du récepteur. Ils sont appelés « capteurs cylindro-paraboliques ». Parfois, un tube de verre transparent recouvre le tube récepteur afin de réduire considérablement les pertes thermiques de l'ensemble du système. Les capteurs cylindro-paraboliques utilisent souvent des systèmes de suivi à axe simple ou double pour suivre le rayonnement solaire. Dans de rares cas, ils sont stationnaires. La température du récepteur peut atteindre 400°C, et cette énergie thermique est utilisée pour le chauffage des locaux à moyenne température, le chauffage industriel et le chauffage opérationnel des turbines à vapeur afin de produire de l'électricité[1]. Les composants clés d'un capteur cylindro-parabolique sont:

- a) Réflecteur cylindro-parabolique:** Il s'agit d'un miroir long et incurvé avec une section transversale parabolique. Ce miroir est conçu pour réfléchir le rayonnement solaire direct incident vers une ligne focale parallèle à l'axe du collecteur. Les réflecteurs sont généralement fabriqués à partir de feuilles de métal hautement réfléchissantes ou de verre recouvert d'une couche réfléchissante.
- b) Tube récepteur (ou absorbeur):** Un tube métallique (généralement en acier) recouvert d'un revêtement absorbant sélectif est positionné le long de la ligne focale du réflecteur. Ce tube contient un fluide caloporteur (comme de l'huile thermique

synthétique, de l'eau pressurisée ou du sel fondu) qui est chauffé par le rayonnement solaire concentré. Le tube récepteur est souvent entouré d'une enveloppe de verre sous vide pour réduire les pertes de chaleur par convection et rayonnement.

- c) **Structure de support:** Le réflecteur et le tube récepteur sont soutenus par une structure rigide qui maintient la forme parabolique du miroir et positionne précisément le récepteur le long de la ligne focale.
- d) **Système de suivi:** Pour maximiser l'interception de la lumière solaire directe, les capteurs cylindro-paraboliques sont généralement équipés d'un système de suivi à un axe. Ce système suit le mouvement du soleil d'est en ouest tout au long de la journée, en pivotant l'ensemble du collecteur autour d'un axe horizontal.

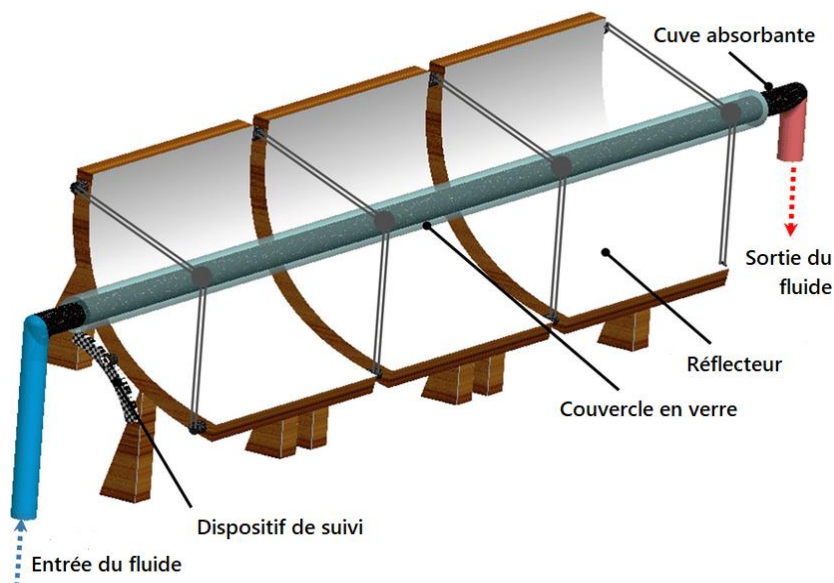


Figure I-2: Schéma d'un collecteur cylindro-parabolique[6].

I.3.1.C. Systèmes de récepteurs centraux (héliostats):

Conception et production d'électricité à grande échelle Les systèmes de récepteurs centraux, également appelés centrales à tour ou centrales à héliostats, représentent une technologie essentielle pour la production d'énergie solaire à grande échelle. Ils utilisent un champ de miroirs suiveurs individuels, appelés héliostats, pour concentrer la lumière du soleil sur un récepteur situé au sommet d'une haute tour. L'énergie solaire hautement concentrée chauffe un fluide caloporteur dans le récepteur, qui est ensuite utilisé pour produire de l'électricité selon un cycle de production conventionnel[7]. Les principaux composants d'un système de récepteur central sont:

- a) **Champ d'héliostats:** Il est constitué d'un grand nombre de miroirs plats ou légèrement incurvés (héliostats) disposés stratégiquement autour de la tour centrale. Chaque héliostat est équipé d'un système de suivi à deux axes qui suit en continu le mouvement du soleil tout au long de la journée, réfléchissant la lumière solaire vers le récepteur.
- b) **Récepteur central:** Situé au sommet de la tour, le récepteur absorbe le rayonnement solaire concentré et transfère la chaleur au Fluide caloporteur qui le traverse. Les récepteurs sont de conception variée et peuvent être:
- Récepteurs externes: Le Fluide caloporteur circule dans des tubes situés sur la surface extérieure du récepteur.
 - Récepteurs à cavité: Les tubes absorbants sont situés à l'intérieur d'une cavité isolée dont une ouverture fait face au champ d'héliostats, réduisant ainsi les pertes de chaleur.
 - Récepteurs volumétriques: Utilisent un matériau poreux pour absorber le rayonnement directement dans le trajet du Fluide caloporteur (souvent utilisé avec de l'air comme Fluide caloporteur).
- c) **Tour:** Structure haute supportant le récepteur à une hauteur suffisante pour minimiser les pertes optiques (ombrage et blocage) du champ de l'héliostat. La hauteur est un paramètre de conception crucial qui influence la disposition du champ et l'efficacité globale.
- d) **Fluide caloporteur:** Fluide qui absorbe la chaleur dans le récepteur et la transporte vers le bloc d'alimentation. Les Fluides caloporteurs courants comprennent: sel fondu, eau/vapeur, huiles synthétiques, air.
- e) **Bloc d'alimentation:** Système de production d'électricité conventionnel, généralement une turbine à vapeur couplée à un générateur électrique. Le FCT chaud du récepteur est utilisé pour produire de la vapeur (directement ou via un échangeur de chaleur), qui entraîne la turbine et produit de l'électricité.
- f) **Stockage d'énergie thermique (SET):** De nombreuses centrales de réception centrale intègrent des systèmes de SET pour stocker l'excédent d'énergie thermique collecté pendant la journée. Cela permet de poursuivre la production d'électricité pendant les périodes nuageuses ou même après le coucher du soleil, augmentant ainsi le facteur de capacité et la capacité de répartition de la centrale. Le sel fondu est un moyen de stockage courant.

- g) **Système de contrôle:** Un système sophistiqué gère le suivi de milliers d'héliostats, contrôle le flux de Fluide caloporteur à travers le récepteur et coordonne le fonctionnement du bloc d'alimentation et du système SET. Des algorithmes de contrôle avancés et même l'apprentissage automatique sont mis en œuvre pour optimiser les performances.

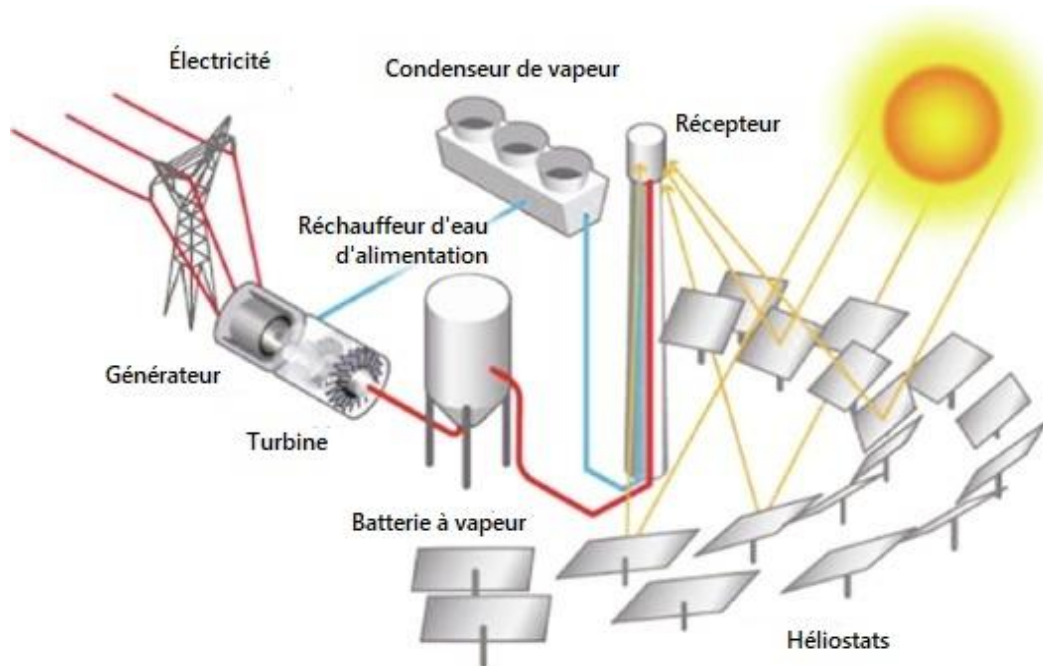


Figure I-3: Schéma d'une tour solaire ou d'un système de réception central [8].

I.3.1.D. Concentrateurs paraboliques composés (CPC):

Un capteur parabolique composé (CPC) est un type de capteur solaire thermique capable de concentrer et de réfléchir tout le rayonnement incident vers un récepteur. Son potentiel en tant que collecteur d'énergie solaire a été mis en évidence par Winston; c'est pourquoi on les appelle parfois capteurs de type Winston. Le CPC se caractérise par une faible concentration (< 5) et une température de sortie moyenne. La géométrie du réflecteur est construite par la combinaison de deux segments paraboliques symétriques avec des points de focalisation différents se faisant face. Cette géométrie permet au CPC de fonctionner sans suivi continu et de recevoir à la fois le rayonnement DNI et le rayonnement diffus incident sur l'ouverture du capteur dans un angle d'acceptation.

Les CPC ont deux conceptions de base, symétriques et asymétriques, et deux principaux types d'absorbeurs, tubulaires et à ailettes. Le type de chicanes comprend les absorbeurs plats, bifaciaux et en coin, comme illustré dans la Figure (I-4). Les CPC doivent avoir un faible

espace entre l'absorbeur et le réflecteur afin d'éliminer les pertes de chaleur de l'absorbeur à travers le réflecteur[9].

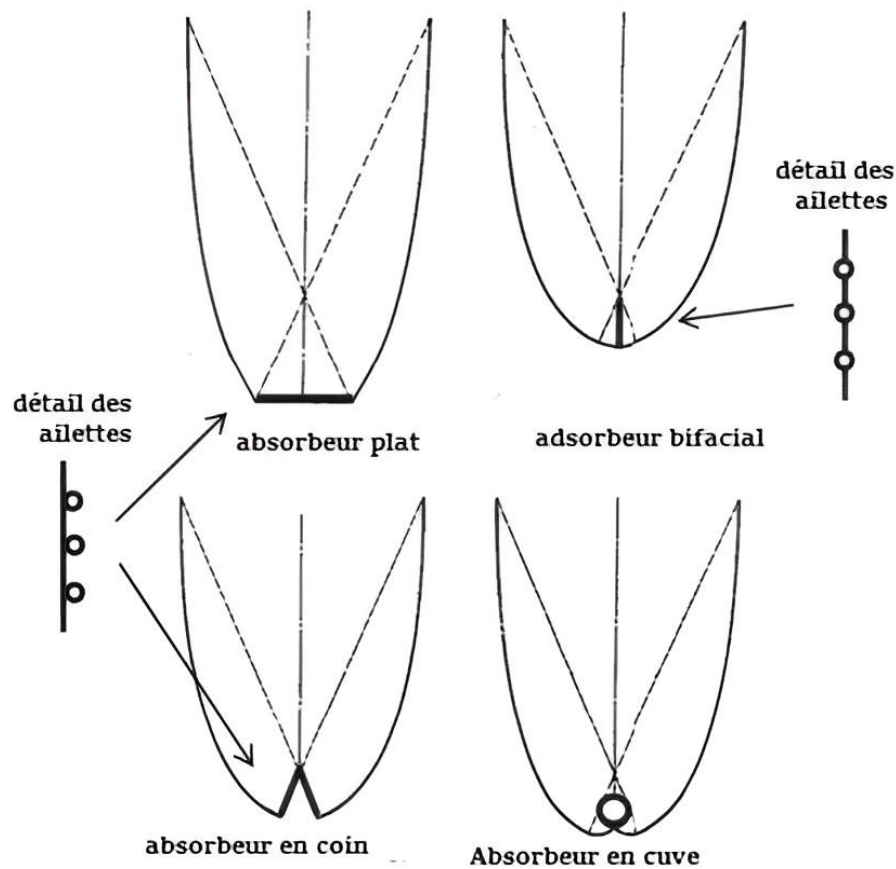


Figure I-4: Types d'absorbeurs de collecteurs paraboliques composés[9]

I.3.1.E. Réflecteurs de Fresnel linéaires:

Les réflecteurs de Fresnel linéaires sont une forme modifiée d'une cuvette parabolique. Au lieu d'utiliser une cuvette volumineuse pour concentrer le flux solaire, celle-ci est divisée en longues rangées de miroirs plats ou légèrement incurvés, se rapprochant de la forme parabolique de la cuvette, concentrant ainsi le flux de manière similaire. Ce flux concentré est absorbé par un récepteur linéaire fixe orienté vers le bas, comme illustré à la Figure(I-5). Une température de fonctionnement élevée, un chauffage à plusieurs étages et une production directe de vapeur sont les principales caractéristiques qui favorisent son déploiement sur un large spectre[10].

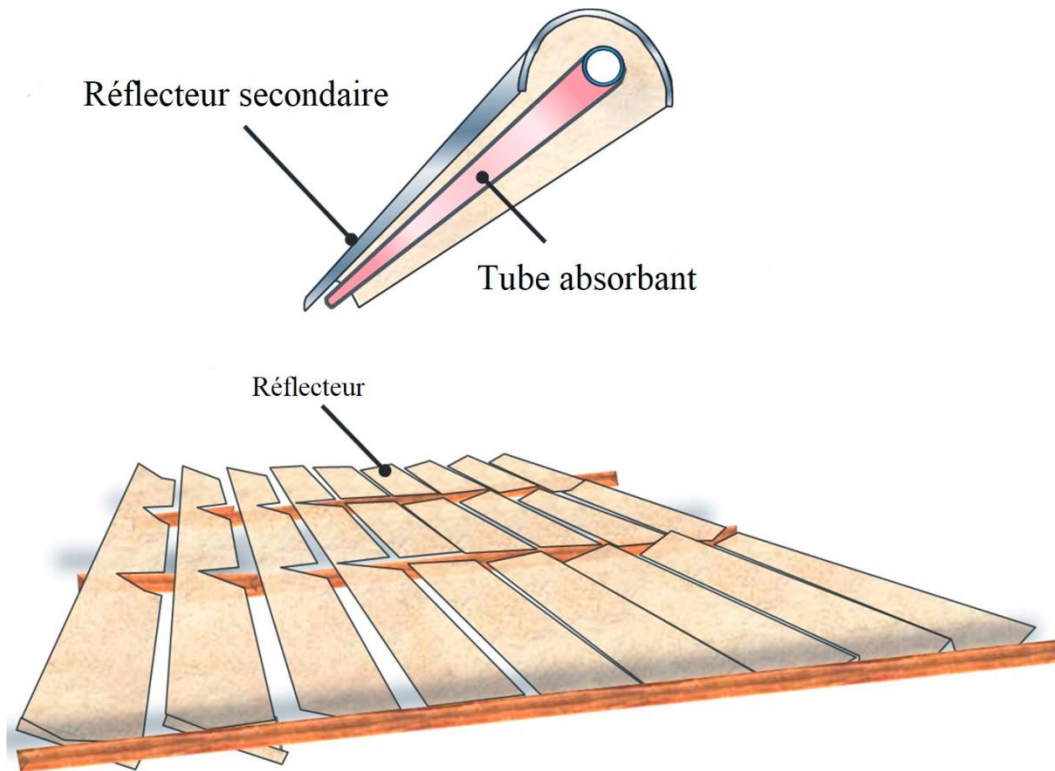


Figure I-5: *Réflecteur de Fresnel linéaire*[11]

I.3.2 Capteurs hybrides et émergents:

Les capteurs solaires hybrides intègrent deux ou plusieurs mécanismes de conversion d'énergie dans un seul appareil, permettant la production simultanée de différentes formes d'énergie, généralement à la fois de l'électricité et de la chaleur

I.3.2.A. Capteur photovoltaïque thermique (PV/T)

Les systèmes hybrides photovoltaïques (PV) thermiques peuvent produire simultanément de l'énergie thermique et électrique en captant et en convertissant le rayonnement solaire renouvelable en énergies utilisables. Les modules PV traditionnels sont affectés par les températures élevées, car une chaleur excessive réduit leur efficacité globale. La technologie hybride PV/T permet d'extraire la chaleur excédentaire en intégrant une unité de refroidissement aux propriétés améliorées, améliorant ainsi le rendement thermoélectrique du PV/T par rapport aux modules PV et aux systèmes conventionnels à fluide. L'unité thermique du capteur absorbe la chaleur supplémentaire générée par le module PV afin d'optimiser l'efficacité du système. Un capteur solaire hybride PV/T typique est illustré sur la Figure (I-6) [12].

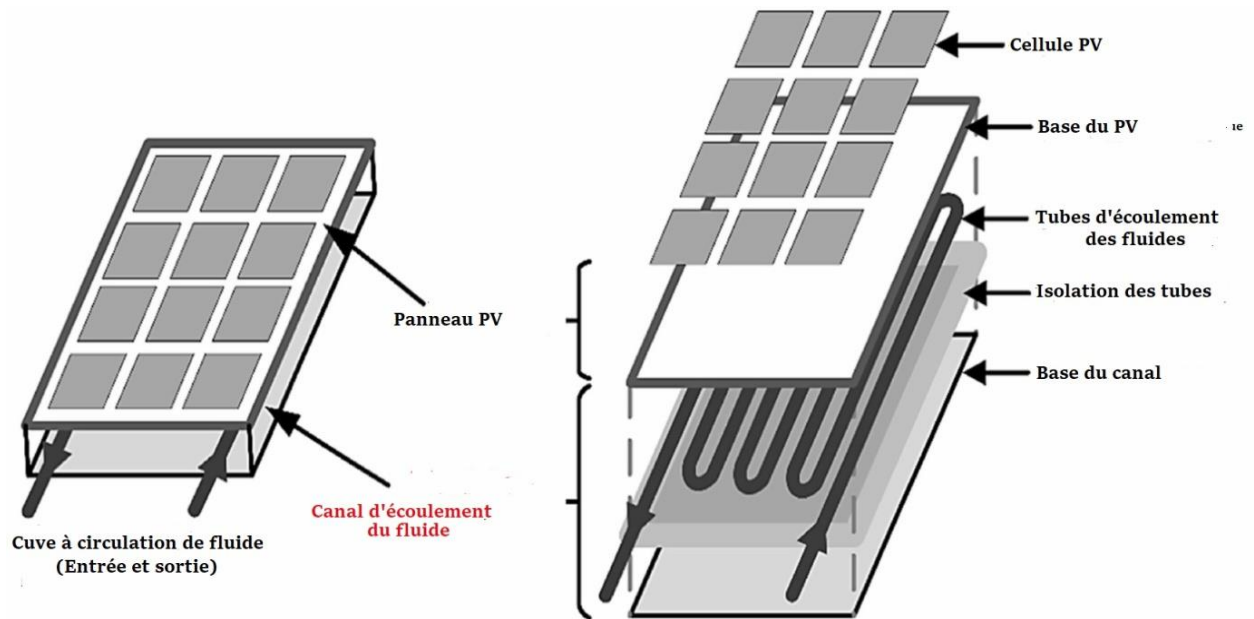


Figure I-6: Schéma d'un capteur hybride PV/T[13]

I.3.2.B. Collecteurs intégrés avec des matériaux à changement de phase (PCM)

L'intégration de matériaux à changement de phase (MCP) dans les capteurs solaires constitue une approche innovante pour améliorer leurs performances thermiques et résoudre le problème de l'intermittence de l'énergie solaire. Les matériaux à changement de phase (MCP) absorbent ou libèrent de la chaleur latente lors d'une transition de phase (par exemple, de l'état solide à l'état liquide ou de l'état liquide à l'état solide) à une température relativement constante[14-15].

Les MCP peuvent être intégrés à différents types de capteurs solaires, notamment les capteurs thermiques plans, les capteurs PV/T et même les capteurs à air[16]. Parmi les méthodes d'intégration courantes, on peut citer:

- **Couches de MCP derrière la plaque absorbante:** Une couche de MCP est placée derrière la plaque absorbante d'un capteur thermique ou derrière le module PV et l'absorbeur d'un capteur PV/T.
- **MCP dans les canaux de fluide caloporteur:** Le MCP encapsulé peut être suspendu dans le fluide caloporteur circulant dans le capteur.
- **MCP intégré à la structure du capteur:** La structure du capteur elle-même peut intégrer des éléments de MCP.

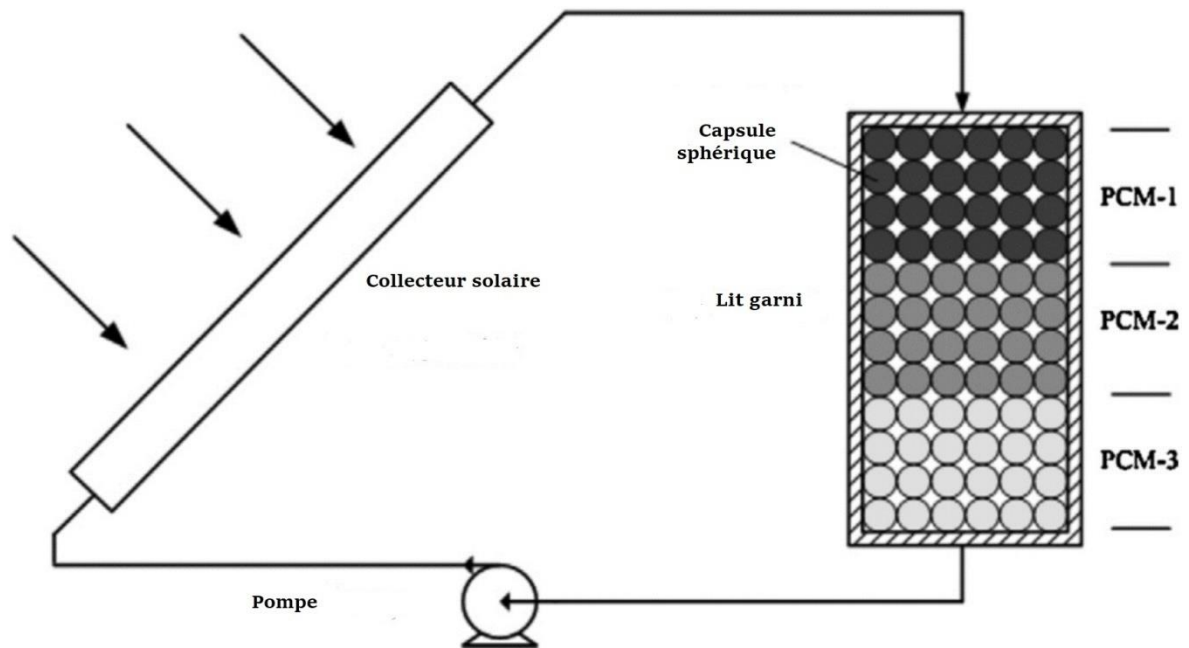
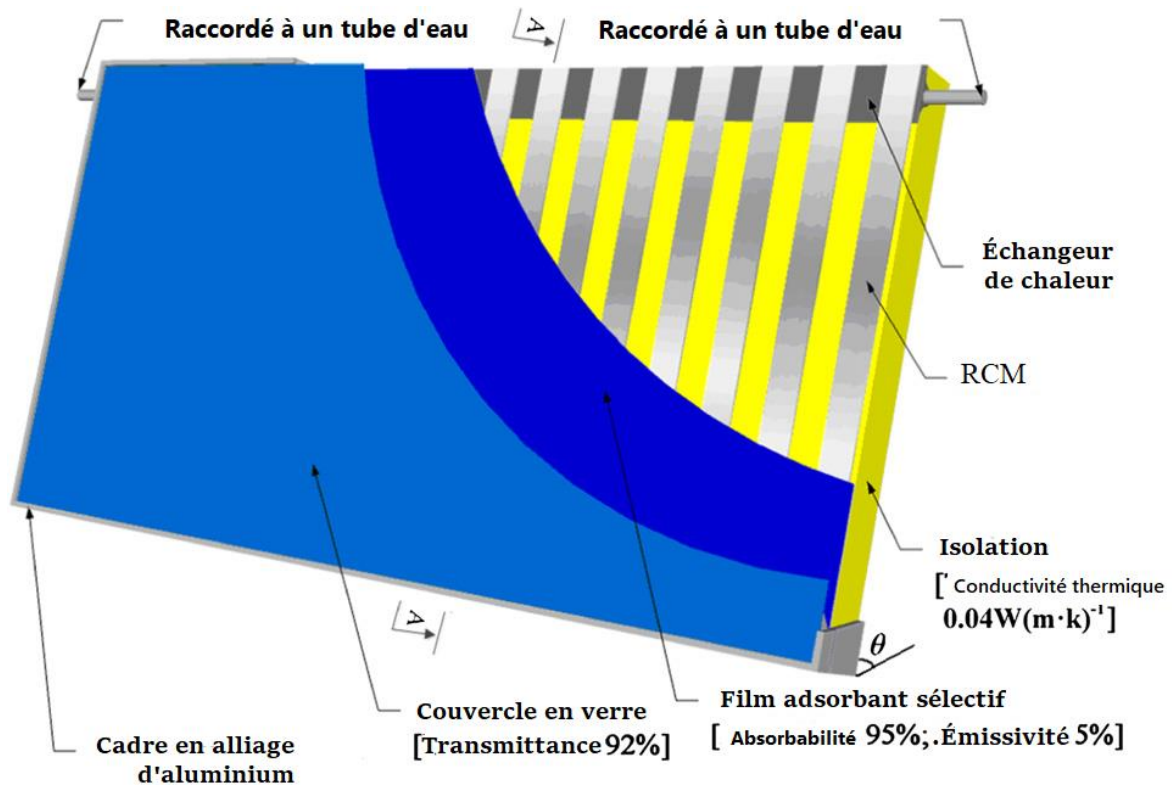


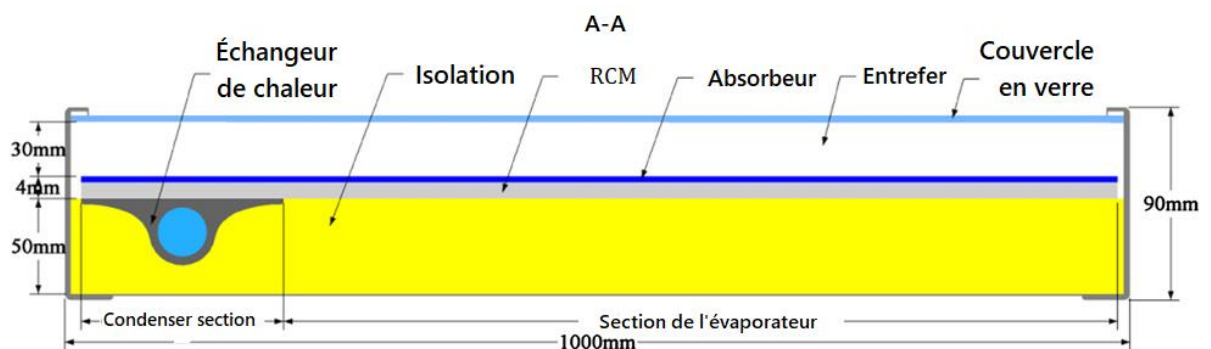
Figure I-7: *Chauffe-eau solaire utilisant trois types de MCP [17]*

I.3.2.C. Capteurs solaires à micro-canaux

Les capteurs solaires à micro-canaux utilisent un réseau de très petits canaux (généralement de diamètre hydraulique compris entre 10 et 1000 μm) pour la circulation du fluide caloporteur. Cette conception offre des avantages significatifs grâce au rapport surface/volume élevé au sein des canaux.



a) Profil du RCM-CSP



b) Coupe transversale du RCM-CSP

Figure I-8: Schéma du RCM-CSP [18]

I.3.3 Collecteurs non concentrant

I.3.3.A. Capteur plan:

Le capteur plan est le cœur de tout système de captage d'énergie solaire conçu pour fonctionner à basse température (inférieur à 60°C) ou à température moyenne (inférieur à 100°C). Il permet d'absorber l'énergie solaire, de la convertir en chaleur, puis de la transférer vers un flux liquide ou gazeux. Les capteurs solaires plans, mécaniquement plus simples que

les capteurs à concentration, sont principalement utilisés à des fins domestiques et industrielles. Les caractéristiques essentielles des capteurs plans conventionnels sont[19]:

- a) Une plaque absorbante plate noircie (généralement métallique) sur laquelle le rayonnement solaire tombe et est absorbé, se transformant ainsi en énergie thermique.
- b) Des tubes, canaux ou passages fixés aux plaques absorbantes noircies permettent la circulation du fluide nécessaire à l'évacuation de l'énergie thermique de la plaque.
- c) Une isolation à l'arrière et sur les côtés de la plaque absorbante minimise les pertes de chaleur par conduction.
- d) Un couvercle transparent (une ou deux feuilles) en verre ou en plastique pour réduire la convection ascendante et les pertes de chaleur par rayonnement de la plaque absorbante.
- e) Un boîtier étanche renfermant les composants ci-dessus.

Le capteur plan est généralement fixé de manière permanente et ne nécessite aucune orientation du soleil. Les capteurs doivent être orientés directement vers l'équateur, face au sud dans l'hémisphère nord et au nord dans l'hémisphère sud. L'angle d'inclinaison optimal du capteur est égal à la latitude du lieu, avec des variations d'angle d'environ 10 à 15 degrés suivant l'application. Un capteur solaire plan typique est montré sur la Figure (I-9).

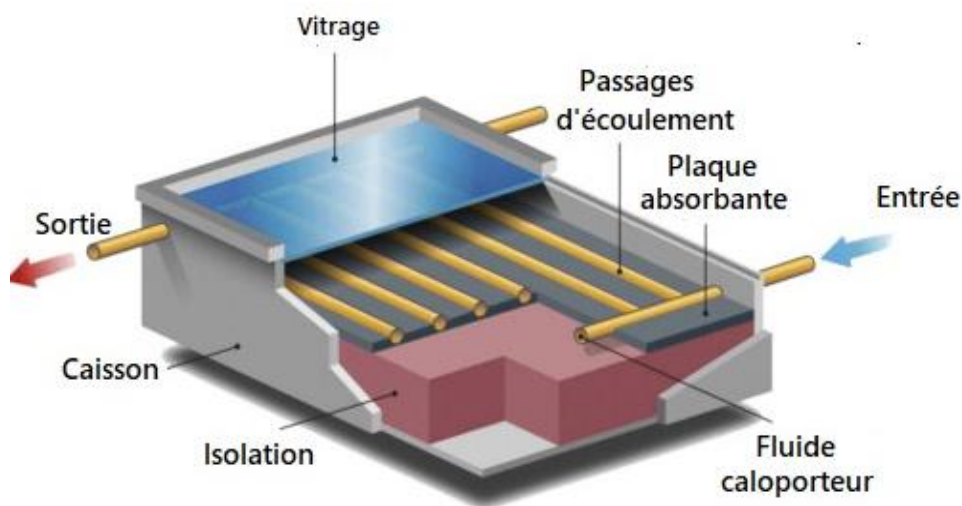


Figure I-9: Composants d'un capteur plan[20]

I.3.3.B. Capteur solaire à tubes sous vide (CSTV)

Les CSTVest le système de conversion d'énergie solaire le plus performant. Il peut fournir plus d'énergie thermique que les capteurs solaires à tubes sous vide conventionnels, grâce à une faible dissipation thermique due à son système d'isolation sous vide. Une séparation sous vide entre le tube de verre et la surface de l'absorbeur intégrée au tube (thermosiphon, tube en U ou caloduc) réduit les pertes thermiques par conduction et convection.

La plaque absorbante et le tube intégré sont placés à l'intérieur du tube interne, généralement en cuivre ou en aluminium. Le fluide de travail circule dans les caloducs en boucle fermée et absorbe l'énergie du rayonnement solaire, se condense dans le collecteur et retourne aux caloducs pour le cycle suivant (un CSTV typique est montré sur la figure I-10)[21].

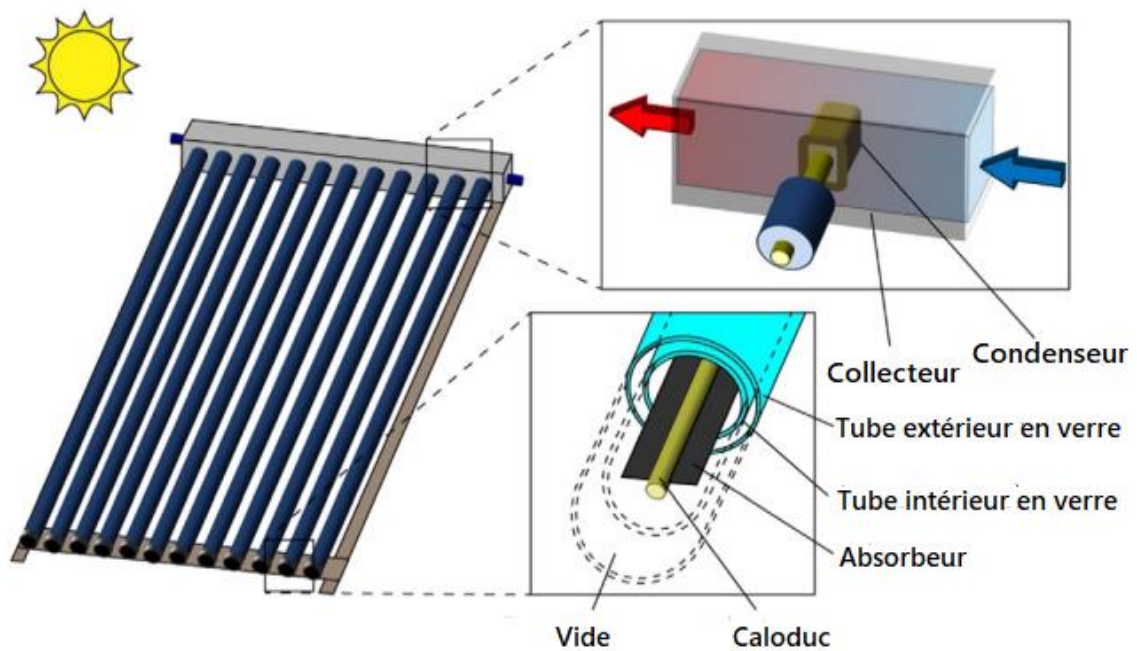


Figure I-10: Principaux composants du système de capteurs solaires à tubes sous vide[22]

I.4 Techniques d'amélioration des performances des capteurs solaires

I.4.1 Modifications de surface (Améliorer l'absorption et réduire les pertes de chaleur)

Ces techniques visent à améliorer l'interaction de la plaque absorbante avec le rayonnement solaire et à réduire les pertes de chaleur en:

- **Revêtements sélectifs:** Il s'agit de revêtements spécialisés appliqués sur la plaque absorbante. Son avantage réside dans sa forte absorption solaire (il absorbe une grande partie du rayonnement solaire incident) et sa faible émissivité thermique (il libère très peu de chaleur absorbée sous forme de rayonnement infrarouge). On le considère comme un matériau qui absorbe très bien la lumière du soleil mais qui ne parvient pas à diffuser la chaleur vers l'extérieur. Cette différence réduit considérablement la perte de chaleur radiante de la plaque absorbante, en particulier à des températures de fonctionnement élevées, ce qui améliore l'efficacité.
- **Revêtements antireflets:** Similaires à ceux utilisés sur les lunettes ou les panneaux solaires, les revêtements antireflets sur le verre (feuille de couverture) réduisent la quantité de lumière solaire réfléchi par la surface du capteur. Cela permet à davantage de rayonnement solaire d'atteindre la plaque absorbante, augmentant ainsi l'apport énergétique et l'efficacité globale du capteur.
- **Texture de surface:** la modification de la surface de la feuille absorbante au niveau microscopique peut améliorer l'absorption de l'énergie solaire en piégeant la lumière du soleil plus efficacement grâce à de multiples réflexions dans la surface améliorée. Cela peut être réalisé grâce à diverses techniques telles que le perçage ou la création de structures microscopiques. De plus, certaines textures peuvent affecter la façon dont la chaleur est émise par une surface.

I.4.2 Amélioration du transfert thermique

- **Promoteurs de turbulence:** Il s'agit de dispositifs ou de conceptions dans les passages d'écoulement du fluide qui induisent des turbulences dans le fluide de transfert de chaleur. L'écoulement turbulent améliore le mélange et augmente le contact entre le fluide et la plaque absorbante chaude, conduisant à un transfert de chaleur plus efficace. Les exemples incluent les ailettes, les chicanes ou les surfaces de tubes rugueuses.
- **Surfaces étendues (ailettes):** la fixation d'ailettes (plaques métalliques minces) à la plaque absorbante augmente la surface en contact avec le fluide caloporteur. Cette zone

de contact plus grande permet de transférer davantage de chaleur au fluide, améliorant ainsi l'efficacité globale d'extraction de chaleur. Les ailettes sont couramment utilisées dans les capteurs à liquide et à air.

- **Nanofluides:** Ce sont des fluides caloporteurs qui contiennent une faible concentration (généralement $< 1\%$ en volume) de nanoparticules (particules de dimensions < 100 nanomètres). L'ajout de ces nanoparticules peut améliorer considérablement la conductivité thermique et les propriétés de transfert de chaleur du fluide de base (par exemple, l'eau ou le glycol). Cela peut conduire à une absorption et un transfert de chaleur plus efficaces au sein du collecteur. Toutefois, des questions telles que la stabilité, le coût et les performances à long terme font encore l'objet de recherches actives.
- **Micro-canaux:** Au lieu de tubes plus grands, l'utilisation d'un réseau de très petits canaux (micro-canaux) dans la plaque absorbante peut augmenter considérablement le rapport surface/volume pour le transfert de chaleur. Cela peut conduire à une extraction de chaleur plus rapide et plus efficace de la plaque absorbante vers le fluide. Les conceptions de micro-canaux sont plus complexes à fabriquer mais sont prometteuses pour les collecteurs solaires à haute performance.

I.3.1 Isolation et vitrage(réduire les pertes de chaleur)

Une isolation et un vitrage efficaces sont essentiels pour réduire les pertes de chaleur du complexe vers les zones environnantes.

- **Matériaux isolants:** Le type et l'épaisseur de l'isolant utilisé derrière et autour de la plaque absorbante jouent un rôle essentiel dans la minimisation des pertes de chaleur par conduction et convection. Des matériaux à faible conductivité thermique, tels que la fibre de verre, la laine minérale, la mousse de polyuréthane et les panneaux d'isolation sous vide (pour des performances très élevées), sont utilisés. Le choix dépend de facteurs tels que le coût, la plage de température et les contraintes d'espace.
- **Types de vitrage:** Le matériau du vitrage et le nombre de couches ont un impact significatif sur les pertes de chaleur.

I.4.3 Systèmes de suivi

Les systèmes de suivi sont des mécanismes utilisés pour diriger les capteurs solaires (généralement des capteurs à concentration tels que des auges ou des antennes paraboliques) afin de suivre le mouvement du Soleil dans le ciel. Cela garantit que le capteur est toujours orienté directement vers le soleil, augmentant ainsi la quantité de rayonnement solaire direct intercepté et concentré.

- Suivi à axe unique: ces systèmes suivent le mouvement du soleil le long d'un seul axe, généralement horizontalement (azimut) ou verticalement (altitude). Ils sont plus simples et moins coûteux que les trackers à deux axes et peuvent améliorer considérablement la collecte d'énergie par rapport aux capteurs fixes, en particulier dans les zones à forte composante solaire directe.
- Suivi à deux axes: ces systèmes plus avancés suivent le mouvement du soleil le long de deux axes simultanément (azimut et élévation), permettant au capteur de maintenir une orientation perpendiculaire au soleil tout au long de la journée et de l'année. Cela maximise la collecte d'énergie à partir du rayonnement solaire direct, mais cela entraîne un coût plus élevé et une plus grande complexité.

I.3.2 Intégration au stockage d'énergie

L'intégration de capteurs solaires aux systèmes de stockage d'énergie thermique (TES) est essentielle pour pallier l'intermittence de l'énergie solaire et améliorer la fiabilité et la distribuabilité des systèmes solaires thermiques. Le TES permet de stocker la chaleur collectée pendant les périodes ensoleillées et de l'utiliser ultérieurement lorsque le rayonnement solaire est indisponible (par exemple, la nuit ou par temps nuageux).

- Stockage en chaleur sensible: Il s'agit de stocker l'énergie thermique en augmentant la température d'un milieu de stockage sans changement de phase. Les matériaux de stockage de chaleur sensible les plus courants comprennent l'eau, l'huile thermique et les matériaux solides comme la roche ou le béton. Il s'agit d'une technologie éprouvée et relativement simple, souvent utilisée avec les capteurs plans et les capteurs à concentration.
- Stockage en chaleur latente: Cette méthode exploite la chaleur absorbée ou libérée lorsqu'un matériau subit un changement de phase (par exemple, de solide à liquide ou de liquide à gaz) à une température relativement constante. Les matériaux à changement de

phase (MCP) peuvent stocker une grande quantité d'énergie dans une plage de température étroite, offrant une densité de stockage énergétique supérieure à celle du stockage de chaleur sensible. L'intégration des MCP aux capteurs solaires est actuellement étudiée afin de fournir un stockage thermique compact et efficace.

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons passé en revue de manière exhaustive les principes généraux associés à l'énergie solaire et les différents types de capteurs solaires utilisés pour l'exploiter. Nous avons d'abord discuté du concept de corps solaire et des sources d'énergie solaire, en distinguant l'énergie solaire photovoltaïque et thermique. Nous avons ensuite procédé à la classification des capteurs solaires en fonction de leur structure et de leur principe de fonctionnement, en référence aux modèles classiques, aux capteurs à concentration et aux systèmes hybrides émergents. Nous avons également discuté des différentes méthodes et technologies utilisées pour améliorer les performances de ces complexes, tant en termes d'absorption d'énergie que de réduction des pertes de chaleur, en plus du rôle des systèmes de suivi et de stockage dans l'augmentation de l'efficacité globale.

Ces données soulignent l'importance de comprendre les aspects techniques et physiques des capteurs solaires pour comprendre leur comportement et améliorer leur efficacité. Cela ouvre la voie à des études plus approfondies dans les chapitres suivants, notamment en ce qui concerne la modélisation mathématique de ces systèmes et l'analyse de leurs performances dans des conditions de fonctionnement réalistes.

Chapitre II:
Modélisation mathématique

Chapitre II Modélisation mathématique

II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons un modèle mathématique pour décrire les performances thermiques d'un capteur solaire à air, basé sur les lois fondamentales de la thermodynamique et du transfert de chaleur. Ce modèle permet d'analyser le comportement du système sous l'influence de différentes variables thermiques, en tenant compte des interactions entre le rayonnement solaire, l'absorption, les pertes de chaleur et les conditions de fonctionnement. Le modèle comprend l'équation énergétique, les calculs de bilan thermique, les facteurs d'influence tels que l'angle de pente, l'efficacité thermique et le facteur géométrique. Ce travail vise à fournir un outil analytique permettant d'évaluer et d'améliorer les performances thermiques d'un capteur solaire à air.

II.2 Equation d'énergie

L'équation de l'énergie, dérivée de la thermodynamique, est exprimée sous la forme suivante

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla(\lambda \nabla T) + \Phi \quad (\text{II-1})$$

où:

Φ représente la fonction de dissipation, qui quantifie l'équivalent thermique de l'énergie mécanique associée à la dissipation visqueuse et aux contraintes de cisaillement :

$$\Phi = \frac{\partial V_{Lj}}{\partial x_j} - \mu \left[2 \left(\frac{\partial V_s}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_y}{\partial x} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_L}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_s}{\partial x} + \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)^2 \right. \\ \left. \left(\frac{\partial V_u}{\partial y} + \frac{\partial V_y}{\partial c} \right)^x + \left(\frac{\partial V_t}{\partial z} + \frac{\partial V_u}{\partial x} \right)^* \right] + \lambda \left(\frac{\partial V_+}{\partial x} + \frac{\partial V_y}{\partial y} + \frac{\partial V_u}{\partial z} \right)^x \quad (\text{II-2})$$

$\frac{Dh}{Dt}$: indique la variation de l'enthalpie (dérivée particulaire). indique la variation de l'enthalpie (dérivée particulaire).

$\frac{Dp}{Dt}$: représente le taux de travail de pression.

$\nabla(\lambda \nabla T) = \text{div}(\lambda \text{grad } T)$: symbolise le transfert de chaleur par conduction dans le fluide.

λ : est la conductivité thermique.

En introduisant la chaleur massique à pression constante $C_p = \frac{ah}{\partial t}$ et le coefficient de dilatation cubique à pression constante γ , l'équation de l'énergie se reformule comme suit:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} - \gamma T \frac{Dp}{Dt} + \nabla(\lambda \nabla T) + \Phi \quad (II-3)$$

II.3 Bilan de conservation de l'énergie

Selon le principe de conservation de l'énergie, l'accroissement de l'énergie interne du capteur au cours du temps (Q_s) est égal à la différence entre l'énergie solaire incidente sur la surface d'ouverture du capteur (I_{Aa}), les pertes optiques ($Q_{l,o}$), les pertes thermiques ($Q_{l,h}$) et l'énergie utile extraite par le collecteur (Q_u) (Équation (1)). Dans ce contexte, $Q_{l,o}$ inclut l'énergie optique réfléchie non seulement par le couvercle transparent mais aussi par l'absorbeur (Figure II-1).

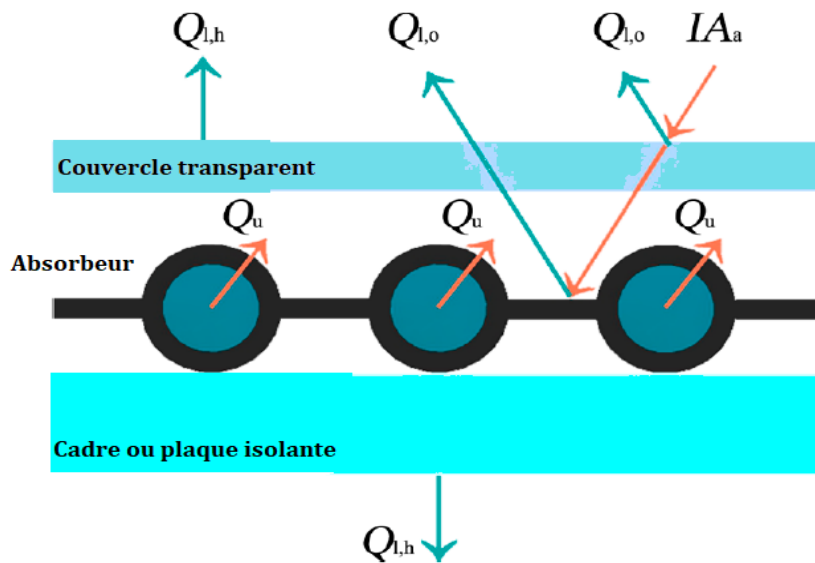


Figure II-1: Bilan de conservation d'énergie d'un capteur solaire CNVT

Dans des conditions transitoires, comme en début de matinée, la température de l'absorbeur (T_{abs}) augmente.

- Tous les composants du collecteur absorbent et stockent continuellement de la chaleur.
- Au coucher du soleil, T_{abs} diminue et les composants du collecteur libèrent de la chaleur et de l'énergie.

- c. Dans des conditions de régime permanent, Q_s est égal à 0. Par conséquent, pour simplifier l'analyse, les conditions transitoires ne sont pas prises en compte dans cette étude.

$$Q_u = I S_a - Q_{l,o} - Q_{l,h} = C_p q_m (T_{f,o} - T_{f,i}) \quad (II-4)$$

où:

- $Q_{l,o}$ est principalement lié à la transmittance du revêtement transparent (τ) et à l'absorbance du revêtement absorbant (α) et est donné par l'équation (II-9),

$$Q_{l,o} = I S_a [1 - (\tau\alpha)_e] \quad (II-5)$$

où $(\tau\alpha)_e$ est le quotient effectif de transmission et d'absorption de l'absorbeur.

- $Q_{l,h}$ est exprimé comme la différence entre T_{abs} et T_a . Elle est donnée par l'équation (II-10)

$$Q_{l,h} = S_a U_L (T_{abs} - T_a) \quad (II-6)$$

Lorsque T_{abs} est supérieure à la température ambiante (T_a), une partie de l'énergie du rayonnement solaire absorbée par le capteur est perdue dans l'environnement. C'est parce que T_{abs} est le plus élevé parmi toutes les parties du collecteur.

II.3.1 Produit efficace transmission-absorption de l'absorbeur

La transmittance (τ) représente l'énergie du rayonnement solaire qui traverse le revêtement transparent jusqu'à la surface de l'absorbeur tandis que l'absorptivité (α) représente l'énergie du rayonnement absorbée par l'absorbeur. Selon la figure (II-2)[23]:

Les processus de transmission, d'absorption et de réflexion du rayonnement se répètent en continu entre le couvercle transparent et l'absorbeur. L'énergie solaire radiante absorbée par l'absorbeur dans ce processus peut être collectée et le quotient de transmission et d'absorption de l'absorbeur ($\tau\alpha$) peut être calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$(\tau\alpha) = \tau\alpha \sum_{n=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^n = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (II-7)$$

Dans cette équation, τ et α sont tous deux des valeurs mesurées. La réflectivité d'un couvercle transparent au rayonnement diffusé est liée au coefficient d'extinction (K) et à la longueur du trajet du rayonnement solaire (L).

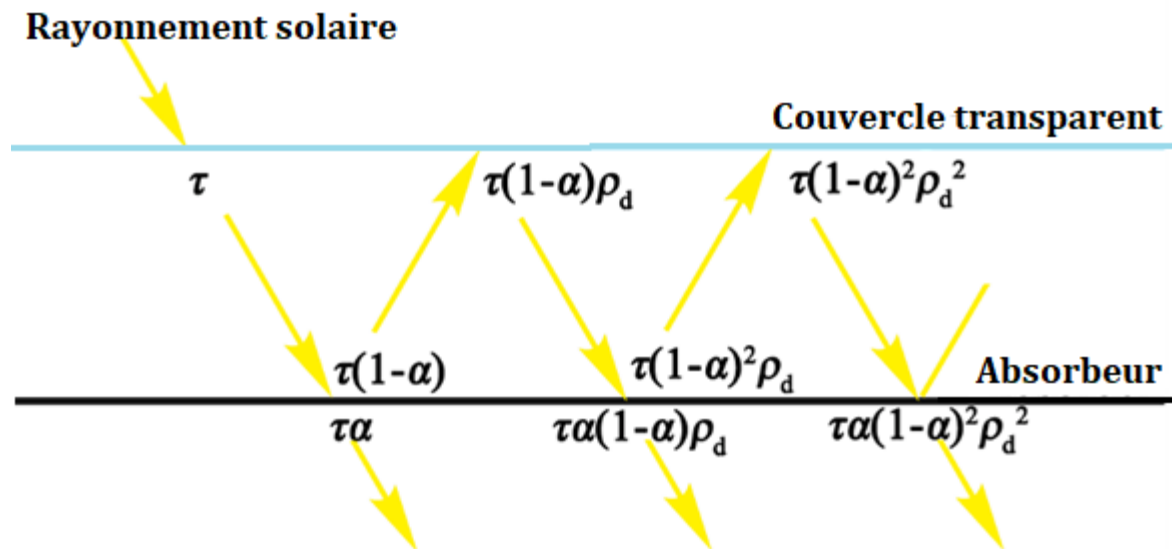


Figure II-2: *Processus de transmission, d'absorption et de réflexion du rayonnement dans le système transparent de recouvrement-absorption*

II.4 Analyse des pertes de chaleur:

Les pertes de chaleur se produisent en raison de la différence de température entre l'absorbeur et l'environnement. La perte de chaleur totale $Q_{1,h}$ d'un capteur solaire est divisée en trois catégories:

1) la perte de chaleur par le haut (Q_t):

$$\mathbf{Q}_t = \mathbf{S}_a \mathbf{U}_t (\mathbf{T}_{abs} - \mathbf{T}_a) \quad (\text{II-8})$$

Où

U_t Coefficient de perte de chaleur du haut du capteur (W/m² K)

2) la perte de chaleur par le haut Q_h :

$$\mathbf{Q}_b = \mathbf{S}_a \mathbf{U}_b (\mathbf{T}_{abs} - \mathbf{T}_a) \quad (\text{II-9})$$

Où

U_b Coefficient de perte de chaleur du fond du capteur (W/m² K)

3) la perte de chaleur par le haut Q_e :

$$\mathbf{Q}_e = \mathbf{S}_a \mathbf{U}_e (\mathbf{T}_{\text{abs}} - \mathbf{T}_a) \quad (\text{II-10})$$

Où

U_e Coefficient de perte de chaleur des parois périphériques du capteur ($W/m^2 K$)

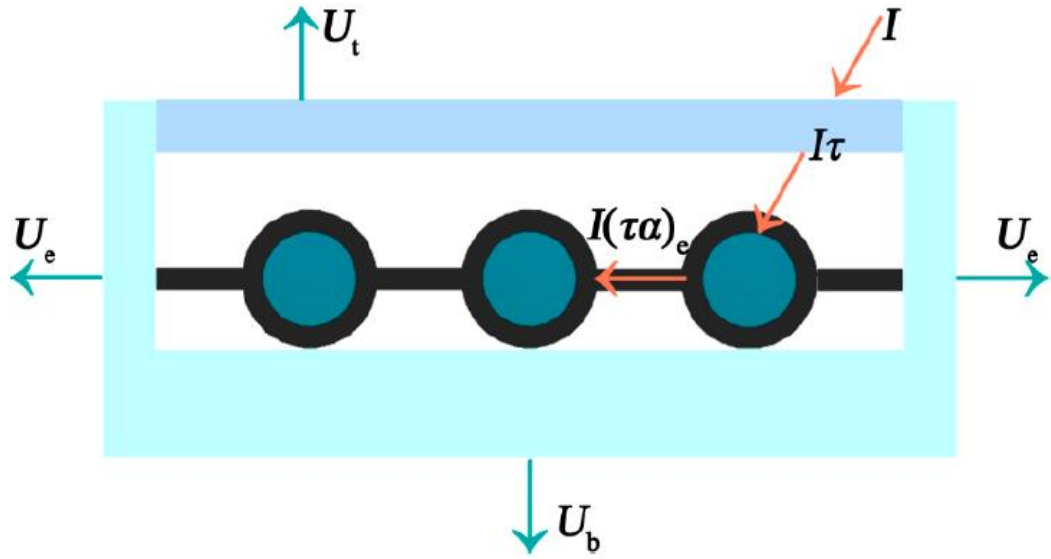


Figure II-3: Composition de la perte de chaleur totale d'un collecteur

La perte de chaleur totale d'un capteur solaire est donnée par la relation suivante:

$$Q_{1,h} = Q_t + Q_b + Q_e \quad (II-11)$$

Le coefficient de perte de chaleur du capteur total est donné par l'équation suivante:

$$U_L = U_t + U_b + U_e(S_e/S_a) \quad (II-12)$$

où:

S_a Surface d'ouverture du capteur (m^2)

S_e Surface des parois périphériques du capteur

Le calcul de ces coefficients de perte de chaleur nécessite la définition du processus de transfert de chaleur du capteur en fonctionnement, qui comprend principalement :

- Le transfert de chaleur radiatif (r) et convectif (conv) entre la surface externe du capot transparent (c_1) et le milieu ambiant (a),
- Le transfert de chaleur radiatif (r) et convectif (conv) entre la surface interne du couvercle transparent (c_2) et l'absorbeur (abs),

- c. Le transfert de chaleur par conduction (cond) entre l'absorbeur (abs) et le fond du collecteur (b),
- d. Le transfert de chaleur radiatif (r) et convectif (conv) entre le fond (b) et les parois latérales (e) et l'environnement ambiant (a).

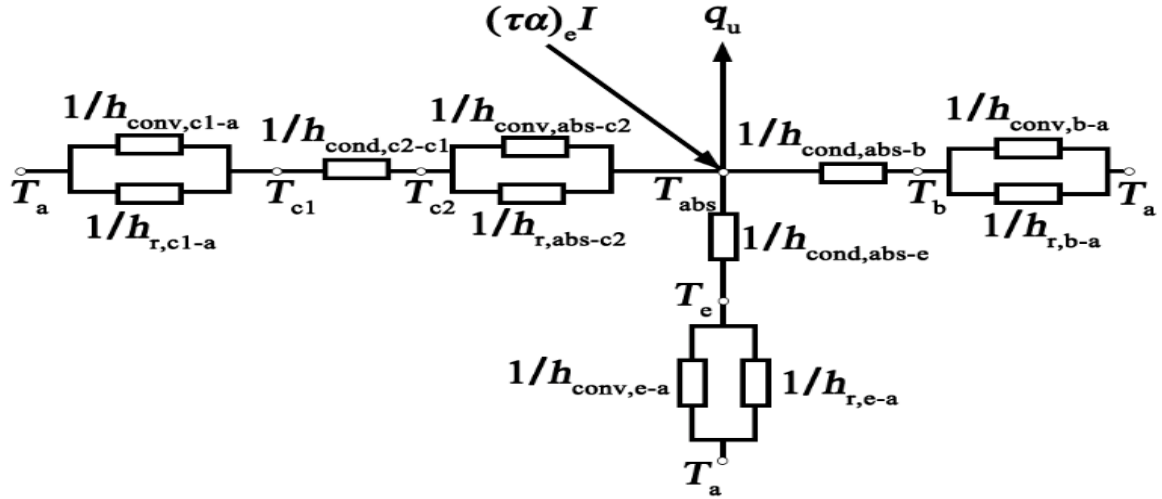


Figure II-4: Schéma en réseau thermique du capteur solaire

La Figure(II-4) montre la schématisation du réseau thermique qui peut être simplifiée en termes de résistance thermique entre les deux côtés. À partir de cette représentation simplifiée, des formules empiriques pour calculer le coefficient de perte de chaleur au sommet du collecteur U_t sont proposées dans l'équation (17) [24], lorsque la température moyenne de la plaque chauffante est comprise entre T_a et 200°C , l'erreur des formules est limitée à $0.3 \text{ W/m}^2.\text{K}$ [25].

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{c}{T_{abs}} \left(\frac{T_{abs} - T_a}{N+f} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_{abs} + T_a)(T_{abs}^2 + T_a^2)}{(\epsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N+f-1+0.133\epsilon_p}{\epsilon_c} - N} \quad (\text{II-13})$$

où

$$\begin{cases} c = \begin{cases} 520(1 - 0.000051\varphi^2), & 0^\circ < \varphi < 70^\circ \\ 392.6, & 70^\circ \leq \varphi < 90^\circ \end{cases} \\ f = (1 + 0.0892h_w - 0.1166h_w\epsilon_p)(1 + 0.07866N) \end{cases} \quad (\text{II-14})$$

$$\begin{cases} h_w = 5.7 + 3.8w \\ e = 0.43(1 - 100/T_{abs}) \end{cases} \quad (\text{II-15})$$

II.5 Facteur d'évacuation de chaleur du capteur (FR):

Cette grandeur donne le rapport entre l'énergie utile réellement gagnée par le capteur et celle gagnée par l'air. Elle peut être exprimée comme suit[26]:

$$F_R = \frac{q_m c_p}{S_a U_L} \left[1 - \exp \frac{S_a L_L F'}{q_m c_p} \right] \quad (\text{II-16})$$

où:

q_m est le débit massique du fluide,

S_a est la surface du capteur,

U_L est la perte thermique globale et c_p la chaleur massique du fluide

F' est le coefficient d'efficacité du capteur,

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \left\{ \frac{1}{U_{\perp} |D_o + (W - D_o) F|} + \frac{1}{h_1 \pi D_1} \right\}} \quad (\text{II-17})$$

Angle d'inclinaison du capteur solaire.

II.6 Orientation des capteurs solaires:

Pour recevoir un maximum de lumière solaire pendant les saisons sèches, les capteurs solaires sont inclinés de manière à être presque perpendiculaires aux rayons énergétiques. L'inclinaison des capteurs solaires permet une meilleure circulation de l'air et permet d'obtenir des performances thermiques optimales du capteur.

1- Inclinaison ou orientation d'un capteur solaire plat:

L'équation utilisée pour optimiser l'angle d'inclinaison est un modèle appelé modèle diffus Hyde-Davies-Klücher-Reindl (HDKR). Ce modèle HDKR estime le rayonnement total sur une surface inclinée comme suit[27]:

$$H_T = (H_b + H_d A_i) R_b + H_d (1 - A_i) \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) \left[1 + f \sin^3 \frac{\beta}{2} \right] + H \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II-18})$$

où:

H_b est le rayonnement total du faisceau sur une surface horizontale, β est l'angle d'inclinaison de la surface, H est le rayonnement solaire mensuel quotidien sur une surface

horizontale, H_d est le rayonnement diffus total Rayonnement sur une surface horizontale, R_b est le facteur géométrique.

H_T est le rayonnement solaire sur une surface inclinée, f est la racine carrée du rapport entre le rayonnement direct et le rayonnement total, A_i est un indice d'anisotropie. Il est fonction de la transmittance de l'atmosphère pour le rayonnement direct, son expression est:

$$A_i = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (\text{II-19})$$

Notons que f est la racine carrée du rapport entre le faisceau et le rayonnement total donné comme suit :

$$f = \left(\frac{H_b}{\bar{H}}\right)^{1/2} \quad (\text{II-20})$$

où la composante du faisceau peut être calculée comme suit:

$$H_b = H - H_d \quad (\text{II-21})$$

2- Facteur géométrique R_b

Les surfaces inclinées vers l'équateur, dans les hémisphères Nord et Sud, présentent généralement un facteur géométrique de rayonnement solaire plus élevé que les surfaces horizontales, pour ces raisons [28]:

- a) **Exposition directe:** Incliner une surface vers l'équateur lui permet d'être plus perpendiculaire aux rayons du soleil pendant une grande partie de l'année. En effet, la trajectoire apparente du soleil dans le ciel suit généralement un axe est-ouest, et une inclinaison vers l'équateur aligne la surface plus étroitement sur cette trajectoire.
- b) **Augmentation du rayonnement intercepté:** Lorsqu'une surface est perpendiculaire aux rayons du soleil, elle intercepte le maximum de rayonnement solaire par unité de surface. Lorsque l'angle d'incidence (l'angle entre les rayons du soleil et la normale à la surface) augmente, la quantité de rayonnement interceptée diminue (selon la loi du cosinus).
- c) **Optimisation en fonction de la latitude:** L'angle d'inclinaison optimal pour maximiser la collecte d'énergie solaire sur une surface fixe est souvent proche de la latitude locale. Cela garantit un bon équilibre entre la capture du rayonnement en été et en hiver.

- Dans l'hémisphère nord, les surfaces sont généralement inclinées vers le sud, en direction de l'équateur.
- Dans l'hémisphère sud, les surfaces sont généralement inclinées vers le nord, en direction de l'équateur.

L'équation du modèle pour le facteur géométrique (R_b), qui représente le rapport entre le rayonnement solaire sur une surface inclinée et celui sur une surface horizontale, est essentielle au calcul de l'énergie solaire reçue par les surfaces inclinées. La forme spécifique de l'équation varie selon que l'on considère le rayonnement direct (faisceau) ou le rayonnement total (global), et elle varie également en fonction de l'échelle de temps (moyennes horaires, journalières ou mensuelles).

Pour le rayonnement direct (faisceau), le facteur géométrique instantané (R_b) est donné par le rapport du cosinus de l'angle d'incidence sur la surface inclinée (θ) au cosinus de l'angle zénithal solaire (θ_z):

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (\text{II-22})$$

où:

θ est l'angle entre le rayonnement du faisceau et la normale à la surface inclinée.

θ_z est l'angle entre le rayonnement du faisceau et la verticale (angle zénithal).

Le cosinus de l'angle d'incidence ($\cos\theta$) d'une surface inclinée d'un angle β par rapport à l'horizontale, avec un angle d'azimut de surface γ (mesuré depuis le sud, avec l'est positif et l'ouest négatif), est donné par :

$$\cos\theta = \sin\delta\sin\phi\cos\beta - \sin\delta\cos\phi\sin\beta\cos\gamma + \cos\delta\cos\phi\cos\beta\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\cos\omega + \cos\delta\sin\phi\sin\beta\cos\gamma\sin\omega + \cos\delta\sin\beta\sin\gamma\sin\omega \quad (\text{II-23})$$

Et le cosinus de l'angle zénithal solaire ($\cos\theta_z$) est:

$$\cos\theta_z = \sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega \quad (\text{II-24})$$

où:

- δ est l'angle de déclinaison solaire.
- ϕ est la latitude du lieu (positive pour l'hémisphère nord, négative pour l'hémisphère sud).

- β est l'angle d'inclinaison de la surface par rapport à l'horizontale (0° pour l'horizontale, 90° pour la verticale).
- γ est l'angle d'azimut de la surface. Pour les surfaces inclinées vers l'équateur :
 Dans l'hémisphère nord, $\gamma = 0^\circ$ (orientées vers le sud).
 Dans l'hémisphère sud, $\gamma = 180^\circ$ (orientées vers le nord).
- ω est l'angle horaire (0° à midi solaire, positif l'après-midi, négatif le matin, avec 15° par heure).

Pour le rayonnement direct moyen journalier ou mensuel, le facteur géométrique (R_b) est obtenu en intégrant ou en faisant la moyenne de r_b instantané sur la période étudiée. Des équations simplifiées et des corrélations existent souvent pour ces cas, prenant en compte les positions moyennes du soleil et les heures d'ensoleillement.

Pour les surfaces spécifiquement inclinées directement vers l'équateur:

Hémisphère Nord (orienté vers le sud, $\gamma = 0^\circ$):

$$\cos\theta = \sin\delta\sin(\phi - \beta) + \cos\delta\cos(\phi - \beta)\cos\omega \quad (\text{II-25})$$

Hémisphère sud (orienté vers le nord, $\gamma = 180^\circ$):

$$\cos\theta = \sin\delta\sin(\beta - \phi) + \cos\delta\cos(\beta - \phi)\cos\omega \quad (\text{II-26})$$

Dans ces cas, le facteur géométrique r_b devient :

$$r_b = \frac{\sin\delta\sin(\phi \mp \beta) + \cos\delta\cos(\phi \mp \beta)\cos\omega}{\sin\delta\sin\phi + \cos\delta\cos\phi\cos\omega} \quad (\text{II-27})$$

où le signe moins correspond à l'hémisphère nord et le signe plus à l'hémisphère sud.

Pour le rayonnement diffus et réfléchi par le sol, différents facteurs géométriques sont utilisés, impliquant souvent des facteurs de vue entre la surface et le ciel ou le sol. Pour le rayonnement total (global) sur une surface inclinée, les modèles combinent souvent le facteur géométrique de la composante directe avec des facteurs tenant compte des composantes diffuse et réfléchie, en utilisant divers modèles de transposition.

Il est important de noter que pour les applications pratiques, notamment pour les moyennes journalières ou mensuelles, des modèles simplifiés et des tables de correspondance sont souvent utilisés pour déterminer le facteur géométrique en fonction de la latitude, de l'angle d'inclinaison, de l'orientation de la surface et de la période de l'année.

II.7 Rendement du capteur (η)

Le rendement d'un capteur plan est défini comme étant le rapport entre l'énergie utile extraite par le fluide caloporteur est l'énergie incidente sur le capteur [29, 30].

$$\eta = \frac{Q_u}{I_G \cdot S_C} = \frac{Q_{mf} \cdot c_{pf} \cdot (T_s - T_e)}{I_G \cdot S_C} = \frac{\rho_f \cdot Q_{va} \cdot c_{pf} \cdot (T_s - T_e)}{I_G \cdot S_C} \quad (\text{II-28})$$

avec T_e et T_s en degré Kelvin

$$\rho_f = \rho_0 \cdot \frac{273}{273 + T_{sv}} \cdot \frac{P(Z)}{P_0} \quad (\text{II-29})$$

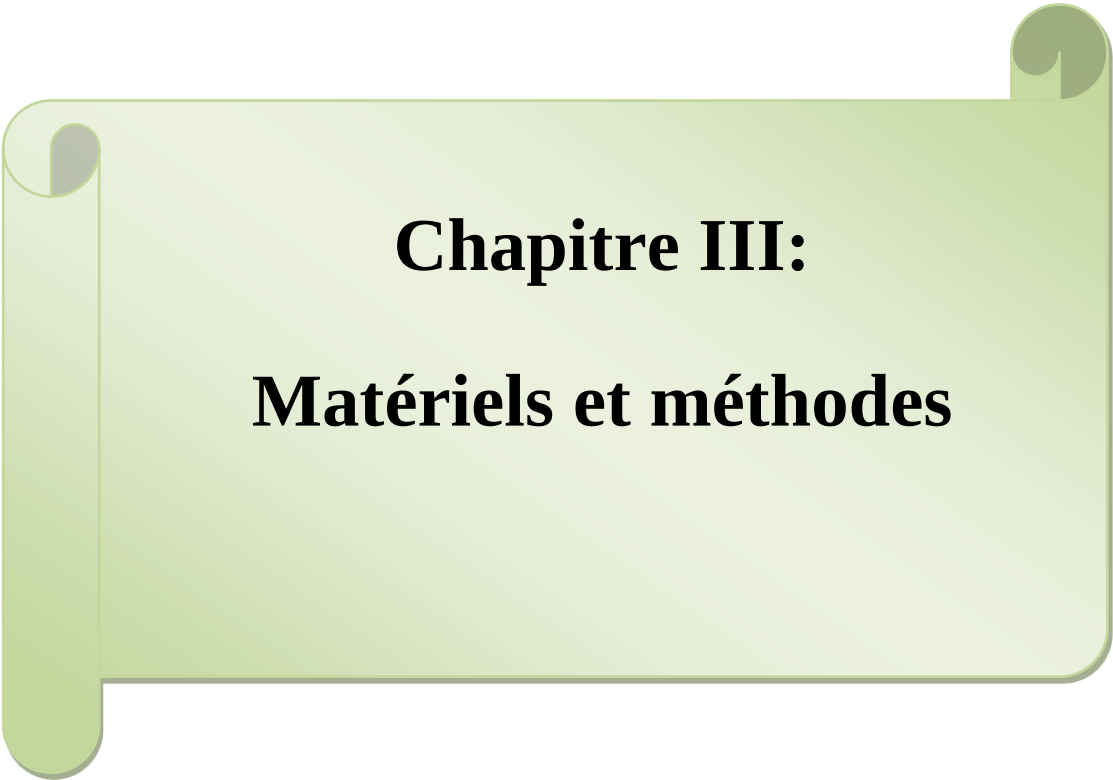
où:

$$P(Z) = P_0 \left[1 - \frac{6.50 \cdot Z}{288} \right]^{5.31} \quad (\text{II-30})$$

Le nombre 6.50 représente la quantité de diminution de température en degrés Celsius par kilomètre d'altitude dans la couche de l'atmosphère appelée troposphère. Cette couche est située directement au-dessus de la surface de la terre.

II.8 Conclusion

La modélisation mathématique présentée dans ce chapitre permet de développer un cadre analytique intégré pour évaluer la performance thermique d'un capteur solaire à air, en analysant les équations thermiques et les facteurs affectant le transfert d'énergie. Cette analyse a ouvert la voie à la compréhension de l'impact des caractéristiques de conception et de fonctionnement sur l'efficacité des appareils. Dans le chapitre suivant, les résultats expérimentaux seront utilisés pour comparer les performances de deux types de capteurs solaires : l'un conventionnel et l'autre avec rugosité artificielle, dans le but de valider le modèle mathématique et d'évaluer dans quelle mesure la rugosité améliore le transfert de chaleur et augmente l'efficacité.



Chapitre III:

Matériels et méthodes

Chapitre III: Matériels et méthodes

III.1 Introduction

Utiliser les outils de base dans toute étude expérimentale, notamment dans le domaine des énergies modernes. Dans ce chapitre, un aperçu détaillé de l'équipement utilisé de la méthode de mesure et des conditions expérimentales sera fourni pour comparer les performances d'un capteur solaire avec et sans nervures (rugosité artificielle).

III.2 Outils et équipements utilisés

III.2.1 Capteur solaire

Capteur solaire plan à air avec convection forcée à simple passage et simple vitrage. Et les composants du capteur sont:

- 1) **La couverture transparente:** verre d'épaisseur 4 mm (Figure III-1.A)
- 2) **L'absorbeur:** est une plaque de fer plate de dimensions $1 \times 0.6 \times 10^{-3} m^3$, peinte en noir mat pour réduire la réflexion. Un ventilateur est utilisé pour pousser et distribuer l'air (Figure III-1.B).

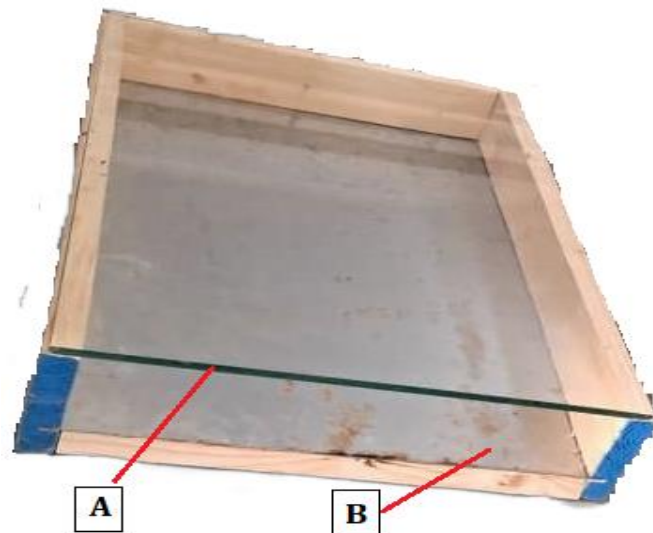


Figure III-1: La couverture et l'absorbeur du capteur plan à air

- 3) **Unisolant:** en polystyrène résistant aux températures plus grandes que 90°C et ayant une conductivité thermique (K_{is}) de 0.04 W/m.K .



Figure III-2: Isolation thermique du capteur plan à air

- 4) **Cadre ou tronc:** fabriqué en bois et doté d'une pioche en bas.



Figure III-3: Cadre de capteur plan à air

III.2.2 Thermocouples

Thermocouple de type T (cuivre/constantane): utilisé pour mesurer les températures de l'air d'entrée et de sortie et la température intérieure car c'est le type de thermocouple le plus courant. Il est peu coûteux, précis, fiable et dispose d'une large plage de températures. Le type K est couramment utilisé dans les applications nucléaires en raison de sa relative dureté aux radiations. Sa température maximale soutenue est d'environ 1100°C.

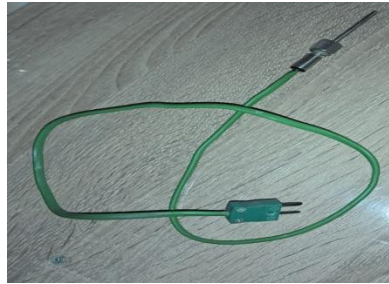


Figure III-4: *Thermocouple de type k*

III.2.3 Thermomètre

Afin de capturer les températures, un enregistreur de température "Lutron ICBTM-4208SD" à 12 canaux avec un dispositif d'entrée thermique a été utilisé, qui comprend :

- 1- Couples thermiques K, J, T, E, R et S
- 2- Précision 0.4% + 1°C
- 3- Enregistrement instantané avec des intervalles de 1 à 3600 secondes
- 4- Mode manuel - Appuyez sur le bouton pour enregistrer
- 5- Réglages de décalage pour l'étalonnage de la position
- 6- Transférer les données sur une carte SD pour analyse à l'aide d'un logiciel de tableur standard.
- 7- Téléchargement USB et logiciel PC en option
- 8- Alimenté par une batterie portable

Le grand écran rétro éclairé affiche 8 valeurs à la fois, puis les 4 valeurs restantes sur un autre écran.



Figure III-5: Thermomètre "Lutron ICBTM-4208SD"

Pour mesurer la vitesse du vent et le débit massique ainsi que la vitesse, on a utilisé un anémomètre thermique de type «LUTRON Model : AM- 4206M»



Figure III-6: Thermomètre "LUTRON AM- 4206M"

III.2.4 Pyranomètre(solari-mètre)

La mesure de l'éclairage solaire est assurée par un compteur de rayonnement solaire de type PYR1307. Ce type de compteur de rayonnement solaire possède un double cristal pour le protéger de l'environnement et également pour éviter les pertes de chaleur par convection.

Ainsi, la chaleur absorbée par le réseau thermique est convertie en un signal de tension proportionnel au rayonnement solaire.



Figure III-7:Pyranomètre" PYR1307"

III.3 Méthodes de mesure

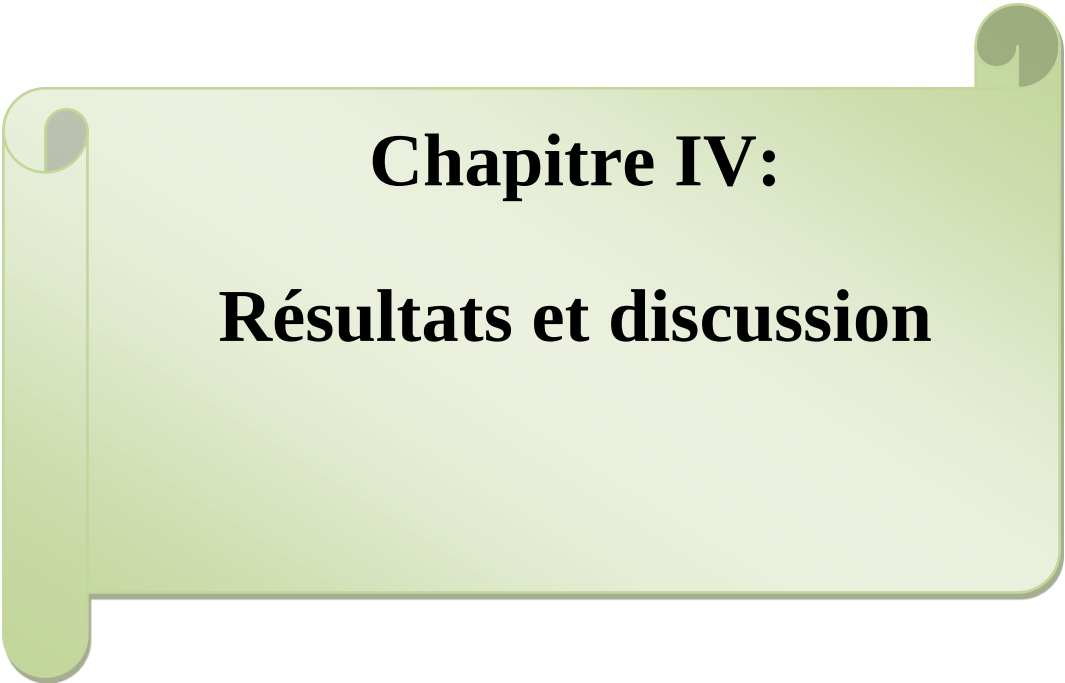
1. Configuration du système : Les trois différents capteurs (un capteur conventionnel et deux capteurs avec des chicanes de formes différentes) ont été installés en position fixe à un angle d'inclinaison de 30° dans la Wilaya d'El Oued, (9VW5+8G5, N48, Algérie), comme indiqué sur la figure, afin de comparer leurs performances.
2. Des sondes thermiques sont réparties à l'entrée, à la sortie et à l'entrée du capteur solaire pour assurer la précision des mesures.
3. La température de l'air, la vitesse du vent (si disponible) et l'intensité du rayonnement solaire ont été enregistrées à l'aide des appareils mentionnés ci-dessus.
4. Le système est retiré et le capteur est laissé en fonctionnement pendant la journée dans des conditions météorologiques appropriées (une journée ensoleillée sans vent)
5. Enregistrement des données : Les mesures sont enregistrées toutes les 15 minutes, pendant une période s'étendant de 8h à 16h.
6. La même expérience est réalisée deux jours différents, le premier en plaçant les barrières en lignes parallèles et le second en plaçant les barrières de manière ramifiée



Figure III-8:*Installation expérimentale*

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les outils et techniques utilisés pour mener l'expérience à bien, outre de la méthodologie utilisée pour mesurer et enregistrer les données qui représentent une base objective pour analyser les performances thermiques du capteur solaire à plaque plane. Ces données nous permettront de faire une comparaison précise entre la existence et l'absence de barrières (ou rugosité artificielle), qui sera abordée en détails dans le prochain chapitre à travers une discussion et une analyse des résultats empiriques pour évaluer l'impact des obstacles sur l'efficacité du capteur.



Chapitre IV:

Résultats et discussion

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1 Introduction

Après avoir réalisé les expériences pratiques et collecté les données selon la méthodologie et les outils décrits dans le chapitre précédent, ce chapitre est consacré à la présentation des résultats expérimentaux liés aux performances du capteur solaire plat en présence et en l'absence de barrières internes. Ces résultats seront analysés pour évaluer l'effet des barrières sur divers paramètres thermiques, tels que la température du fluide, l'efficacité thermique et l'intensité des pertes de chaleur. La discussion comprend également une comparaison des résultats avec des études précédentes. Cette analyse vise à tirer des conclusions précises qui soutiennent les objectifs de recherche et contribuent à améliorer les performances des systèmes solaires thermiques.

IV.2 Première expérience: Chicanes placées en séquence

Les mesures à partir de 8h30 jusqu'à 16h30 avec un pas dans université EchahidHamma Lakhdar d'El-Oued dans le jour 12/05/2025

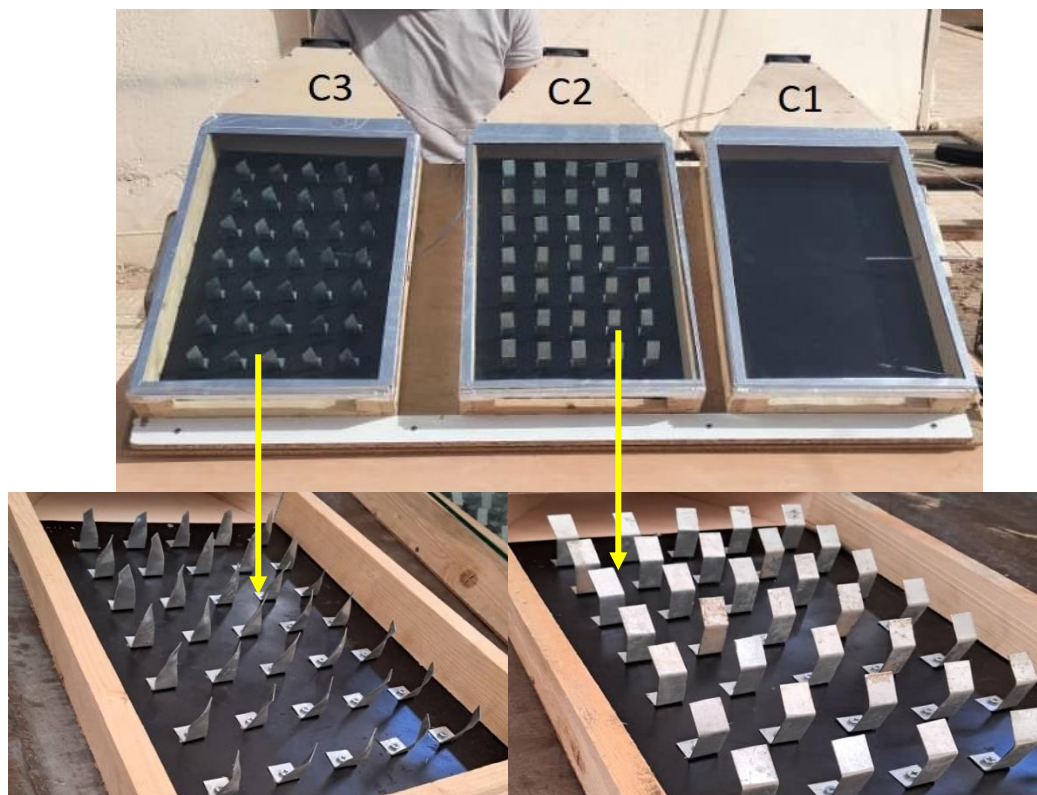


Figure IV-1: capteurs solaires pour la première expérience

IV.2.1 Distribution de la température à l'intérieur du capteur en fonction de la température ambiante:

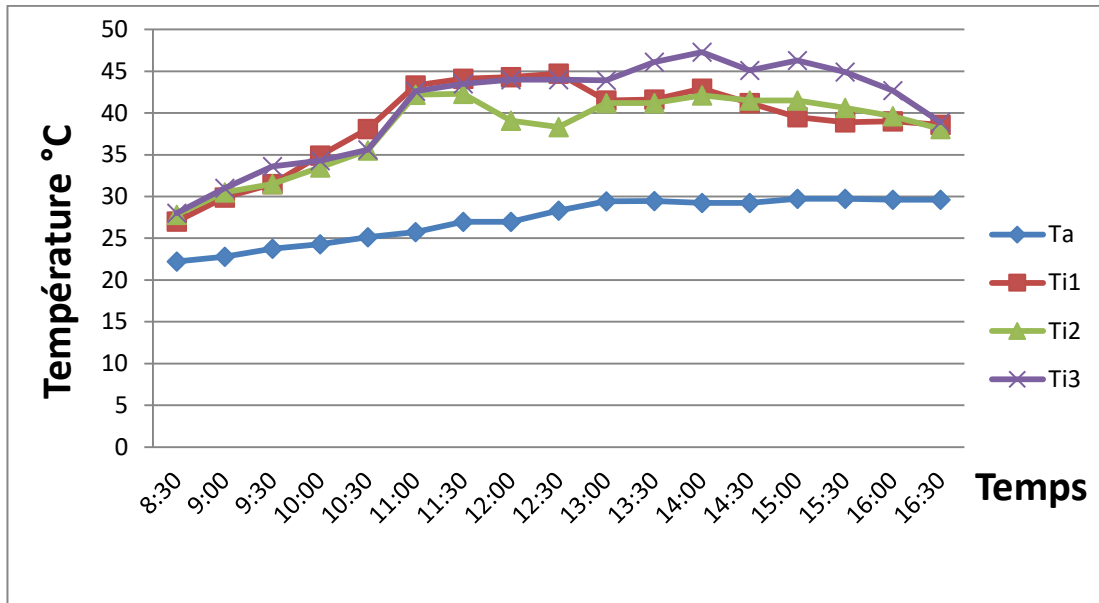


Figure IV-2: Variations de température en fonction du temps

La figure (IV-1) montre l'évolution des températures au cours de la journée pour différents types de capteurs solaires par rapport à la température de l'air (T_a). Nous observons que la température de l'air extérieur (T_a) augmente progressivement jusqu'à se stabiliser autour de 30°C en milieu de journée, tandis que les températures des capteurs dépassent nettement cette limite, confirmant l'efficacité de l'absorption de l'énergie solaire et de sa conversion en énergie thermique.

Le capteur conventionnel (Ti1) présente des performances thermiques stables, avec une température maximale d'environ 44°C à midi.

En revanche, une amélioration significative des performances thermiques du capteur à chicanes Ti2 est observée, car il chauffe plus rapidement le matin que Ti1, avec une température maximale d'environ 45°C.

Le collecteur à chicanes modifiées (Ti3) a enregistré la température la plus élevée parmi les trois modèles, dépassant 47°C, démontrant l'efficacité de la conception à chicanes pour améliorer le transfert de chaleur et réduire les pertes. En général, il est clair que l'introduction de déflecteurs dans le capteur solaire améliore considérablement les performances thermiques, notamment grâce à une forme et une conception améliorées, comme c'est le cas avec Ti3.

Cela reflète l'importance de l'aspect technique dans la conception des capteurs solaires pour atteindre une efficacité thermique maximale.

IV.2.2 Quantité d'énergie utile (Q_U)

(Densité de l'air) $\rho = 1.13 \text{ kg/m}^3$

(Vitesse de l'air) $v = 1.95 \text{ m/s}$

(Surface du capteur solaire) $A = 83.3 \text{ m}^2$

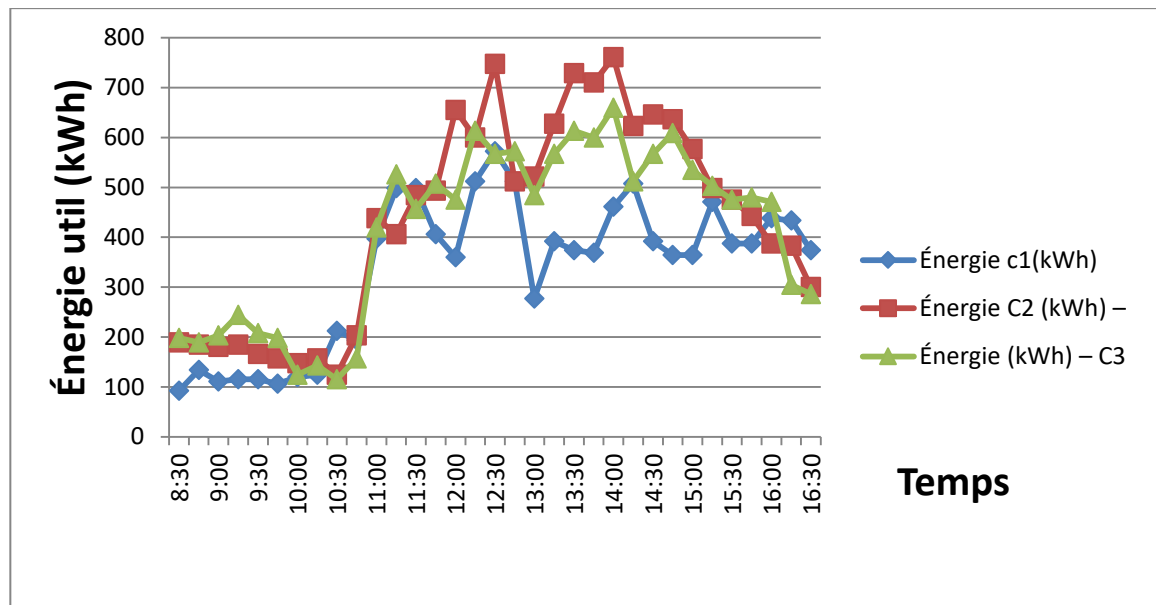


Figure IV-3: Variation de la quantité d'énergie utile de capteur

La Figure IV-2 montre l'évolution de l'énergie utile (en kWh) extraite de trois types de capteurs solaires au cours de la journée, représentée comme suit:

- Énergie C1: Représente le capteur solaire traditionnel.
- Énergie C2: Représente le capteur solaire à chicanes.
- Énergie C3: représente le complexe avec des barrières améliorées (modification de la forme ou du nombre de barrières).

1- Spectacle du matin (8h30 à 10h30):

Tous les complexes enregistrent une faible puissance en raison du faible rayonnement solaire du matin. C3 surpasse légèrement C2 et C1, indiquant sa réponse plus rapide aux radiations.

2- La période de 11h00 à 14h30 (pic de production):

C2 (carré rouge) enregistre les valeurs d'énergie utile les plus élevées, notamment en milieu de journée, où elle dépasse les 700 kWh.

C3 (vert) arrive en deuxième position, avec une performance très régulière et serrée.

C1 (bleu) reste sensiblement en retrait, ce qui reflète sa faible efficacité de capture de chaleur.

3- Après 14h30 jusqu'à 16h30:

On observe une baisse progressive des performances de tous les systèmes en raison de la diminution de l'angle et de l'intensité du rayonnement solaire.

C2 et C3 continuent de surperformer, mais la différence entre les trois systèmes se réduit progressivement.

IV.2.3 Efficacité du capteur solaire (η)

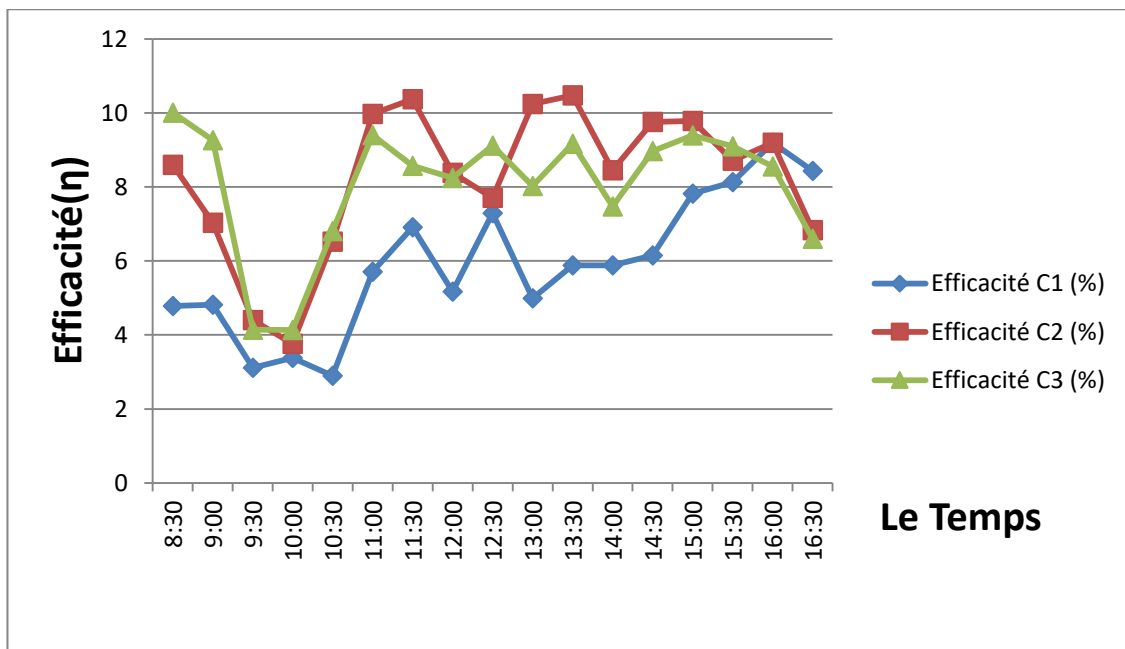


Figure IV-4: l'évolution de l'efficacité des trois capteurs solaires (C1, C2, C3) en fonction du temps

La figure (IV-3) montre l'évolution de l'efficacité des trois capteurs solaires (C1, C2, C3) en fonction du temps, ce qui représente les performances de chaque système tout au long de la journée :

- C1 (Capteur solaire conventionnel):

- Montre moins d'efficacité par rapport aux autres collecteurs tout au long de la période.
- Fluctuation notable des performances, surtout le matin.
- Amélioration relative à partir de midi.

- C2 (Capteur solaire avec barrières):

Performances relativement bonnes, avec une efficacité maximale entre 11h00 et 14h00. Il est considéré comme le plus stable et le plus efficace la plupart du temps.

- C3 (capteur solaire avec différents déflecteurs):

Son efficacité est similaire à celle du C2, mais avec parfois de légères fluctuations.

Parfois, il surpasse C2, surtout au début et à la fin de la journée.

IV.3 Deuxième expérience: Chicanes placées en quinconce

Du même pour cette deuxième expérience, les mesures sont collectées à partir de 8h30 jusqu'à 16h30 avec un pas d'un quart d'heure, et le lieu était le siège de l'unité de développement des énergies renouvelables dans les zones arides de l'université d'El-Oued le jour du 17 mai 2025.



Figure IV-5: Deuxième configuration expérimentale du système

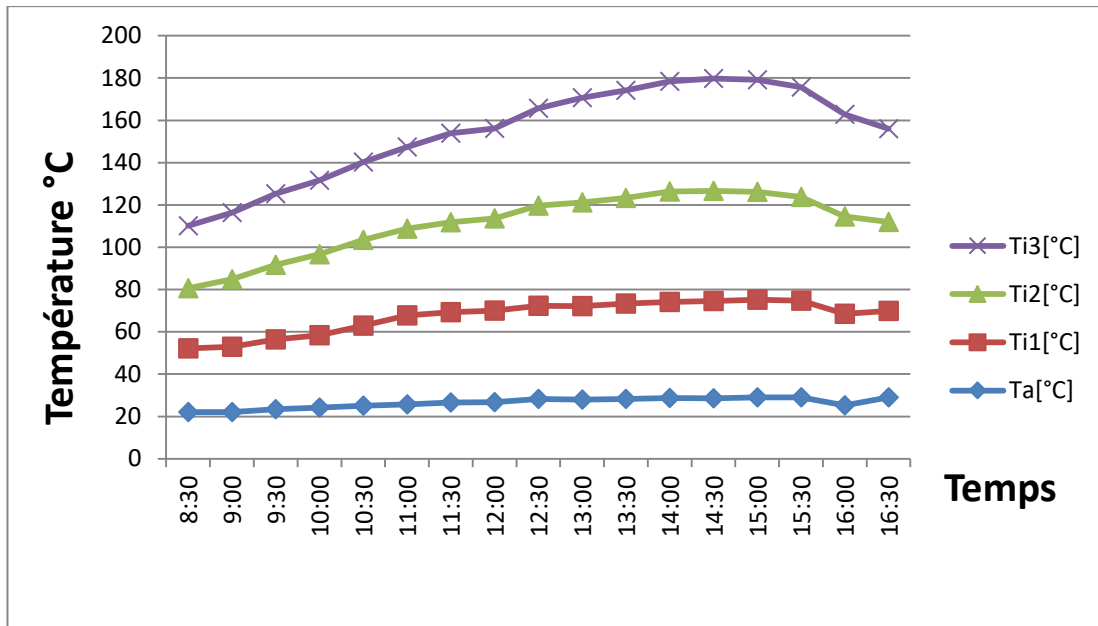


Figure IV-4: Variations de température en fonction du temps de la deuxième expérimentation

La Figure (IV- 4) montre un graphique montrant les changements de température au fil du temps pour trois capteurs solaires. Nous pouvons voir que la température ambiante (T_a) reste relativement stable tout au long de la journée, fluctuant légèrement entre 20 et 30°C environ.

Le capteur solaire conventionnel ($Ti1$) présente une montée progressive de la température, culminant entre 75 et 77°C l'après-midi, puis diminuant progressivement. Le capteur solaire $Ti2$ maintient constamment une température plus élevée que $Ti1$, atteignant un pic à 125-127°C l'après-midi. Le capteur solaire à chicanes vrillées ($Ti3$) atteint les températures les plus élevées parmi tous les capteurs, culminant à environ 178-180°C l'après-midi avant de diminuer progressivement.

Cela indique que les capteurs solaires à barrière ($Ti2$ et $Ti3$) sont plus efficaces pour atteindre et maintenir des températures plus élevées que le capteur solaire conventionnel ($Ti1$), $Ti3$ étant le plus efficace des trois en termes de collecte de chaleur.

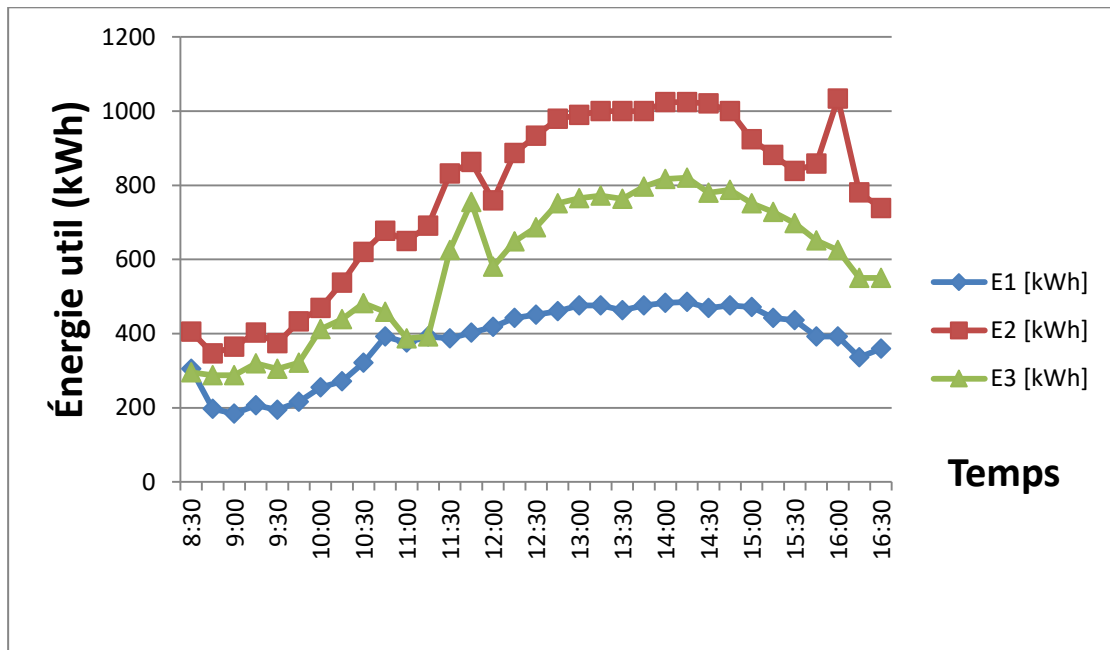
IV.3.1 Quantité d'énergie utile (Q_U)

Figure IV-5: Evolution de la quantité d'énergie utile pour les différents capteurs solaires plande la deuxième expérimentation

La Figure (IV-5) montre un graphique des résultats d'énergie thermique utile (Énergie utile) en kWh pour les trois capteurs (E1, E2, E3) pendant la journée du 17 mai 2025, commençant de 8h30 à 16h30.

E2 (ligne rouge - carrés):

Affiche les meilleures performances en termes de production d'énergie thermique. Elle atteint une valeur maximale stable entre 12h30 et 14h30, puis commence à diminuer progressivement.

Cela suggère que la distribution particulière dans ce complexe (peut-être le plus organisé ou le plus efficace thermiquement) assure une plus grande extraction d'énergie pendant la période de pic solaire.

E3 (ligne verte - triangles):

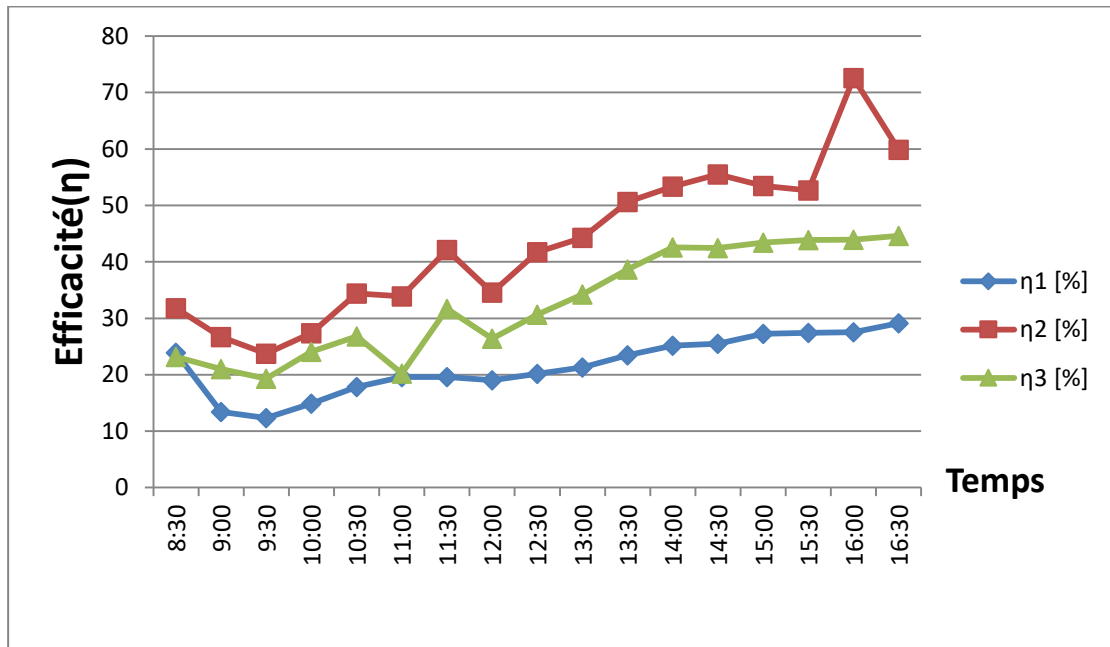
Ses performances sont incomparables, affichant une réponse thermique bonne et avancée par rapport à l'E1. Cela indique une nette amélioration du transfert ou de la distribution de chaleur au sein du capteur solaire.

On observe un pic brutal à 11h30, puis un retour à la stabilité, ce qui peut indiquer un changement des conditions opérationnelles ou environnementales (comme une amélioration soudaine de l'intensité du rayonnement solaire ou un courant d'air bénéfique).

E1 (ligne bleue – losanges):

C'est le moins efficace, et ce complexe peut être sans barrières ou avec des barrières dirigées de manière moins efficace. Sa courbe montre une montée lente puis une stabilisation à un niveau relativement bas, reflétant un mauvais transfert de chaleur ou une mauvaise absorption du rayonnement solaire.

IV.3.2 Efficacité des capteurs solaires (η)



FigureIV-6: l'évolution de l'efficacité thermique (η) de la deuxième expérimentation

La FigureIV-6 montre l'évolution de l'efficacité thermique (η) des trois capteurs solaires (η_1 , η_2 , η_3) au cours de la deuxième période d'expérimentation de 8h30 à 16h30.

η_2 (ligne rouge – carrés):

C'est la conception la plus efficace tout au long de la journée. Son efficacité commence à environ 30 % et augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale d'environ 65 % à 16h00, puis diminue légèrement. Ces excellentes performances indiquent que sa conception barrière améliore le transfert de chaleur et réduit les pertes de chaleur.

η_3 (ligne verte – triangles):

Il se classe au deuxième rang en termes d'efficacité. Une courbe régulière et croissante apparaît d'environ 20 % le matin à environ 45 % l'après-midi. Les performances sont bonnes mais inférieures à celles de η_2 , ce qui indique que la distribution de barrières était bénéfique mais pas autant que dans η_2 .

 η_1 (ligne bleue – losanges):

Son efficacité est moindre tout au long de la journée, allant de seulement 13% à 28%.

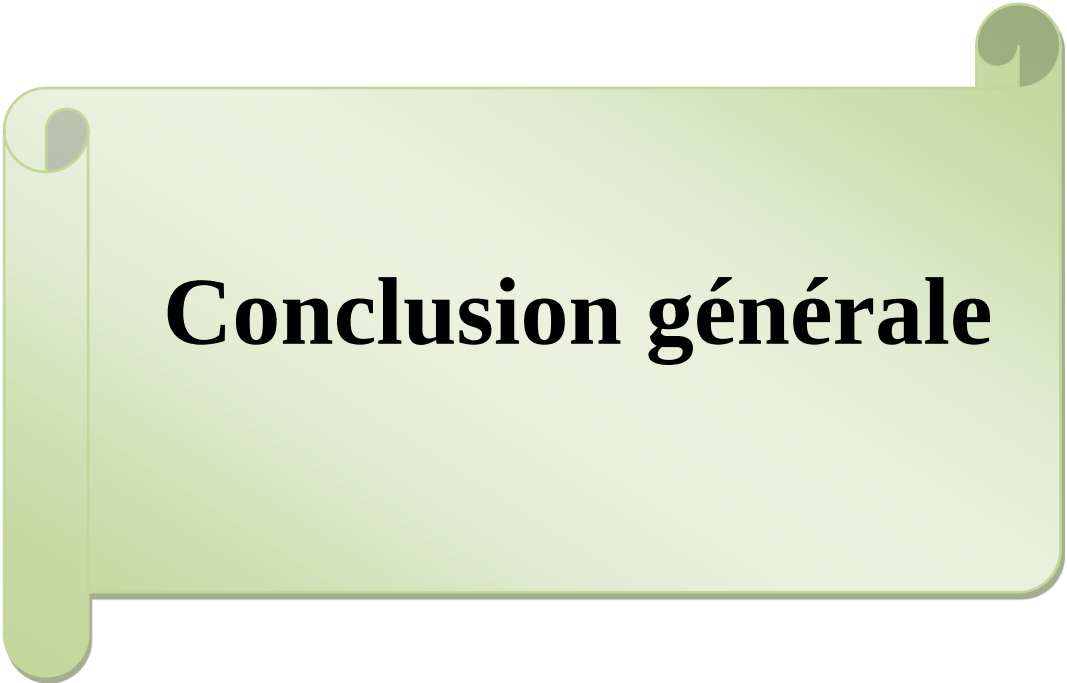
On suppose que ce complexe est soit dépourvu de chicanes, soit doté d'une distribution inefficace des chicanes, ce qui entraîne d'importantes pertes de chaleur et une récupération d'énergie réduite.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, les performances thermiques des trois capteurs solaires sont analysées en fonction de la variation de température, de l'énergie thermique extraite et de l'efficacité thermique. L'étude a montré que la distribution de la température à l'intérieur des capteurs est clairement affectée par la température ambiante, le capteur à chicanes (C2) et le capteur à chicanes vrillées (C3) enregistrant de meilleures performances thermiques par rapport au capteur conventionnel (C1).

Les résultats ont également montré que l'énergie thermique utile extraite des capteurs C2 et C3 était plus élevée pendant les périodes de pointe, démontrant l'efficacité des barrières pour améliorer l'absorption et le stockage de l'énergie solaire. En termes d'efficacité thermique, la configuration C2 a maintenu des niveaux de performance relativement stables et élevés, suivi du C3, tandis que la configuration C1 est arrivée en dernier, renforçant l'importance d'améliorer la conception technique des capteurs solaires pour augmenter leur efficacité.

Sur la base de ces résultats, on peut affirmer que l'inclusion de barrières dans le capteur solaire est une option efficace pour améliorer les performances thermiques et représente une étape importante vers la conception de capteurs plus efficaces pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique utilisable.



Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude expérimentale a été menée afin d'évaluer l'influence de l'intégration de cloisons longitudinales dans un capteur solaire plan sur ses performances thermiques, en comparaison avec un capteur de référence sans obstacles internes. Les résultats obtenus ont mis en évidence une amélioration significative du rendement thermique grâce à la présence de ces cloisons, qui ont favorisé une meilleure répartition des températures à l'intérieur du capteur.

Dans la première expérience, les chicanes étaient régulièrement réparties en lignes parallèles, ce qui a amélioré l'écoulement du fluide caloporteur et modérément augmenté l'énergie extraite par rapport à un capteur sans chicanes.

Dans la seconde expérience, une répartition dispersée des chicanes a été utilisée, et les résultats ont montré une amélioration significative des performances thermiques. Le capteur à chicanes dispersées (T3) a enregistré la température de sortie maximale la plus élevée, d'environ 67 °C, contre 53 °C pour le capteur T2 et seulement 45 °C pour le capteur conventionnel T1. En termes d'énergie thermique utile (QU), le complexe T3 a atteint une production journalière moyenne de plus de 950 kWh, tandis que T2 n'a pas dépassé 800 kWh et que T1 est resté inférieur à 500 kWh pendant les mêmes périodes.

L'efficacité thermique du complexe T3 a atteint plus de 60 % en période de pointe, contre 50 % pour T2 et 27 % pour T1.

Ces résultats confirment que l'amélioration de la conception interne du complexe solaire, notamment la répartition des barrières, est un moyen efficace et pratique d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie solaire, notamment dans les zones à fort rayonnement, comme la vallée..

Cependant, l'analyse a également révélé certaines limites inhérentes à la disposition linéaire des cloisons, notamment la formation possible de zones stagnantes susceptibles de nuire à l'uniformité thermique. Ces constats soulignent l'importance cruciale de la conception interne du capteur dans l'optimisation de son fonctionnement.

Dans cette perspective, les résultats de ce travail constituent une base pertinente pour des études futures portant sur l'optimisation géométrique des cloisons (forme, emplacement, densité), en vue de maximiser l'efficacité énergétique tout en minimisant les pertes thermiques. Ainsi, cette recherche ouvre la voie à de nouvelles approches dans le développement de capteurs solaires thermiques performants, adaptés aux conditions climatiques locales et répondant aux exigences de durabilité et de rentabilité énergétique.

Références
bibliographiques

Références bibliographiques

1. Bilal, B., H. Ibtissem Karima, and M. Nacer, *Modélisation d'un Capteur Photovoltaïque/Thermique*.2018.
2. Organization, W.M., *Commission for Instruments and Methods of Observation: Eighth Session, Mexico City, 19-30 October 1981: Abridged Report with Resolutions*. 1981: Secretariat of the World Meteorological Organization.
3. Hanif, M.A., et al., *Renewable and Alternative Energy Resources*. 2021: Academic Press.
4. Bataineh, K., *Optimization analysis of solar-powered average temperature Stirling heat engine*. 2015. **26**(1): p. 55-66.
5. Blanco, M. and S. Miller, *Introduction to concentrating solar thermal (CST) technologies*, in *Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology*. 2017, Elsevier. p. 3-25.
6. Carrión-Chamba, W., W. Murillo-Torres, and C.T. Montero-Izquierdo, *A review of the state-of-the-art of solar thermal collectors applied in the industry*. 2022(27): p. 59-73.
7. Energy, u.s.d.o. *Power Tower System Concentrating Solar-Thermal Power Basics*. 2025; Available from: <https://www.energy.gov/eere/solar/power-tower-system-concentrating-solar-thermal-power-basics>.
8. Purohit, I., and E. Sciences, *Solar thermal power generation*. 2019.
9. Yousef, B., et al., *Chapter 1.2 - Development of solar thermal energy systems*, in *Renewable Energy - Volume 1 : Solar, Wind, and Hydropower*, A.G. Olabi, Editor. 2023, Academic Press. p. 23-43.
10. Kumar, V., et al., *Fresnel lens: A promising alternative of reflectors in concentrated solar power*. 2015. **44**: p. 376-390.
11. Suman, S., M.K. Khan, and M. Pathak, *Performance enhancement of solar collectors—A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. **49**: p. 192-210.
12. Rubbi, F., et al., *State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application*. 2021. **230**: p. 111220.
13. Das, L., et al., *Improved thermophysical properties and energy efficiency of aqueous ionic liquid/mxene nanofluid in a hybrid pv/t solar system*. 2020. **10**(7): p. 1372.
14. Chow, T. and W. He, *Photovoltaic-thermal collector system for domestic application*. 2007.
15. Wikipedia. *Photovoltaic thermal hybrid solar collector*. 27 December 2024, ; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_thermal_hybrid_solar_collector.
16. Rahi, M.R., et al., *Studying the improvement of solar collector mechanism with phase change materials*. 2024. **17**(6): p. 1432.
17. Shoeibi, S., et al., *Recent advancements in applications of encapsulated phase change materials for solar energy systems: A state of the art review*. 2024. **94**: p. 112401.

18. Deng, Y., et al., *Experimental investigation of performance for the novel flat plate solar collector with micro-channel heat pipe array (MHPA-FPC)*. 2013. **54**(2): p. 440-449.
19. Tyagi, V., et al., *Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology*. 2012. **16**(3): p. 1383-1398.
20. Hudon, K., *Chapter 20 - Solar Energy – Water Heating*, in *Future Energy (Second Edition)*, T.M. Letcher, Editor. 2014, Elsevier: Boston. p. 433-451.
21. Rubbi, F., et al., *State-of-the-art review on water-based nanofluids for low temperature solar thermal collector application*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2021. **230**: p. 111220.
22. Muhammad, M.J., et al., *Thermal performance enhancement of flat-plate and evacuated tube solar collectors using nanofluid: A review*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2016. **76**: p. 6-15.
23. Ding, D., W. He, and C.J.E. Liu, *Mathematical modeling and optimization of vanadium-titanium black ceramic solar collectors*. 2021. **14**(3): p. 618.
24. Helvaci, H., Khan, and Management, *Mathematical modelling and simulation of multiphase flow in a flat plate solar energy collector*. 2015. **106**: p. 139-150.
25. Wagner, T.J. and I. Eisenman, *False alarms: How early warning signals falsely predict abrupt sea ice loss*. 2015. **42**(23): p. 10,333-10,341.
26. Duffie, J.A., W.. Beckman, and N. Blair, *Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind*. 2020: John Wiley & Sons.
27. Kim, Y.D., et al., *Thermal analysis and performance optimization of a solar hot water plant with economic evaluation*. 2012. **86**(5): p. 1378-1395.
28. Renogy, *What is the Best Angle for Solar Panels? Maximizing the Efficiency*, renogy, Editor. Jun 17th 2024.
29. Abdi, H. and N Ait Messaoudene, *Etude Expérimentale et Théorique des Performances de deux Capteurs Plans à Contact Direct Eau-Plaque d’Absorption*. 2000: p. 53-60.
30. Semmar, D., S. Betrouni, and D. Lafri, *Etude et Réalisation d’un Capteur Solaire à Air’*. 1998: p. 33-38.