

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et de la technologie

Département d'Automatique

Et d'Electromécanique

MEMOIRE DE MASTER

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en

Filière : Electromécanique.

Spécialité : Maintenance Industrielle.

Présenté par :

- REDDAH Djaber
- KHAIROUNE Lyes

Thème

**Contribution à l'étude de transfert de
chaleur d'un capteur solaire plan á
air double passe**

Soutenu publiquement le : 20/06/2023

Jury de soutenance :

Mr. AZAWI Mohamed

Président

Mr. BOUAROUR Kamel

Examineur

Mr. BEN SADDIK Abdelouahab

Examineur

Mr. AISSAOUI Fares

Encadreur

Promotion : 2022-2023



REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier **ALLAH**, le tout puissant de nous avoir donné courage et volonté pour accomplir ce modeste travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice de mémoire « **M. Aissaoui Fares** » Je la remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

Nos remerciements vont également à l'ensemble de nos enseignants de la spécialité maintenance industrielle à notre formation.

Nous tenons à remercier les membres du jury qui ont pris la peine d'évaluer notre travail.

Enfin, nous tenons à remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



DEDICACE

On dédie ce modeste travail à nos très chers parents
pour leur encouragement et soutien et pour leur
patience A nos frères et sœurs

A nos familles : REDDAH, KHAIRON,
BOURAS et KOUMNI

A toute nos amis et nos collègues de la promotion
Maintenance Industrielle

DJABER, LYES

Sommaire

Sommaire	1
Liste de figure	3
Nomenclature	4
Résumé	6
Introduction générale	8

Chapitre I

Généralité sur les capteurs solaire

1. Introduction	9
2. Gisement solaire	9
2.1 L'énergie solaire	10
2.1.1 Origine	10
2.1.2 Caractères particuliers.....	11
2.1.3 Captation	11
2.2 Mouvement de la terre.....	12
3. Capteurs solaires à air	13
3.1 Description et fonctionnement du capteur solaire à air	13
3.2 Avantages et inconvénients	15
3.3 Applications des capteurs solaires à air.....	15
3.3.1. Chauffages et climatisation des habitations.....	16
3.3.2. Production de l'énergie mécanique.....	17
3.4 Différents types des capteurs solaires à air.....	17
3.4.1. Les capteurs à absorbeur perméable.....	17
3.4.2 Capteur à absorbeur à géométrie variable	18
3.4.3 Capteur solaire a absorbeur plan	18
4. Références bibliographiques	20

Chapitre II

Étude bibliographique

1. Introduction	21
2. Travaux de recherche sur les capteurs solaire à doubles passe	21
3. Conclusion	28
4. Références bibliographiques	29

Modélisation mathématique et simulation numérique

1. Introduction30

2. Modélisation de l’insolateur.....30

3. Modélisation mathématique des différents types des panneaux en régime stationnaire ..31

 3.1 Modélisation du capteur solaire double passe31

 3.1.1. Méthode de solution.....32

4. Modélisation des coefficients d’échange thermique.....33

 4.1. Transfert radiatif.....33

 4.2. Transfert convectif34

 4.2.1. Transfert convectif dû au vent35

 4.2.2. Transferts convectifs dans le capteur35

5. Les pertes thermiques36

 5.1. Perte l’arrière36

 5.2. Pertes à l’avant36

6. Rendement thermique et l’énergie utile (récupérée par le fluide caloporteur)37

7. Puissance absorbée37

8. Programme de calcul37

 8.1. Organigramme simplifié du programme principal d’un capteur à double passe38

9. Conclusion39

10. Références bibliographiques40

Chapitre IV

Résultats et discussions

1. Introduction41

2. Validation des résultats41

 2.2. Capteur solaire à air à double passe41

3. Conclusion48

Conclusion générale49

Liste de figure

Figure I.01 : Filière de conversion de l'énergie solaire	4
Figure I.02 : Mouvement de la terre autour du soleil.	5
Figure I.03 : Chauffages est climatisation des habitations.	8
Figure I.04 : Capteurs à absorbeur à perméable.....	9
Figure I.05 : Capteurs à absorbeur à géométrie variable	12
Figure I.06 : Ecoulements de l'air dans les capteurs solaires	11
Figure II.01 : Deux types de capteurs solaires à air à double passe selon la direction de l'écoulement.....	15
Figure II.02 : Schémas représentatifs de capteur étudié (écoulement contre-courant)	16
Figure II.03 : Les modèles des capteurs solaires à air.....	16
Figure II.04 : Vue de face et de haut d'u collecteur à air à double passe avec recyclage	17
Figure II.05 : Différents types des capteurs testés par Ozgen et al	18
Figure II.06 : Deux configurations plan et v-ondulé testées par El-Sebaï et al	19
Figure II.07 : Schéma de capteur solaire à air à double passe avec milieux poreux.....	20
Figure II.08 : Schéma de capteur solaire à air à double passe avec milieux poreux.....	20
Figure III.01 : Schématisation d'un panneau solaire à air double passe	25
Figure III.02 : Organigramme simplifié du programme principal d'un capteur solaire à double passe.	32
Figure IV.01 : Variation de la température de sortie en fonction le long du capteur solaire	36
Figure IV.02 : Variation de la température de sortie en fonction le long du capteur solaire	37
Figure IV.03 : Variation de la température de sortie en fonction de débit massique.	38
Figure IV.04 : Variation de la température de sortie en fonction de la hauteur du canal.	39
Figure IV.05 : variation de température de sortie en fonction de la température d'entrée	40
Figure IV.06 : Variation de la température de sortie en fonction de la longueur de collecteur	41

Nomenclature

Symboles	Définition	Unité
A_p	Surface du capteur	(m ²)
C_p	Capacité thermique	(J/kgk)
D_h	Diamètre hydraulique	(m)
d	Profondeur de canal	(m)
h_r	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement	(W/m ² K)
h_{nc}	Coefficient de transfert de chaleur par convection naturelle	(W/m ² K)
H	Coefficient de transfert par convection forcée	(W/m ² K)
I_g	Gisement global	(W/m ²)
K_{ins}	Conductivité thermique de l'isolant	(W/mK)
L	Longueur du collecteur	(m)
m	Débit massique	(Kg/s)
Q_u	Energie utile	(W)
Q_s	Energie stockée	(W)
T	Température	(C°)
U_L	Coefficient de perte thermique	(W /m ² K)
U_b	Coefficient de perte de chaleur de fond	(W/m ² K)
V_f	Vitesse de l'air	(m/s)
V_v	Vitesse de vent	(m/s)
W	Largeur du collecteur	(m)

Symboles grecs	Définition	Unité
η	Efficacité	-
σ	Constante Stefan Boltzmann	(W/m ² .K ⁴)
α	Coefficient d'absorption	-
ε	Emissivité.	-
μ_f	Viscosité de l'air	(Kg/m s ²)
ρ_f	Densité de l'air	(Kg/m ³)
k_f	Conductivité thermique de l'air	(W/m k)
δ	Epaisseur	(m)
r	Transmissivité de vitre	-

Indices

	Définition
1	Vitre
2	Absorbeur
3	Plaque inférieure
f, f_i, f_s	Fluide, fluide initiale, fluide sortie
s	Ciel

Nombres adimensionnels

Nu	Nombre de Nusselt
Re	Nombre de Reynolds

Résumé

Ce travail de thèse se concentre sur les énergies renouvelables et vise à quantifier les échanges thermiques à l'aide d'une étude numérique et d'une modélisation mathématique en régime stationnaire d'un capteur solaire à double passage. Les équations des bilans énergétiques ont été établies pour les différents composants des capteurs (la vitre, l'absorbeur, le fluide caloporteur et la plaque inférieure). Les systèmes d'équations ont été résolus à l'aide de la méthode des différences finies afin de calculer les températures de chaque élément des capteurs. De plus, une étude paramétrique détaillée des capteurs solaires à air a été réalisée, et la simulation numérique a été vérifiée à l'aide d'un programme Matlab. Les résultats obtenus ont démontré une augmentation de la température de l'air.

Abstract

This thesis focuses on renewable energies, and aims to quantify heat exchange using a numerical study and steady-state mathematical modeling of a double-pass solar collector. Energy balance equations have been established for the various collector components (glass, absorber, heat transfer fluid and bottom plate). The systems of equations were solved using the finite-difference method to calculate the temperatures of each collector element. In addition, a detailed parametric study of the solar air collectors was carried out, and the numerical simulation was verified using a Matlab program. The results showed an increase in air temperature.

ملخص

تركز هذه الأطروحة على الطاقات المتجددة، وتهدف إلى تقييم التبادل الحراري باستخدام دراسة عددية ونموذج رياضية للحالة المستقرة لمجمع شمسي مزدوج التمرير. تم وضع معادلات توازن الطاقة لمختلف مكونات المجمعات (زجاج، اللوحة الماصة، سائل نقل الحرارة واللوحة السفلية). تم حل أنظمة المعادلات باستخدام طريقة الفروق المحدودة لحساب درجات حرارة كل عنصر جامد. بالإضافة إلى ذلك، تم إجراء دراسة بارامترية مفصلة لمجمعات الهواء الشمسية، وتم التحقق من المحاكاة العددية باستخدام برنامج Matlab أظهرت النتائج زيادة في درجة حرارة الهواء.

Introduction générale

Depuis vingt-cinq ans, le monde fait face à une crise énergétique qui s'est aggravée récemment avec les fluctuations du prix du baril de pétrole, entraînant ainsi une hausse des prix des énergies conventionnelles telles que l'électricité et la chaleur. Les conséquences de cette crise se traduisent par des difficultés économiques pour les États et des conditions de vie précaires pour la population. Afin de faire face aux coûts élevés des énergies conventionnelles et à la pollution de l'atmosphère, il est impératif de se tourner vers les énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire. Cette dernière est une source d'énergie propre et inépuisable qui peut être utilisée efficacement dans de nombreux systèmes thermiques.

Les capteurs solaires sont en constante évolution et amélioration, et sont devenus une part importante de notre vie quotidienne. L'utilisation de l'énergie solaire convertie en chaleur dans l'industrie présente de nombreuses applications telles que le chauffage, le séchage, la production de froid, etc.

Notre objectif est d'étudier les performances thermiques des capteurs solaires plans en régime stationnaire, ainsi que les effets des paramètres internes et externes sur leur rendement instantané. Nous cherchons notamment à estimer les coefficients d'échange thermique locaux à partir des mesures de température des différents composants des capteurs solaires plans.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre aborde une étude du potentiel solaire, en présentant quelques notions et définitions astronomiques couramment utilisées dans le domaine solaire. Dans ce chapitre, nous examinerons également les différentes applications solaires et fournirons un aperçu général des technologies permettant de convertir l'énergie solaire en énergie thermique à l'aide de différents types de capteurs solaires.

Le deuxième chapitre est une synthèse bibliographique sur les différents travaux réalisés sur les capteurs solaire plan a air double passe

Le troisième chapitre se concentre sur la présentation des équations de bilan thermique pour les différents composants du capteur solaire à air double passe en régime stationnaire, accompagnée d'une simulation numérique du phénomène thermique.

Le dernier chapitre nous présentons les résultats et les discussions obtenus par simulation numérique par le logiciel Matlab

Chapitre I
Généralité sur les capteurs
solaire

1. Introduction

L'énergie solaire thermique est une technologie qui permet de convertir le rayonnement solaire en chaleur utilisable pour les besoins énergétiques. Cette énergie thermique peut être exploitée de deux manières : directement, via un système passif, ou indirectement, via un système actif.

Dans les systèmes passifs, la chaleur est captée et stockée dans des structures telles que des vérandas, des serres ou des façades vitrées. Ces structures agissent comme des capteurs solaires, capturant le rayonnement solaire et le transformant en chaleur qui est stockée et utilisée ultérieurement.

Les systèmes actifs, quant à eux, utilisent des dispositifs mécaniques pour transférer la chaleur captée vers un fluide caloporteur, qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou de l'air. Ce fluide est ensuite distribué vers les zones où l'énergie thermique est requise, par exemple pour chauffer l'eau sanitaire, chauffer les espaces de vie ou pour le séchage de produits agricoles.

En somme, l'énergie solaire thermique est une source d'énergie propre et renouvelable qui offre une alternative viable aux combustibles fossiles pour les besoins énergétiques de la société, tout en réduisant l'impact environnemental et en préservant les ressources naturelles.

2. Gisement solaire

La science du gisement solaire est une étude radiométrique et météorologique de l'atmosphère, qui comprend une analyse approfondie des aspects environnementaux tels que les niveaux d'énergie solaire au sol et leurs fluctuations saisonnières, les variations de l'humidité et de la pression atmosphérique dans le temps et l'espace, le régime des vents et d'autres paramètres climatiques pertinents.

En Algérie, les conditions météorologiques favorables offrent de grandes possibilités pour le développement de l'énergie solaire et éolienne. Les différentes formes de captation de l'énergie solaire peuvent être exploitées en fonction des modes de captation les plus adaptés, tels que les panneaux photovoltaïques pour la production d'électricité ou les systèmes de concentration pour la production d'énergie thermique.

L'étude du gisement solaire permet également de mieux comprendre les caractéristiques du climat local et de prédire la production d'énergie solaire à différentes périodes de l'année, ce qui est essentiel pour la planification et la mise en œuvre de projets d'énergie renouvelable.

En somme, l'exploitation du gisement solaire est une opportunité intéressante pour le développement durable de l'Algérie, car elle permet de produire de l'énergie propre et renouvelable tout en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles et en préservant les ressources naturelles.

2.1 L'énergie solaire

Le soleil est une source d'énergie inépuisable qui libère de l'énergie sous forme de rayonnement solaire, que ce soit directement ou indirectement. L'énergie solaire est d'une importance vitale pour la Terre, car elle est à l'origine du cycle de l'eau et du vent, ainsi que de la photosynthèse, qui permet au règne végétal de produire de l'énergie chimique. Cette énergie est également cruciale pour l'équilibre écologique, car elle est utilisée par les plantes et les animaux pour leur survie. De plus, grâce aux avancées technologiques, l'énergie solaire peut être convertie en une forme d'énergie utile pour l'activité humaine, comme la chaleur, l'électricité ou la biomasse. Ainsi, l'expression "énergie solaire" est souvent utilisée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique produite à partir du rayonnement solaire. L'utilisation de l'énergie solaire est un choix énergétique écologique et durable qui contribue à la préservation de l'environnement et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

2.1.1 Origine

Au cœur du soleil, les conditions extrêmes de température et de pression favorisent une interaction intense entre les atomes d'hydrogène, qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Ce processus implique la fusion de quatre noyaux d'hydrogène pour former un noyau d'hélium, libérant ainsi une immense quantité d'énergie sous forme de rayonnement gamma et X. En effet, chaque seconde, une quantité d'énergie équivalente à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium est libérée, ce qui équivaut à une quantité d'énergie impressionnante de $3,4 \times 10^{26}$ joules par seconde. Cette réaction de fusion thermonucléaire est essentielle pour maintenir la stabilité et la durée de vie du soleil, ainsi que pour la production de la lumière et de la chaleur qui sont nécessaires à la vie sur Terre.

2.1.2 Caractères particuliers

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes :

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1KW/m^2 à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 KW/m^2) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre.

2.1.3 Captation

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie comme il est éclairci sur la figure 1

• L'énergie solaire thermique

Le solaire thermique est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.

• L'énergie solaire thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques [3, 4]

Trois types principaux de centrales sont utilisés [3]

- Les centrales à capteurs cylindre-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus. - Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

• L'énergie solaire photovoltaïque

Elle est issue de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semiconductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

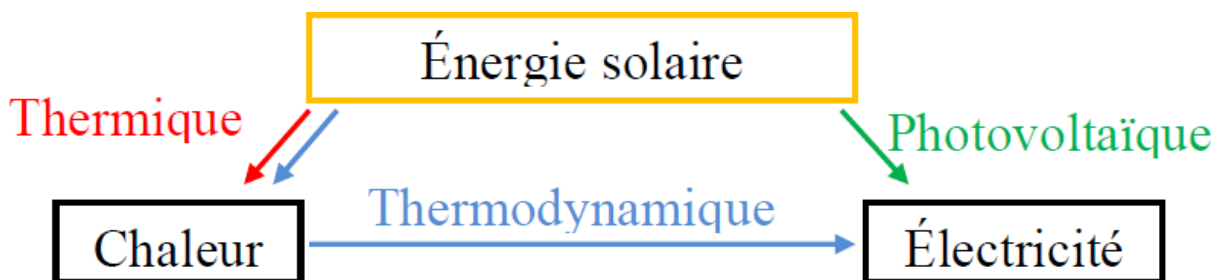


Figure I.01 : Filière de conversion de l'énergie solaire.

2.2 Mouvement de la terre

La figure 2 illustre le mouvement de la terre autour du soleil ainsi que sa rotation sur son axe. Les solstices et les équinoxes sont représentés par les quatre positions de la terre sur la figure. Il est important de remarquer que l'axe de rotation de la terre est incliné de 23°27' par rapport à la normale du plan de l'écliptique.

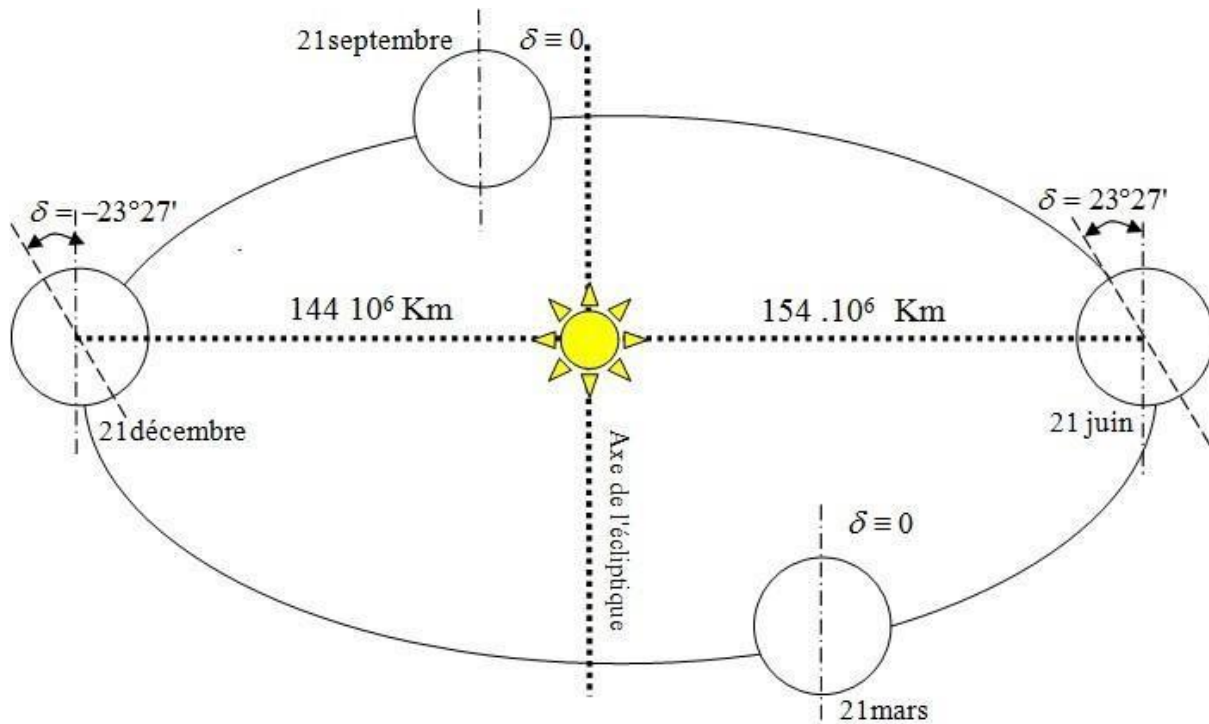


Figure I.02 : Mouvement de la terre autour du soleil.

3. Capteurs solaires à air :

3.1 Description et fonctionnement du capteur solaire à air

Les capteurs solaires plans à air sont conçus pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique à des températures basses à moyennes et pour transférer cette énergie à l'air qui les traverse. Leur technologie repose sur l'utilisation d'une surface absorbante, sélective ou non sélective, appelée absorbeur. Cette surface absorbe les rayons solaires et transfère une partie de cette énergie à l'air qui la traverse, tandis qu'une autre partie est réémise sous forme d'infrarouge. Pour maximiser leur efficacité, les meilleurs absorbeurs sont des surfaces hautement absorbantes dans le visible et faiblement émissives dans l'infrarouge.

Pour augmenter la température de l'absorbeur, une couverture alvéolée en polycarbonate est placée au-dessus de celui-ci. Cette couverture est transparente aux rayons solaires visibles et opaque à l'infrarouge, qu'elle absorbe et réémet vers l'absorbeur. Cette configuration permet de piéger les rayonnements entre l'absorbeur et la couverture, créant ainsi l'effet de serre et augmentant la température de l'absorbeur. Pour garantir une bonne isolation thermique, des parois recouvertes d'isolants thermiques sont utilisées pour les côtés et l'arrière du capteur.

Le fonctionnement du capteur solaire plan à air implique des échanges thermiques entre les différents composants du système, tels que la convection, la conduction et le rayonnement. Le système est également influencé par deux types de paramètres de fonctionnement : les paramètres intérieurs, qui sont liés aux caractéristiques du système lui-même, tels que la taille, la géométrie et la disposition des composants, et les paramètres extérieurs, qui sont liés aux conditions environnementales, telles que la température, la vitesse du vent et le rayonnement solaire incident.

➤ Paramètre extérieurs (environnement)

- Flux incident : le flux solaire global incident est constitué d'une composante directe et d'une composante diffuse dont le pourcentage est variable.
- Vitesse du vent : celle-ci a une grande importance et une influence considérable lorsque cette dernière est comprise entre 0 à 3 m/s. Au-delà, l'effet devient moins important [6]
- Température à l'avant et à l'arrière du capteur.
- Température ambiante et du ciel : la température du ciel se présente sous diverses formes. Nous citons l'expression générale la plus utilisée et qui est donnée par Suinbak [6]

➤ Paramètres structurels du capteur

- Débit du fluide caloporteur.
- Orientation et inclinaison du capteur
- Températures d'entrée du fluide caloporteur
- Nature du fluide caloporteur

Il est important de faire un choix réfléchi quant à l'utilisation de l'air ou de l'eau dans la fabrication et l'entretien d'un capteur. L'air présente des avantages tels qu'une réduction des coûts et l'absence de problèmes de fuites ou de corrosion. En revanche, ses capacités calorifiques et sa densité sont plus faibles que celles de l'eau, ce qui nécessite l'utilisation de débits importants. Par conséquent, l'utilisation de l'air peut être judicieuse dans certains cas, mais doit être évaluée en fonction des besoins spécifiques du capteur.

3.2 Avantages et inconvénients

En optant pour l'air comme fluide caloporteur, il est possible de réaliser des économies considérables en termes de coûts de fabrication et d'entretien. Contrairement à l'eau, l'air ne risque pas de geler ou de bouillir, évitant ainsi l'utilisation de fluides antigel et la nécessité de mettre en place des mesures de sécurité pour prévenir les surpressions en cas de panne de circulation dans les capteurs à eau.

- Les phénomènes de corrosion ou d'entartrage, qui peuvent diminuer les performances et la durée de vie d'une installation à eau sont inexistantes.
- Les problèmes d'étanchéité paraissent moins cruciaux.
- Le capteur à air, est plus léger que les dispositifs classiques et généralement moins complexe de réalisation, donc plus facilement intégrable dans un bâtiment ou un processus industriel et son coût d'installation est plus faible.

Néanmoins, l'air présente un certain nombre d'inconvénients

- Coefficients d'échange thermique plus faibles que pour les liquides, ce qui conduit généralement à augmenter les surfaces d'échanges.
- Faible valeur du produit de la masse volumique, ce qui impose l'utilisation de forts débits volumiques, ce qui augmente la consommation électrique des auxiliaires (ventilateur) .
- Problèmes de salissure des vitres dans les cas où l'air circulent entre la vitre et l'absorbeur.

Il en résulte la nécessité de soigner la conception aéraulique et thermique du capteur.

3.3 Applications des capteurs solaires à air

Les capteurs solaires plans à air sont utilisés dans de nombreuses applications d'énergie solaire, offrant ainsi de nombreux avantages. Parmi les applications les plus courantes, on retrouve le chauffage de bâtiments, la climatisation, le séchage de produits tels que les aliments et les vêtements, la production d'énergie mécanique, ainsi que la génération d'électricité. Ces capteurs sont souvent utilisés dans les bâtiments commerciaux et résidentiels pour réduire les coûts de chauffage et de climatisation, offrant ainsi des solutions durables pour l'efficacité énergétique. En outre, ils sont également utilisés dans l'agriculture pour le séchage des cultures et le séchage des grains. Les capteurs solaires plans à air sont également une source d'énergie alternative pour la production d'électricité, notamment dans les zones

isolées ou rurales où l'accès au réseau électrique est limité. En somme, les applications des capteurs solaires plans à air sont variées et offrent de multiples avantages pour les individus, les entreprises et l'environnement.

3.3.1. Chauffages et climatisation des habitations

Le principe est présenté sur la Figure 3, consiste à chauffer le fluide dans le capteur solaire, l'air est véhiculé par ventilateur vers des points d'utilisations.

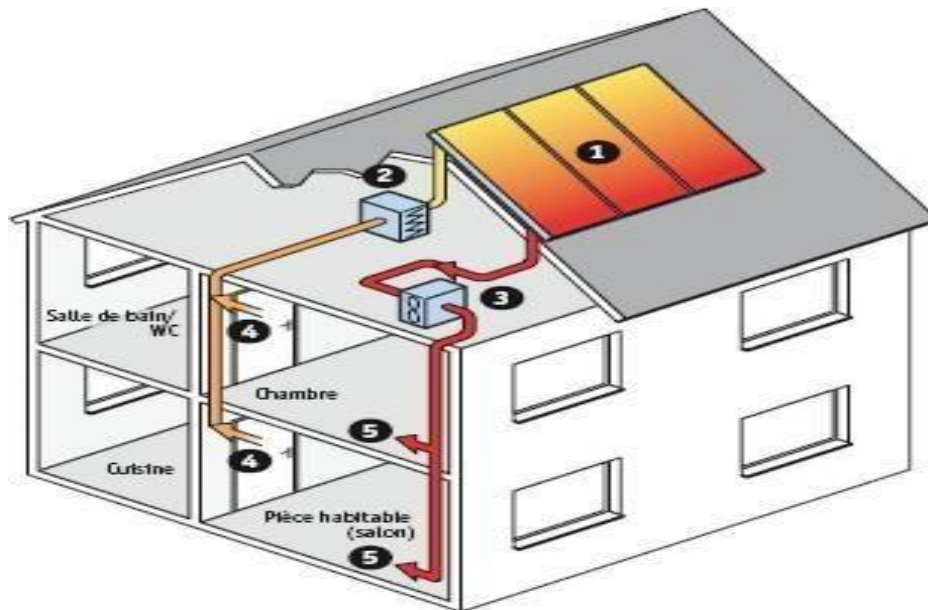


Figure I.03 : Chauffages et climatisation des habitations.

- 1- Capteur solaire plan à air 2- Filtre 3- Ventilateur
4- Entrées d'air. 5- Sorties d'air

Le système de capteur solaire à air peut être intégré de manière modulaire dans les habitations existantes et sert de complément aux systèmes de chauffage existants. En utilisant ce système, il est possible de réaliser des économies d'énergie significatives et d'améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments pendant les périodes hivernales et de mi-saison en fournissant une source de chauffage supplémentaire. La régulation du système assure que l'air chaud circule à travers le panneau dès que la température interne atteint un niveau optimal pour un gain de chaleur significatif. Le système de capteur solaire à air est donc une solution pratique et écologique pour les bâtiments, permettant d'améliorer l'efficacité énergétique et de réduire les coûts de chauffage.

3.3.2. Production de l'énergie mécanique

Dans les pays arides, ou dans les régions-isolées, il peut être très intéressant de réaliser des installations à partir d'une machine solaire, soit pour pomper l'eau, soit pour une production d'électricité. On peut utiliser un moteur à air chaud dont le principe est le suivant l'air atmosphérique est comprimé dans un cylindre par un piston et chauffé par l'intermédiaire d'un capteur à air. L'air chauffé, en se détendant, pousse le piston. Celui-ci en revenant comprime l'air dont le reste de chaleur est évacuée à une source froide ; et ainsi de suite.

3.4 Différents types des capteurs solaires à air

On peut répartir les types des capteurs solaires plans à air en 3 grandes classes :

- Les capteurs à absorbeur perméable ;
- Les capteurs à absorbeur à géométrie variable ;
- Les capteurs à absorbeur plan.

3.4.1. Les capteurs à absorbeur perméable

Le capteur décrit dans ce paragraphe utilise une matrice perméable en tant qu'absorbeur, comme indiqué dans la Figure 4. Cette configuration permet à l'énergie solaire d'entrer dans l'absorbeur de manière efficace. Le capteur est conçu avec un caisson isolé et l'air est autorisé à pénétrer dans l'espace entre la vitre et l'absorbeur. Sous la vitre, l'air commence à chauffer par convection avant de passer à travers la matrice absorbante où il continue à se réchauffer.

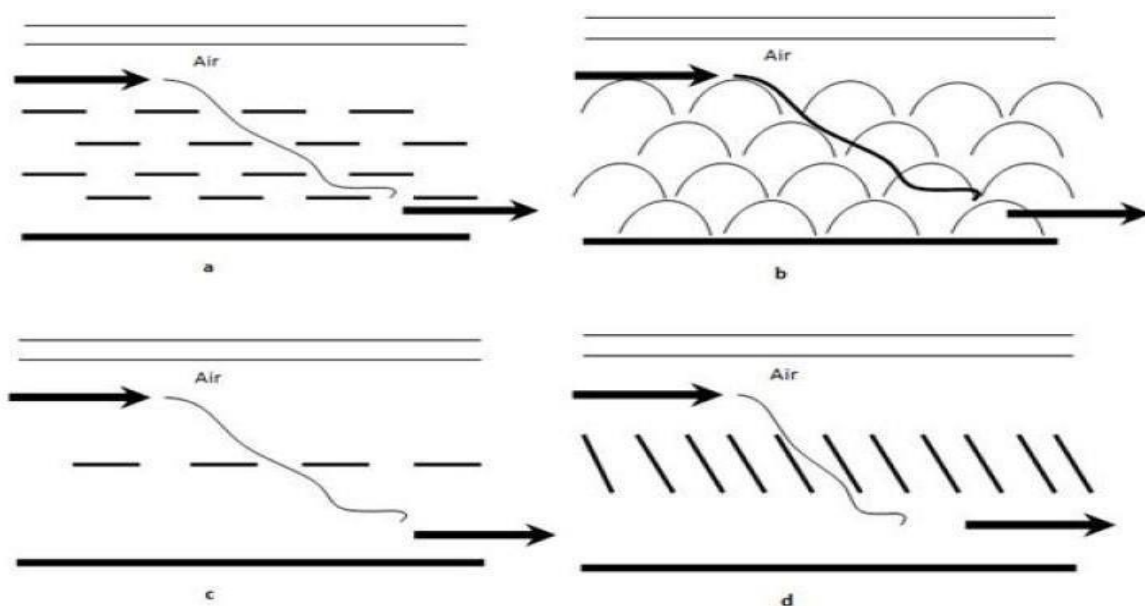


Figure I.04 : Capteurs à absorbeur perméable

3.4.2 Capteur à absorbeur à géométrie variable

Ces capteurs se présentent sous de nombreuses variantes (voir la figure 5), l'idée prédominante à ces variantes consiste à jouer sur la géométrie de l'absorbeur, de façon à augmenter la surface d'échange.

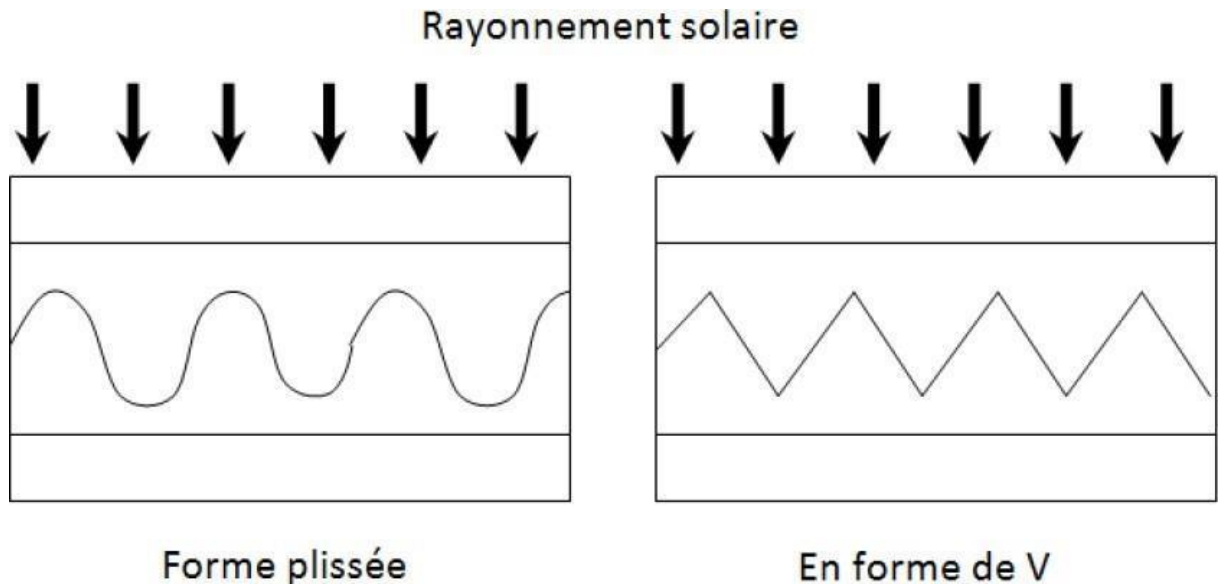


Figure I.05 : Capteurs à absorbeur à géométrie variable

3.4.3 Capteur solaire à absorbeur plan

Comme son nom l'indique, l'absorbeur est une tôle plane. La différence entre ces capteurs réside dans le nombre de vitrage utilisés et dans le type d'écoulement de l'air dans ces capteurs.

Plusieurs types d'écoulement d'air sont envisageables dans ce genre de capteur

- Ecoulement au-dessous de l'absorbeur.
- Ecoulement au-dessous de l'absorbeur.
- Ecoulement des deux côtés de l'absorbeur.

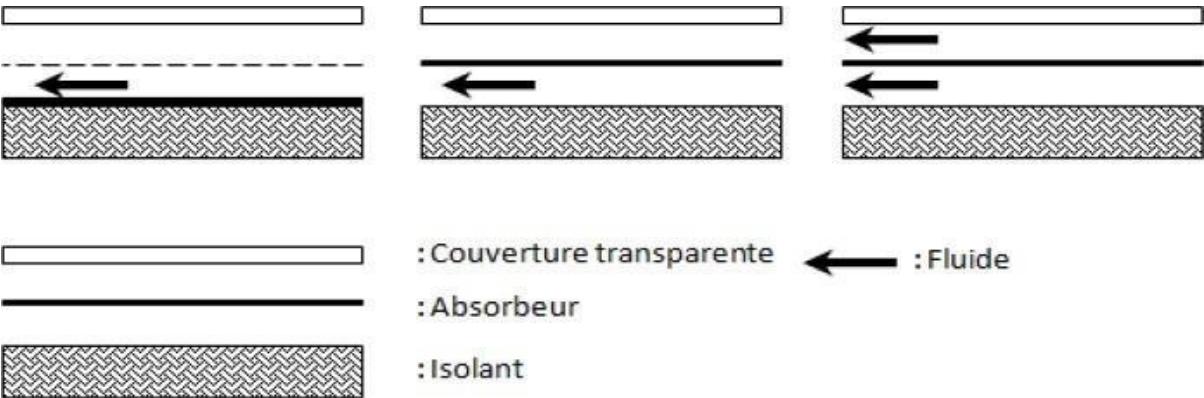


Figure I.06 : Ecoulements de l'air dans les capteurs solaires

4. Références bibliographiques

- [1] C. P. de Brichambaut and C. Vauge, Le gisement solaire : Evaluation de la ressource énergétique, Lavoisier, Paris. ; Tec & Doc, 1982.
- [2] B. Y. H. Liu and R. C. Jordan, The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation, Solar Energy, vol. 4 3, pp. 1-19, 1960.
[https://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(60\)90062-1](https://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(60)90062-1)
- [3] P. R. Jean Bonal, Écrin, Energies alternatives, Omniscience, 2007
- [4] D. K. Edwards, Capteurs solaires, Paris : S.C.M., 1979.
- [5] A. Sfeir and G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires : applications à L’habitat, Paris : Technique et documentation, 1981.
- [6] S. A. Klein, Calculation of flat-plate collector loss coefficients, Solar Energy, vol. 17 1, pp. 79-80, 1975. [https://dx.doi.org/10.1016/0038-092X\(75\)90020-1](https://dx.doi.org/10.1016/0038-092X(75)90020-1)

Chapitre II

Étude bibliographique

1. Introduction

Une étude bibliographique consiste à rassembler, analyser et évaluer les sources publiées sur un sujet donné. Dans le cas d'un sujet tel que le capteur solaire plan à air double passe, la recherche se concentrera sur la collecte d'articles, de livres, d'études de recherche et de rapports qui traitent de ce sujet spécifique.

Le capteur solaire plan à air double passe est l'un des types de systèmes de chauffage solaire qui utilise les rayons du soleil pour produire de l'énergie thermique. Ce système se compose d'un panneau solaire plat exposé aux rayons du soleil, conçu pour faire circuler l'air à travers lui afin de le chauffer, puis l'air chauffé est acheminé vers l'endroit où il doit être utilisé.

La recherche bibliographique dans ce domaine nécessite l'examen des recherches antérieures et des études publiées qui se concentrent sur la conception du capteur solaire plan à air double passe, l'analyse géométrique et thermique de celui-ci, ainsi que l'évaluation de la performance de ce système dans différentes conditions climatiques et environnementales. Des études comparatives entre les différents types de systèmes de chauffage solaire peuvent également être incluses, ainsi que l'évaluation de l'efficacité économique de l'investissement dans ce type de système.

En conséquence, l'étude bibliographique d'un sujet tel que le capteur solaire plan à air double passe nécessite la recherche de littérature scientifique et de rapports spécialisés dans ce domaine, et l'analyse des informations disponibles pour déterminer la pertinence de ce système pour répondre aux besoins des utilisateurs.

2. Travaux de recherche sur les capteurs solaire à doubles passe

On peut classer les capteurs solaires à air à double passage selon la direction de l'écoulement de l'air. Il y a trois types d'écoulement : contre-courant, co-courant et parallèle. Lorsqu'il y a un écoulement contre-courant, l'air circule au-dessus et en dessous de la plaque absorbante dans des directions opposées. En revanche, avec un écoulement parallèle, l'air circule à la fois au-dessus et en dessous de l'absorbeur dans la même direction.

Divers chercheurs ont mené des études théoriques pour accroître l'efficacité thermique des capteurs solaires à air à double passage en appliquant diverses techniques. Ces techniques incluent l'augmentation de la surface d'échange à l'aide de chicanes, l'utilisation de milieux poreux et l'emploi de plaques absorbantes ondulées.

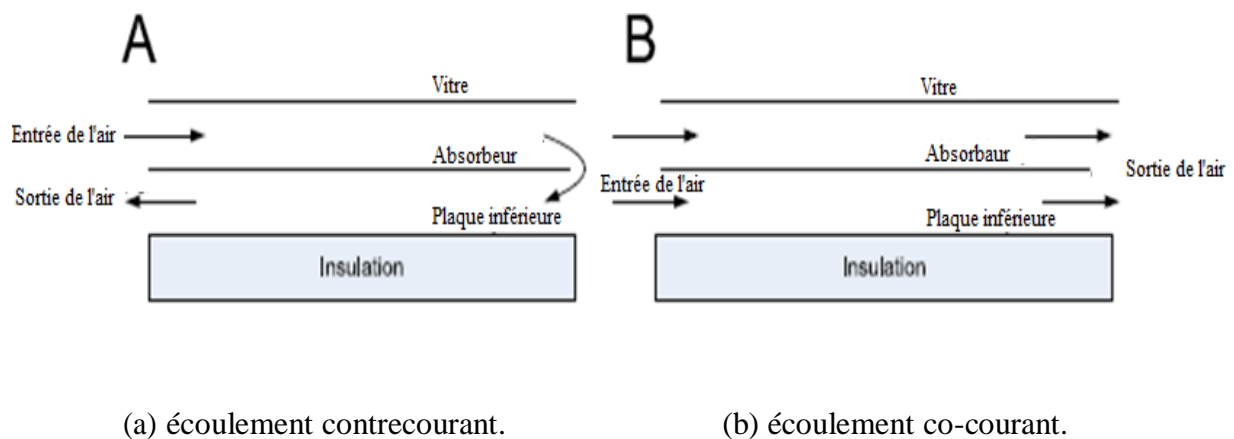


Figure II.01 : Deux types de capteurs solaires à air à double passe selon la direction de l'écoulement

Le concept de capteurs solaires à air à double passage de l'air a été étudié pour la première fois par Satcuna-Nathan et Deonarine [01] et plus tard il a été considéré par Caouris et al[02]. Des expériences ont été réalisées par ces chercheurs pour étudier la conception de capteurs solaires à double passage, en prenant en compte l'écoulement de l'air dans deux canaux distincts. L'utilisation de ces systèmes peut permettre de diminuer les pertes thermiques des couvercles.

Wijeyesundera et Al [03] Ont développé un modèle de transfert de chaleur pour analyser ces systèmes et ont comparé les résultats avec ceux obtenus pour les panneaux solaires à simple passage. Les auteurs ont étudié le rendement du collecteur dans diverses conditions de conception et de fonctionnement. Ils ont conclu que les systèmes à double passage étaient plus performants que les systèmes à simple passage. Ils ont également observé que la température de la vitre extérieure était proche de la température ambiante dans le cas des systèmes à double passage, contrairement aux systèmes à simple passage. La figure 02 représente la géométrie étudiée.

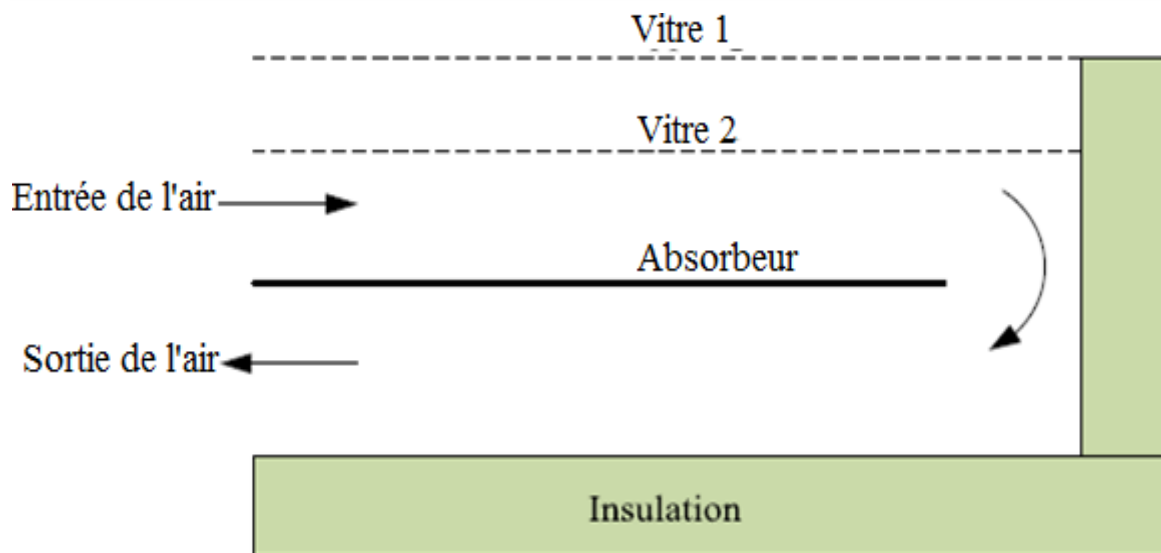


Figure II.02 : Schémas représentatifs de capteur étudié (écoulement contre-courant) [03]

Naphon et Kongtragool [04] Les chercheurs ont développé un modèle mathématique afin d'étudier l'impact du débit massique sur les performances des capteurs solaires à air à simple et double passage. Ils ont utilisé la méthode des différences finies pour résoudre les modèles et ont constaté que le système à double passage était plus performant que le système à simple passage pour une plage de paramètres de conception et de fonctionnement identiques. Les modèles de capteurs solaires à air sont présentés sur la figure 03.

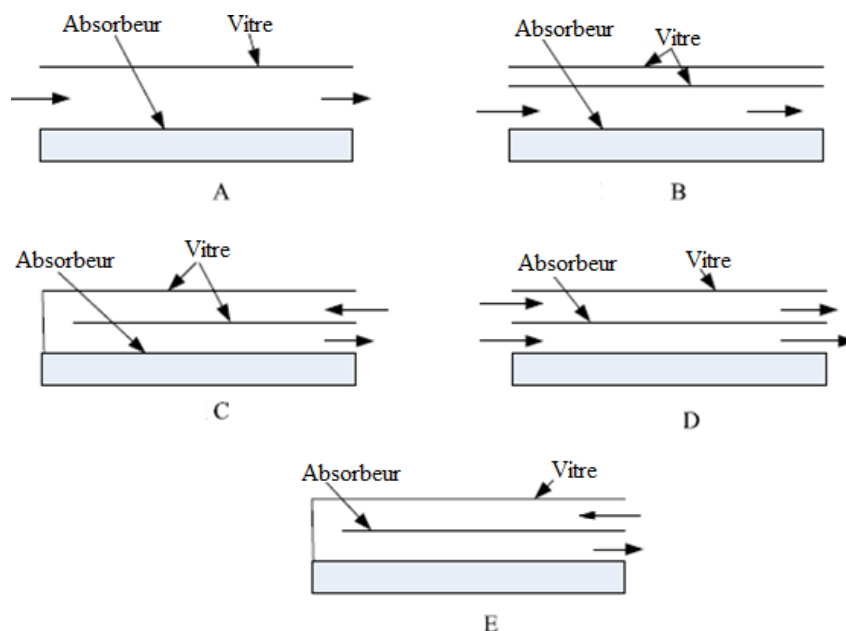


Figure II.03 : Les modèles des capteurs solaires à air [04].

Ho et al [05] Les chercheurs ont présenté une étude théorique et expérimentale portant sur une nouvelle technique. Cette dernière implique l'insertion d'une plaque absorbante comportant des ailettes attachées par des chicanes pour diviser la veine d'air dynamique en deux parties, le tout étant accompagné d'un recyclage externe à l'extrémité (voir figure 04).

Le but de cette technique est de permettre la circulation simultanée de l'air sur et sous la plaque absorbante, ce qui entraîne une amélioration du rendement thermique.

Les chercheurs ont comparé les résultats expérimentaux et théoriques de cette technique à ceux d'un capteur solaire simple passe sans recyclage, et ont constaté une amélioration considérable du transfert de chaleur grâce à l'ajout des ailettes et des chicanes. L'étude recommande des conditions optimales pour le fonctionnement du projet de chauffage solaire à air avec recyclage, qui permettent d'améliorer le rendement thermique des collecteurs tout en augmentant modérément la quantité d'énergie hydraulique dissipée.

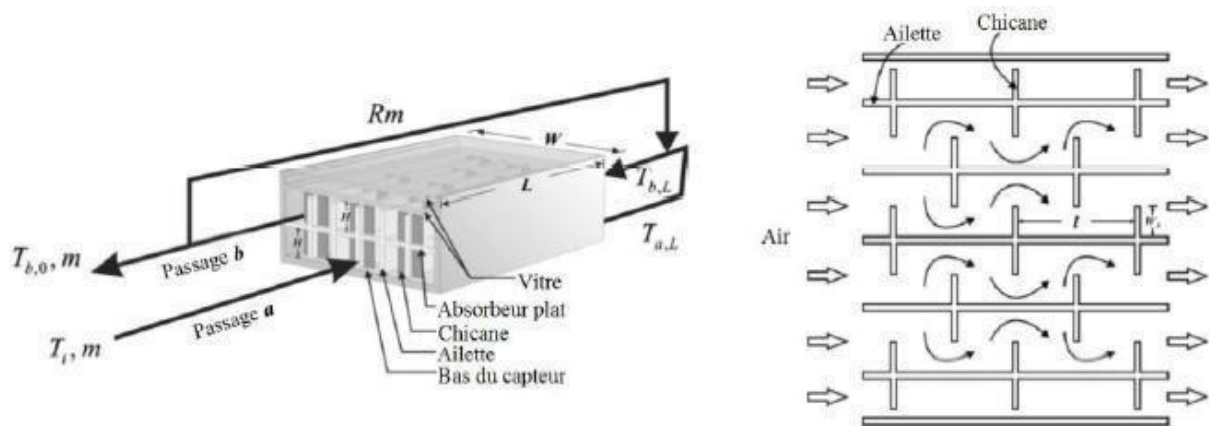


Figure II.04 : Vue de face et de haut d'un collecteur à air à double passe avec recyclage [05]

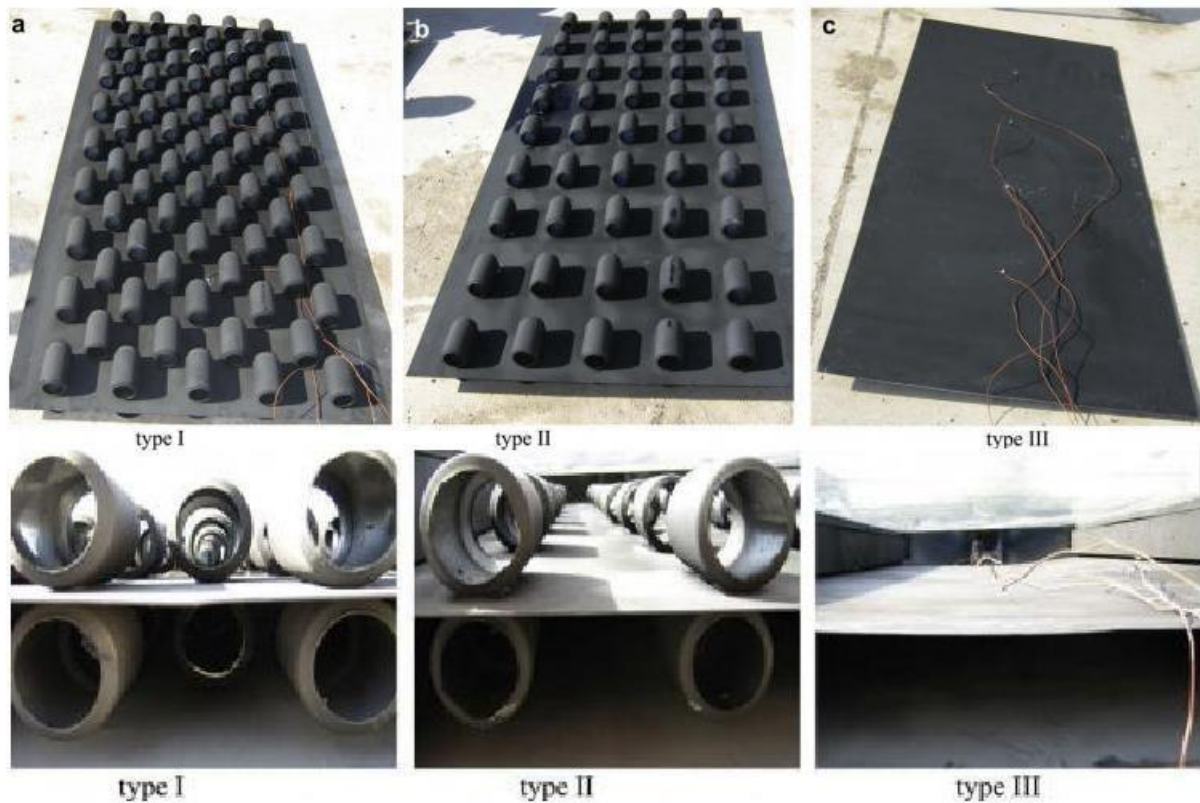


Figure II.05 : Différents types des capteurs testés par Ozgen et al [06]

Ozgen et al [06] Des chercheurs ont réalisé une étude expérimentale pour évaluer les performances thermiques d'un panneau solaire à air à double passage équipé de petits canaux en aluminium fixés à la plaque absorbante. Trois agencements distincts ont été testés. Les chercheurs ont remarqué que l'utilisation de petits canaux fixés à la plaque absorbante augmentait la surface d'échange pour le transfert de chaleur et créait de la turbulence dans la veine d'air dynamique. D'après leurs résultats, le système le plus performant était le capteur solaire équipé de petits canaux arrangés en quinconce sur la plaque absorbante.

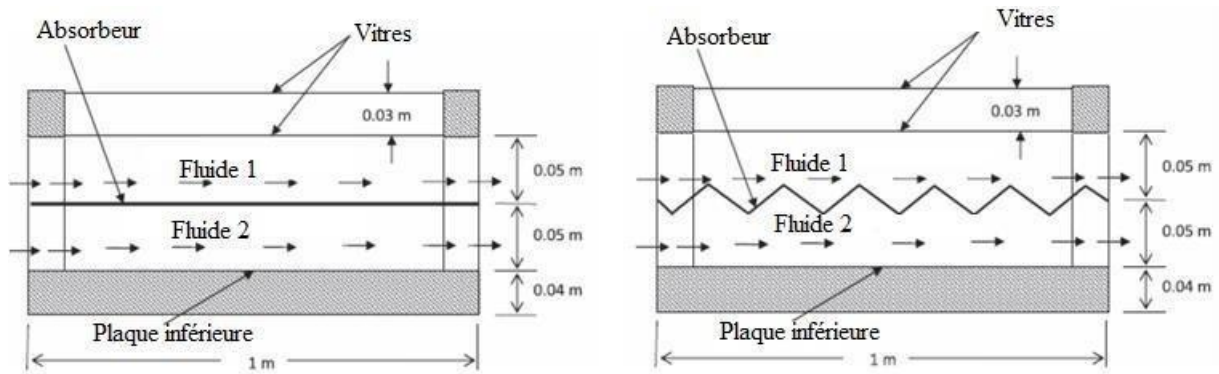


Figure II.06 : Deux configurations plan et v-ondulé testées par El-Sebaai et al [07].

El-Sebaai et al [07]. Des chercheurs ont comparé la performance thermique de deux capteurs solaires à air, l'un plan et l'autre en forme de V ondulé, tous deux équipés de double vitrage et de double passage d'air, à la fois théoriquement et expérimentalement. Les résultats ont montré que le capteur en V ondulé présentait des températures de sortie, un rendement thermique et un rendement thermo-hydraulique respectivement supérieurs de 5%, 11-14% et 14% par rapport au capteur plan. Les deux configurations ont connu une augmentation du rendement thermique avec l'augmentation du débit massique jusqu'à 0,05 kg/s, au-delà de laquelle l'augmentation du rendement thermique était peu significative.

Ramdan et al [08]. Des chercheurs ont mené une étude expérimentale et théorique sur un collecteur solaire à double passage et double vitrage équipé de milieux poreux, en utilisant du calcaire et du gravier comme milieux poreux sur la plaque absorbante (figure 07). Ils ont constaté que le rendement thermique augmentait avec l'augmentation du débit massique jusqu'à une valeur typique de 0,05 kg/s, au-delà de laquelle l'augmentation du rendement thermique devenait insignifiante.

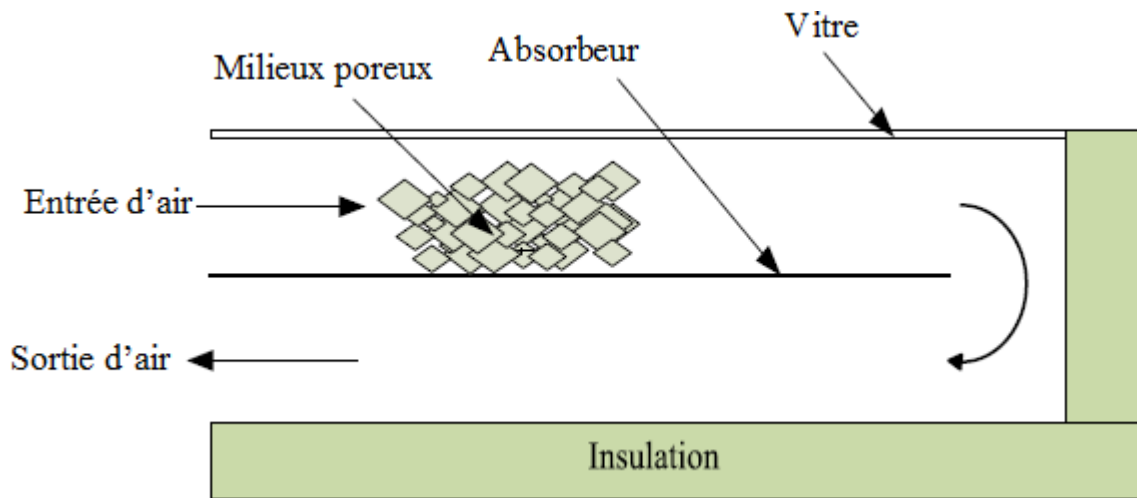


Figure II.07 : Schéma de capteur solaire à air à double passe avec milieux poreux [08]

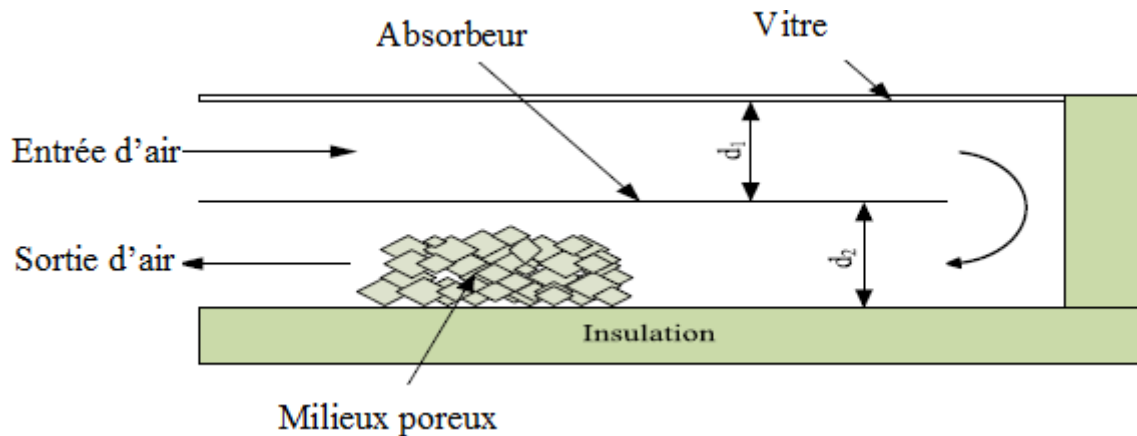


Figure II.08 : Schéma de capteur solaire à air à double passe avec milieux poreux [09]

Sopian et al [09] . Des chercheurs ont étudié l'évaluation du rendement thermique des isolateurs à air à double passage, avec et sans milieux poreux (figure 08). Ils ont développé un modèle théorique pour le capteur solaire à double passage et ont effectué une étude expérimentale. Différentes porosités ont été arrangées pour les milieux poreux afin d'augmenter le transfert de chaleur. Une étude a été menée pour analyser les effets du débit massique et du rayonnement solaire sur la performance thermique d'un collecteur solaire à double passe. Les chercheurs ont découvert que l'ajout de milieux poreux dans le deuxième canal améliore la performance thermique du capteur solaire en augmentant la surface d'échange thermique. Le rendement thermique maximal atteint pour le collecteur solaire à double passe avec milieux poreux est de 60 à 70 %.

S.S.Krishnananth et K.Kalidasa [10] Des chercheurs ont étudié un système de capteur solaire à air à double passage avec stockage thermique pour améliorer son rendement. La plaque absorbante est en acier poli et des expériences ont été menées pour étudier les performances du système avec et sans matériau de stockage d'énergie. La cire paraffine a été utilisée comme milieu de stockage thermique, avec six pipes contenant des capsules d'aluminium de 4 cm de diamètre et 60 cm de longueur pour stocker l'excès d'énergie thermique. Les capsules et la plaque absorbante ont été peintes en noir mat pour maximiser l'absorption du rayonnement solaire, et les capsules ont été disposées selon différentes configurations sur la plaque et à l'arrière de celle-ci. Les résultats expérimentaux ont montré que le capteur solaire à air avec de la cire de paraffine comme matériau de stockage d'énergie fournit une température de l'air relativement plus élevée tout au long de la journée et une efficacité accrue pendant les heures du soir.

L'étude a conclu que la présence de la Support de stockage thermique à la plaque d'absorption est la meilleure configuration.

3. Conclusion

Après avoir examiné les études bibliographiques disponibles sur le capteur solaire plan à air double passe, il est possible de conclure que cette technologie est une solution prometteuse pour la production d'énergie solaire thermique. Les avantages potentiels de cette technologie comprennent une meilleure efficacité énergétique et une réduction des coûts par rapport à d'autres types de capteurs solaires. Cependant, il est important de poursuivre les recherches pour améliorer la conception et l'efficacité de ces capteurs afin de maximiser leur potentiel en tant que source d'énergie renouvelable.

4. Références bibliographiques

- [1] S. Satcunanathan and S. Deonarine, A two-pass solar air heater, *Solar Energy*, vol. 15 1, pp. 41-49, 1973.
- [2] Y. Caouris, R. Rigopoulos, J. Tripanagnostopoulos and P. Yianoulis, A novel solar collector, *Solar Energy*, vol. 21 2, pp. 157-160, 1978.
- [3] N. E. Wijesundera, L. L. Ah and L. E. Tjioe, Thermal performance study of twopass solar air heaters.
- [4] P. Naphon and B. Kongtragool, Theoretical study on heat transfer characteristics and performance of the flat-plate solar air heaters, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 30 8, pp. 1125-1136, 2003.
- [5] C. D. Ho, H. M. Yeh, T. W. Cheng, T. C. Chen and R. C. Wang, the influences of recycle on performance of baffled double-pass flat-plate solar air heaters with internal fins attached, *Applied Energy*, vol. 86 9, pp. 1470-1478, 2009.
- [6] F. Ozgen, M. Esen and H. Esen, Experimental investigation of thermal performance of a double-flow solar air heater having aluminium cans, *Renewable Energy*, vol. 34 11, pp. 2391-2398, 2009.
- [7] A. A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein, M. R. I. Ramadan, S. M. Shalaby and B. M. Moharram, Investigation of thermal performance of double pass-flat and vcorrugated plate solar air heaters, *Energy*, vol. 36 2, pp. 1076-1086, 2011.
- [8] M. R. I. Ramadan, A. A. El-Sebaei, S. Aboul-Enein and E. El-Bialy, Thermal performance of a packed bed double-pass solar air heater, *Energy*, vol. 32 8, pp. 1524-1535, 2007.
- [9] K. Sopian, M. A. Alghoul, E. M. Alfegi, M. Y. Sulaiman and E. A. Musa, Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous– nonporous media, *Renewable Energy*, vol. 34 3, pp. 640-645, 2009.

Chapitre III

Modélisation mathématique et simulation numérique

1. Introduction

Le chapitre en question expose les modèles mathématiques et numériques utilisés pour décrire l'écoulement et la transmission de chaleur de l'air dans le conduit d'un capteur solaire à air. Il offre un aperçu des différents types de modèles qui ont été développés pour les panneaux solaires double passe, incluant ceux avec et sans chicanes, pour le régime stationnaire.

2. Modélisation de l'insolateur

L'expression suivante permet de calculer le bilan thermique d'un insolateur en fonction de sa surface : $I_g = Q_u + Q_p + Q_s$ (1)

La relation (1) est composée des éléments suivants : le flux global I_g reçu par l'insolateur, qui représente la somme de l'énergie utile Q_u transportée par le fluide caloporteur, des pertes thermiques par les différents modes de transfert vers l'environnement, et l'énergie stockée Q_s dans les différentes parties de l'insolateur.

Dans le cas des capteurs solaires à air fonctionnant en régime thermique permanent, l'énergie stockée dans les différentes parties de l'insolateur peut être négligée, ce qui donne lieu à la relation suivante : $I_g = Q_u + Q_p$ (2)

Pour modéliser le comportement dynamique du capteur, une approche nodale de discrétisation a été utilisée.

Cette méthode consiste à subdiviser le capteur solaire en plusieurs tranches fictives, avec une certaine longueur "h", selon le flux du fluide caloporteur. Les équations sont alors obtenues en établissant les bilans énergétiques pour chaque nœud.

La méthode de modélisation "pas à pas" repose sur la découpe du capteur solaire en tranches fictives et sur l'écriture du bilan des échanges pour chaque tranche.

Cela permet de traiter le système de manière plus pratique en utilisant des analogies thermiques [1].

3. Modélisation mathématique des différents types des panneaux en régime stationnaire

3.1 Modélisation du capteur solaire double passe

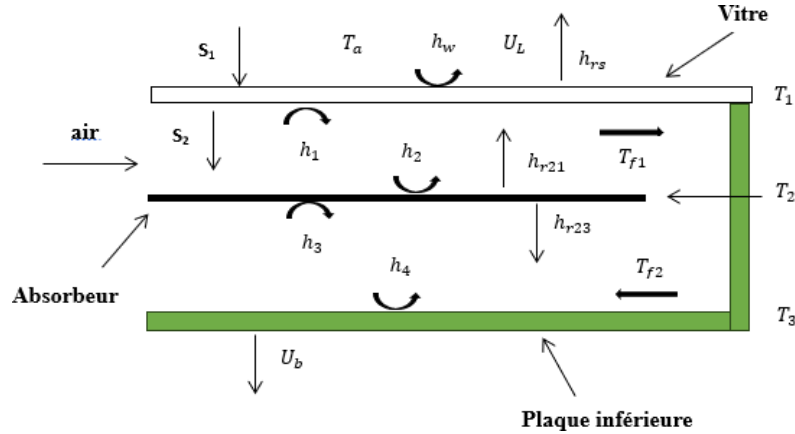


Figure III.01 : Schématisation d'un panneau solaire à air double passe

a. Bilan énergétique au niveau du vitrage

$$S_1 = h_{r21}(T_2 - T_1) + (T_{f1} - T_1) + U_L(T_a - T_1) = 0, S_1 = \alpha_1 I_g$$

$$(h_{r21} + h_1 + U_L) T_1 - h_1 T_{f1} - h_{r21} T_2 = S_1 + U_L T_a \quad (3)$$

b. Bilan énergétique du fluide 1

$$\dot{m} C_P \frac{dT_{f1}}{w \alpha} = h_1 (T_1 - T_{f1}) + h_2 (T_2 - T_{f1})$$

$$\Gamma (T_{f1,i} - T_{f1,i-1}) = (T_1 - T_{f1}) + h_2 (T_2 - T_{f1}), \dot{m} C_P \frac{dT_{f1}}{w \alpha} = \Gamma (T_{f1,i} - T_{f1,i-1})$$

$$h_1 T_1 - (h_1 + h_2 + T_1) T_{f1} + h_2 T_2 = -T_1 T_{f1,i-1} \quad (4)$$

c. Bilan énergétique à travers l'absorbeur

$$h_2 (-T_{f1}) + h_3 (T_2 - T_{f1}) + h_{r21}(T_2 - T_1) + h_{r32}(T_2 - T_3) = S_2, S_2 = \tau \alpha_2 I_g$$

$$-h_{r21} T_1 - (h_3 + h_3) T_{f1} + (h_2 + h_3 + h_{r32} + h_{r21}) T_2 - h_{r32} T_3 = S_2 \quad (5)$$

d. Bilan énergétique du fluide 2

$$\dot{m} C_P \frac{dT_{f2}}{w \alpha} = h_3 (T_2 - T_{f2}) + h_4 (T_3 - T_{f2})$$

$$\Gamma (T_{f2,i} - T_{f2,i-1}) = h_3 (T_2 - T_{f2}) + h_4 (T_3 - T_{f2}), \dot{m} C_P \frac{dT_{f2}}{w \alpha} = \Gamma (T_{f2,i} - T_{f2,i-1})$$

$$h_3 T_2 - (h_3 + h_4 + T_1) T_{f2,i} + h_4 T_3 = -T_1 T_{f2,i-1} \quad (6)$$

e. Bilan énergétique de la plaque inférieure

$$h_4 (T_3 - T_f) + U_b (T_3 - T_a) + h_{r32} (T_3 - T_2) = 0$$

$$-h_{r32} T_2 - h_4 T_{f2} + (h_{r32} + U_b + h_4) T_3 = U_b T_a \quad (7)$$

3.1.1. Méthode de solution

Pour estimer le gradient de température de l'air, la méthode des différences finies est utilisée dans chaque volume de contrôle de manière approximative, comme indiqué ci-dessous.

$$\frac{dT_f}{w dx} = \frac{(T_{fi} - T_{f,i-1})}{w dx}$$

L'approximation de l'élément différentiel de chaque section est réalisée en utilisant la méthode suivante : $dA_p = w \times dx$

Les équations du système pour les variables inconnues sont les suivantes : $T_1, T_{f1}, T_2, T_3, T_{f2}$. Le système d'équations peut être représenté sous forme matricielle de la manière suivante $[A] \cdot [T] = [B]$

Le système d'équations est non linéaire en raison de la dépendance des coefficients de la matrice $[A]$ et du vecteur $[B]$ par rapport aux températures inconnues $[T]$.

Pour résoudre ce problème, les coefficients ont été calculés en utilisant les températures de la section précédente.

Une approche itérative est ensuite utilisée le long du capteur pour calculer les températures dans chaque

$$\begin{bmatrix}
 (h_{r21} + h_1 + U_L) & -h_1 & -h_{r21} & 0 & 0 & 0 & 1 \\
 h_1 & -(h_1 + h_2 + \Gamma) & h_2 & -h & 0 & 0 & 0 \\
 -h_{r21} & -h_{r32} - h_3 & (h_2 + h_{r32} + h_{r21}) & -h_{r32} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & h_3 & h_4 & (-h_3 - h_4 - T_1) & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -h_{r32} & (-h_{r21} + U_b + h_4) & -h_4 & 0 & 0
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 T_1 \\
 T_{f1} \\
 T_2 \\
 T_3 \\
 T_{f2}
 \end{bmatrix}
 =
 \begin{bmatrix}
 \Gamma \\
 \Gamma T_{fi-1} \\
 S_2 \\
 -\Gamma_1 T_{f2i-1} \\
 U_b T_\alpha
 \end{bmatrix}$$

4. Modélisation des coefficients d'échange thermique

En plus des hypothèses générales formulées pour la modélisation des capteurs utilisant la méthode par tranche, les hypothèses spécifiques suivantes sont posées

- Les pertes thermiques sur les parois latérales sont négligeables.
- Le régime est considéré à la fois stationnaire et transitoire.
- La conduction thermique dans le sens de l'écoulement est négligeable.
- On suppose que la direction du vent extérieur est toujours parallèle aux faces du capteur solaire à air.
- Les gradients transversaux de température dans l'absorbeur sont négligés (la conductivité thermique de l'absorbeur est considérée très élevée).

Afin de déterminer les différents coefficients d'échange thermique "h", les relations suivantes seront utilisées en fonction du type de transfert : conduction, rayonnement ou convection.

4.1. Transfert radiatif

On considère un transfert radiatif entre deux plaques parallèles de températures T_1 et T_2 (Exprimées en Kelvin). On applique la formule [2]

$$h = \sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2) \left(\frac{1-s_1}{s_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{1-s_1 s_1}{s_1 s_2} \right)^{-1}$$

Où : T_1 et T_2 sont les températures absolues des deux faces, supposées uniformes,

F_{12} est le facteur de forme géométrique entre les surfaces A_1 et A_2 , pris généralement pour

les diverses parties de l'insolateur égale à 1.

σ : est la constante de Stephan-Boltzmann.

- Entre la vitre et la voûte céleste

Le coefficient d'échange radiatif s'écrit [1, 3]

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon_1 (T_1 + T_s) (T_1^2 + T_s^2) (T_1 - T_s) / (T_1 - T_a)$$

T_s est la température équivalente de la voûte céleste donnée par la relation de Swinbank (1963) [4]

$$T_s = 0,0552 \cdot T_a^{1,5}$$

Les températures T_s et T_a sont exprimées en Kelvin.

- Entre la vitre et l'absorbeur

$$h_{r21} = \sigma \varepsilon_1 (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - 1 \right)^{-1}$$

Les températures T_1 et T_2 sont exprimées en Kelvin.

- Entre l'absorbeur et la plaque inférieure placée sur l'isolant

$$h_{r32} = \sigma \varepsilon_3 (T_3 + T_2)(T_3^2 + T_2^2) \left(\frac{1}{s_3} + \frac{1}{s_4} - 1 \right)^{-1}$$

Les températures T_3 et T_2 sont exprimées en Kelvin.

Pour le capteur solaire plan à air double passe, les coefficients de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste, ainsi qu'entre la plaque absorbante et la vitre, sont approximativement évalués de la manière suivante

$$h_{rs} = \sigma \varepsilon_1 (T_1^2 + T_s^2) (T_1 + T_s)$$

$$h_{r21} = \sigma \varepsilon_2 (T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \left(\frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - 1 \right)^{-1}$$

4.2. Transfert convectif

On distingue deux types d'échange convectif [5]

- Dus au vent
- Ceux intervenant dans l'insolateur

4.2.1. Transfert convectif dû au vent

La relation suivante de McAdams (1954) est généralement admise [5]

$$h_w = 5,67 + 3,86 V_V$$

Où : V_V est la vitesse du vent en (m/s).

4.2.2. Transferts convectifs dans le capteur

- Entre l'absorbeur et la vitre

Le coefficient de pertes par conduction-convection naturelle, entre l'absorbeur et la vitre, rapporté dans [6] s'écrit

$$h_{nc} = 1,42 \left(\frac{(T_2 - T_a) \sin \beta}{L} \right)^{1/4}$$

Les températures T_2 et T_a sont exprimées en Kelvin.

- Dans la veine d'air mobile

En ce qui concerne la convection forcée, spécifiquement pour les conduits rectangulaires, l'échange de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur est caractérisé par le coefficient suivant

$$h_3 = \frac{N_u D_h}{K_f}$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection de l'air circulant à travers le canal avec un écoulement laminaire peut être approximativement estimé en utilisant la relation suivante [7]

$$N_u = \frac{N_3 D_h}{K_f} 4,4 + \frac{0,00398(0,7 Re D_h / L)^{1,66}}{1 + 0,0114(0,7 Re D_h / L)^{1,12}} \quad \text{pour } Re < 2300$$

Et pour l'écoulement turbulent pleinement développé, le coefficient de transfert de

Chaleur est calculé par [8]

$$N_u = \frac{N3Dh}{K_f} = 0,0158 Re^{0,8} \quad \text{pour } Re < 2300$$

Où le nombre de Reynolds est donné par

$$Re = \frac{V D_h}{\nu_f}$$

Le coefficient d'échange entre la plaque inférieure et le fluide caloporteur est donné par :

$$h_4 = h_3$$

5. Les pertes thermiques

5.1. Perte l'arrière

L'expression des pertes de la face arrière de l'insolateur est [9]

$$U_b = \frac{k_{ins}}{\delta_{ins}}$$

Où : k_{ins} la conductivité thermique de l'isolant.

δ_{ins} : Les épaisseurs de l'isolant.

U_b : Le coefficient de perte de chaleur de fond.

5.2. Pertes à l'avant

$$U_L = h_{rs} + h_w$$

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

6. Rendement thermique et l'énergie utile (récupérée par le fluide caloporteur)

Sous la condition que les températures d'entrée et de sortie de l'air soient connues, l'équation suivante peut être utilisée pour exprimer l'énergie utile :

$$Q_u = \dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fi})$$

Ainsi, le rendement thermique du collecteur peut être calculée par

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g A_p} = \frac{\dot{m} C_p (T_{fs} - T_{fi})}{I_g A_p}$$

7. Puissance absorbée

- ✓ Puissance absorbée par la vitre (S_1)

$$S_1 = \alpha_1 I_g$$

Où : α_1 coefficient d'absorption de la vitre

- ✓ Puissance absorbée par l'absorbeur (S_2)

$$S_2 = \tau \alpha_2 I_g$$

Où : α_2 coefficient d'absorption de l'absorbeur

τ : Transmissivité de vitre

8. Programme de calcul

Un code de calcul a été développé en utilisant le langage MATLAB, ce qui permet de déterminer les températures des différentes composantes du système en bouclant à la fois sur l'espace et le temps (régime stationnaire). Cette approche facilite l'obtention de l'évolution de la température du fluide, ainsi que des températures de la vitre, de l'absorbeur et de l'isolant pour les systèmes capteurs à double passe.

8.1. Organigramme simplifié du programme principal d'un capteur à double passe (régime stationnaire)

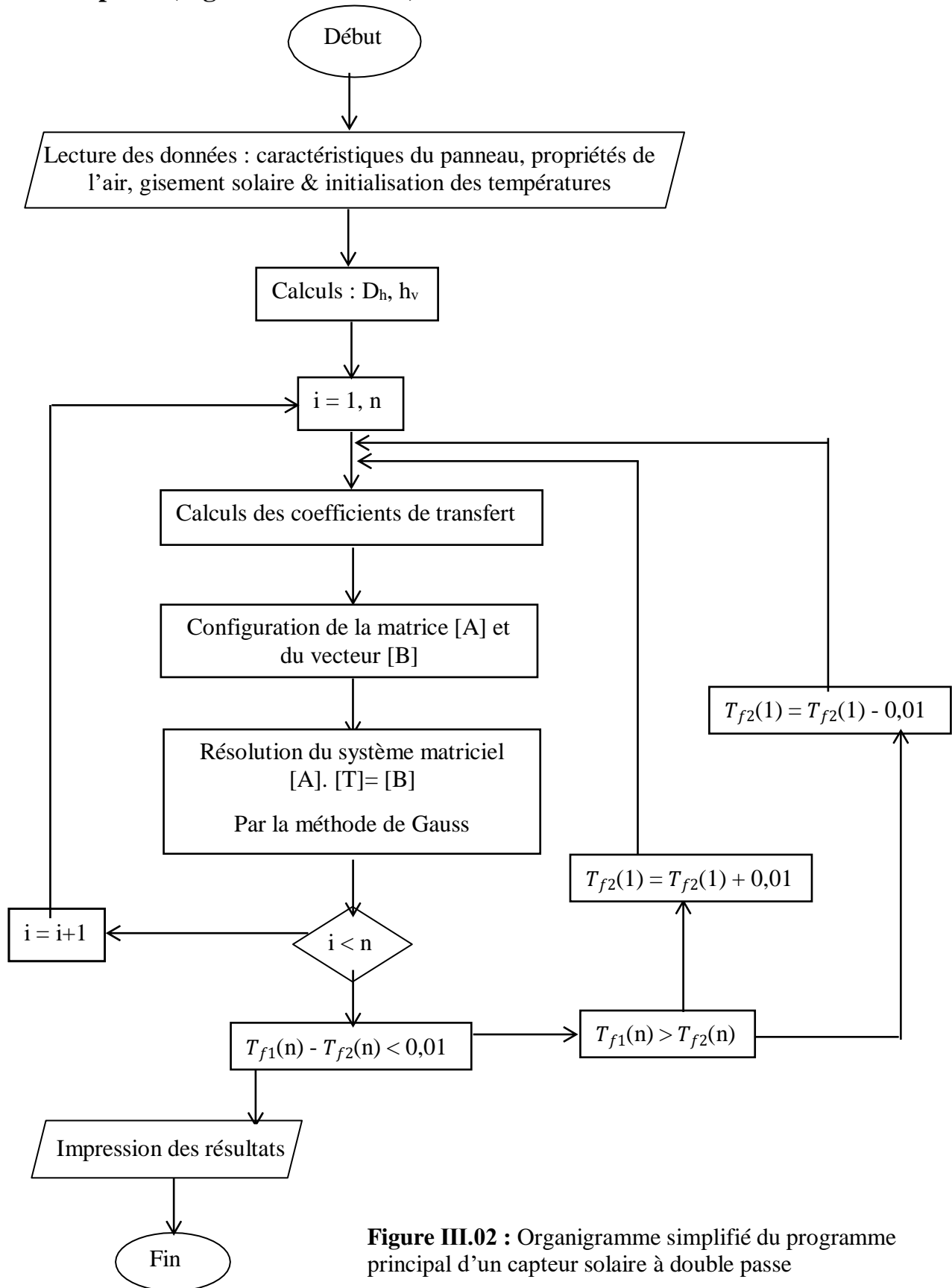


Figure III.02 : Organigramme simplifié du programme principal d'un capteur solaire à double passe

9. Conclusion

Il est mentionné que le chapitre en question présente les équations des bilans énergétiques pour chaque composant du collecteur solaire à air, en tenant compte des hypothèses simplificatrices préalablement établies. En outre, il est expliqué que les auteurs ont mis au point un programme en langage Matlab qui leur a permis de calculer les performances thermiques des panneaux solaires plans à air double passe en régime stationnaire.

10. Références bibliographiques

- [1] S. Youcef Ali, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée: Application à la pomme de terre, thèse de Doctorat, université de valenciennes et du hainnaut-comprézés France, , 2001.
- [2] J.-F. Sacadura, Initiation aux transferts thermiques, Technique et documentation, 1980.
- [3] A. Belghit, M. Belahmidi, A. Bennis, B. C. Boutaleb and S. Benet, Étude numérique d'un séchoir solaire fonctionnant en convection forcée, Revue Générale de Thermique, vol. 36 11, pp. 837-850, 1997. [http://dx.doi.org/10.1016/S0035-3159\(97\)87754-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0035-3159(97)87754-9)
- [4] W. C. Swinbank, Long-wave radiation from clear skies, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, vol. 89 381, pp. 339-348, 1963. 10.1002/qj.49708938105
- [5] W. H. McAdams, Heat transmission, 1954.
- [6] N. Moumimi, Prévisions systématiques et optimisation des performances des capteurs solaires plans à air dans divers sites de climats méditerranéens et sahariens et avec ou sans altitudes, 1994.
- [7] H. S. Heaton, W. C. Reynolds and W. M. Kays, Heat transfer in annular passages. Simultaneous development of velocity and temperature fields in laminar flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 7 7, pp. 763-781, 1964. [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(64\)90006-7](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(64)90006-7)
- [8] W. M. Kays, M. E. Crawford and B. Weigand, Convective heat and mass transfer, Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- [9] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar engineering of thermal processes, vol. pp. 1980.

Chapitre IV
Résultats et discussions

1. Introduction

Ce chapitre va présenter et valider les résultats des modèles mathématiques qui ont été développés en analysant les bilans énergétiques des différents panneaux solaires à air double passe en régime stationnaire. Nous allons comparer les résultats des modèles avec ceux de l'expérimentation ainsi que ceux de la littérature. De plus, nous allons mener une étude paramétrique pour optimiser le dimensionnement du panneau solaire plan à air. À la fin de ce chapitre, les principaux résultats graphiques seront présentés sous forme de courbes et de tableaux.

2. Validation des résultats

2.2. Capteur solaire à air à double passe

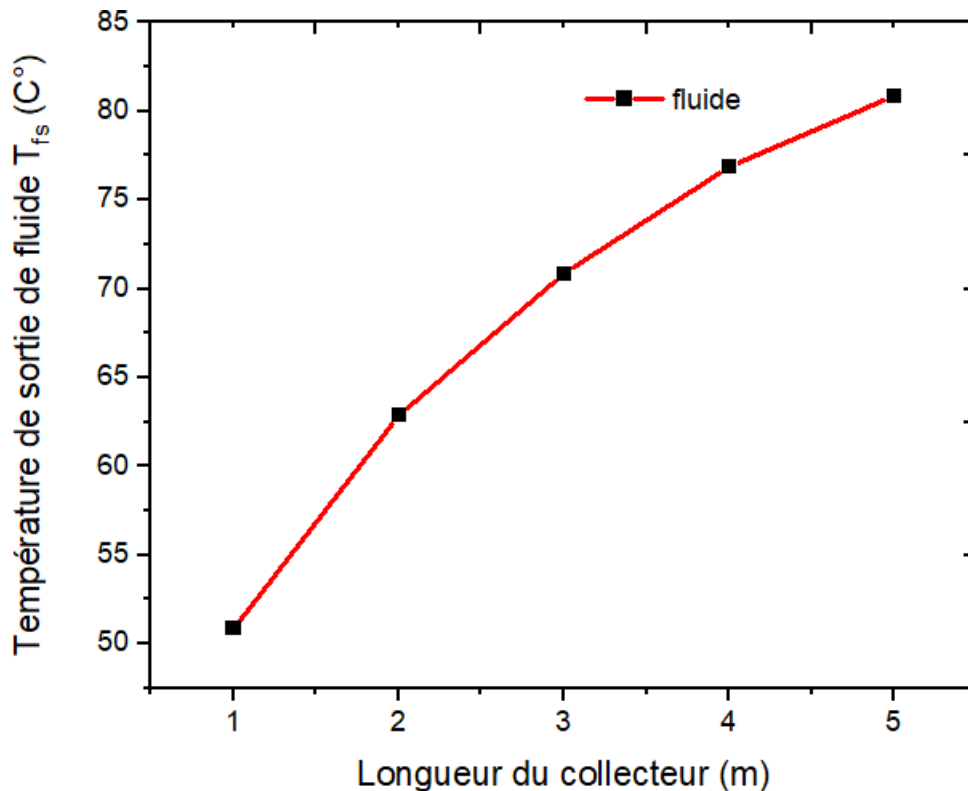


Figure IV.01 : Variation de la température de sortie en fonction le long du capteur solaire

Pour Prouver que la température du fluide sortant augmente avec l'augmentation de la longueur de panneaux Nous étudions l'évolution de la température du fluide sortant à chaque fois que nous visitons la longueur du collecteur.

Pour un flux solaire de $I_g = 700 \text{ W/m}^2$, la figure suivante montre l'effet du débit massique sur la température de l'air le long du capteur. En ce qui concerne la température de sortie, nos résultats indiquent que plus le débit est élevé, plus la température de sortie est basse

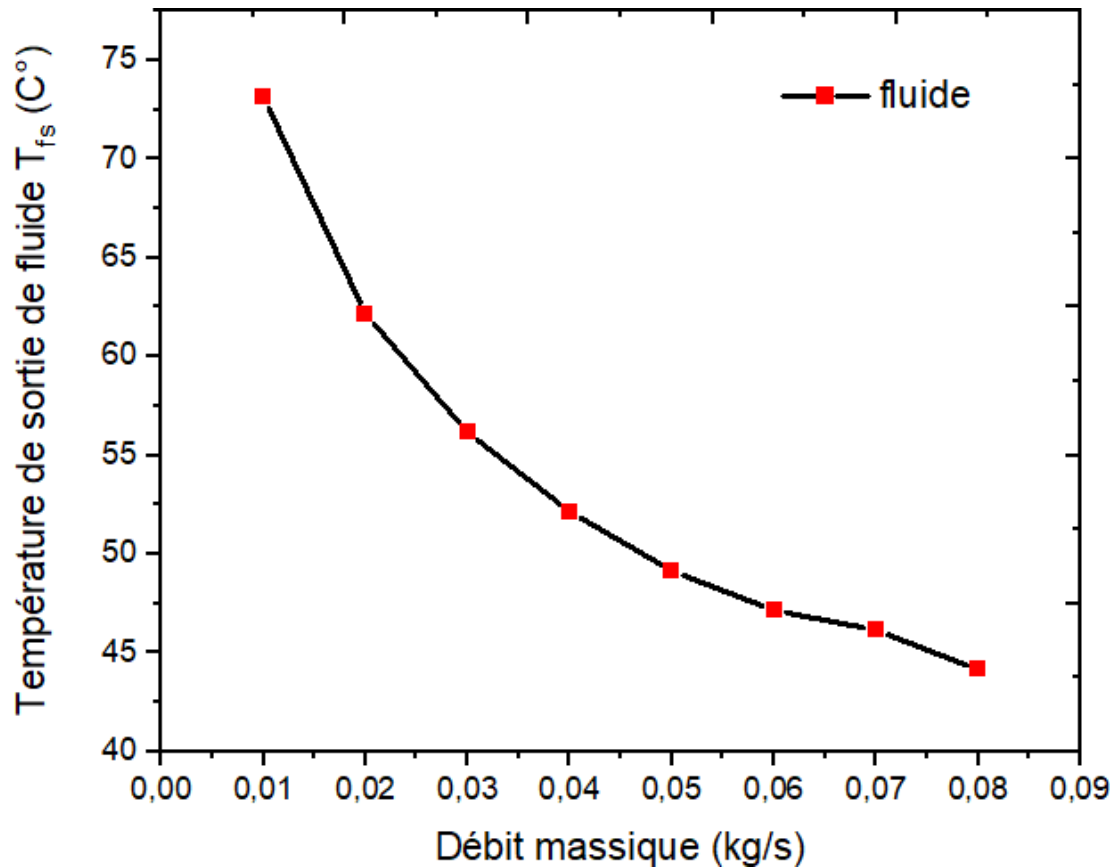


Figure IV.02 : Variation de la température de sortie en fonction débit massique

Afin de démontrer la fiabilité et la résistance de notre approche mathématique et numérique, nous prévoyons de valider nos résultats en les comparant avec les données expérimentales obtenues par Fudholi et al [1]. Concernant le rendement thermique et la température de sortie de l'air dans divers modes opératoires. Cette validation sera illustrée à l'aide de la figure 3 et tableau 1

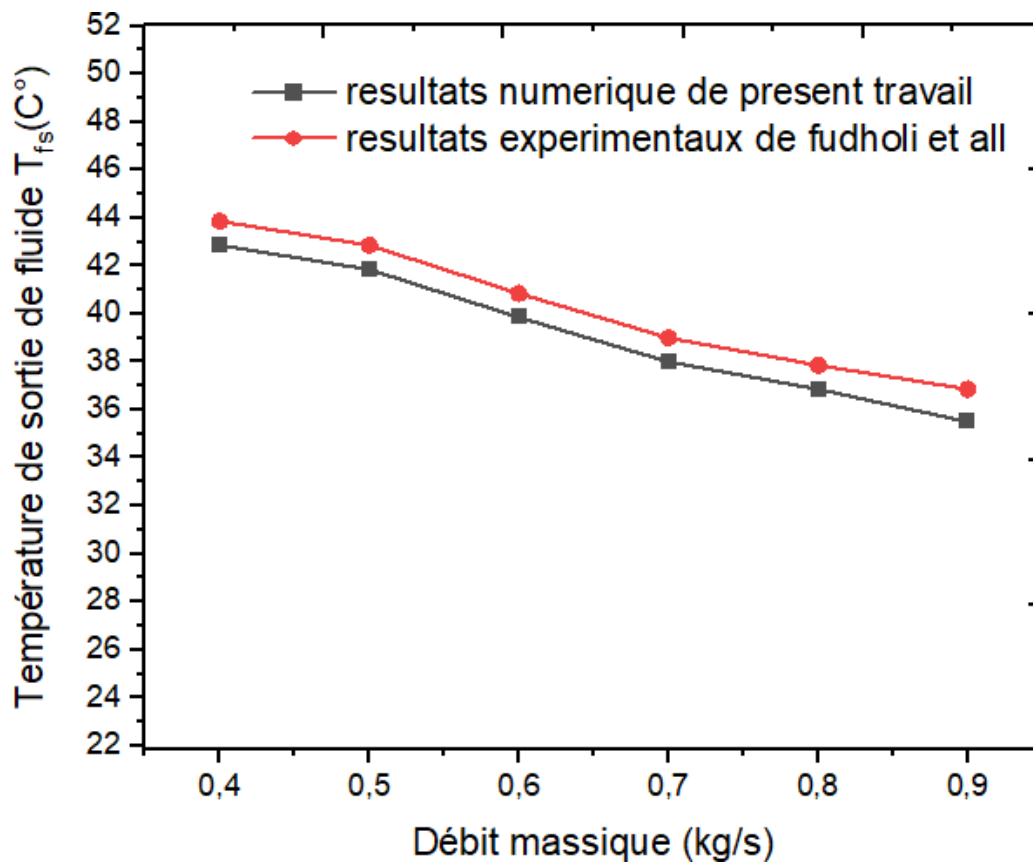


Figure IV.03 : Variation de la température de sortie en fonction de débit massique.

$I_g(W/m^2)$	Débit massique (Kg/s)	Température de sortie du fluide (k)		
		Théo	Exp	Erreur %
425	0.04	42.2143	43.85	3.7302166
	0.05	41.3214	42.85	3.5673278
	0.06	39.1451	40.85	4.1735618
	0.07	38.2457	39.85	3.574153
	0.08	36.2734	37.85	4.1653896
	0.09	35.5879	36.85	3.424966

Tableau 1. Validation des résultats théoriques avec les travaux antérieurs

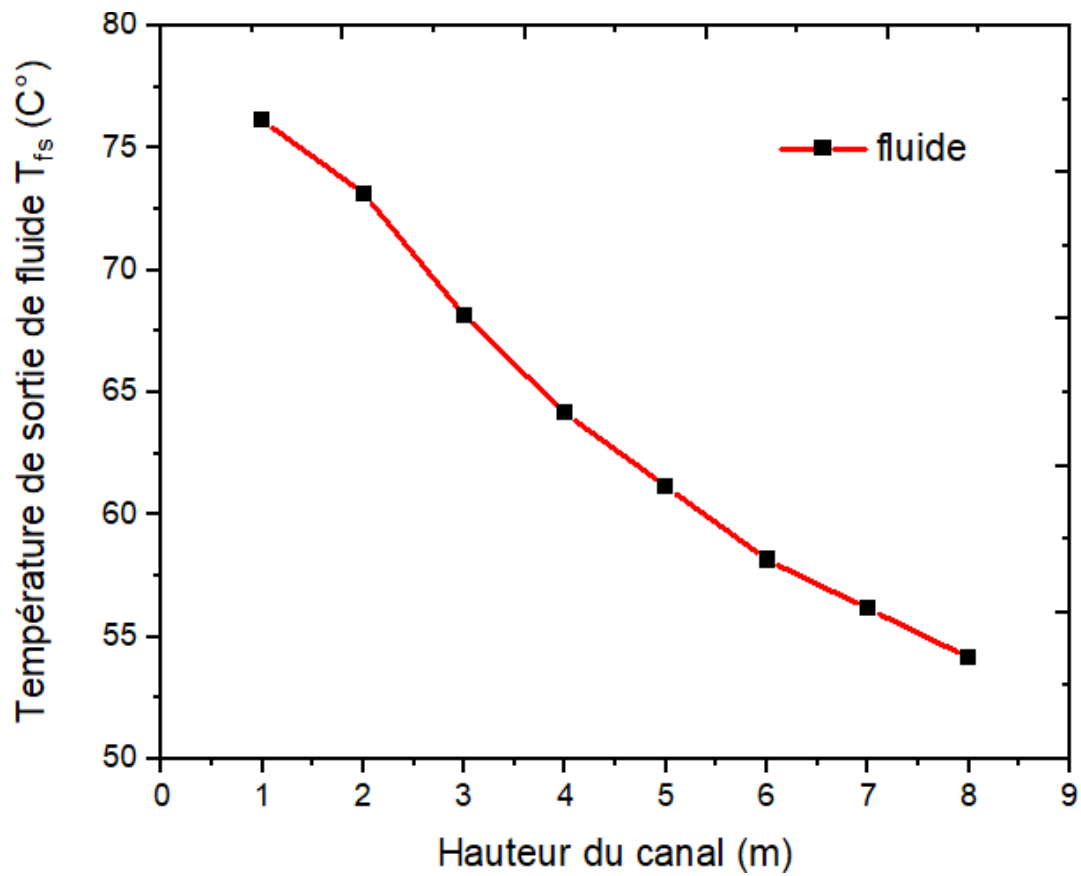


Figure IV.04 : Variation de la température de sortie en fonction de la hauteur du canal.

La figure 04 présente la courbe illustrant la relation entre la hauteur du canal et la température de sortie. On observe que plus la hauteur du canal augmente, plus la température de sortie diminue pour un débit de 0.02 kg/s.w

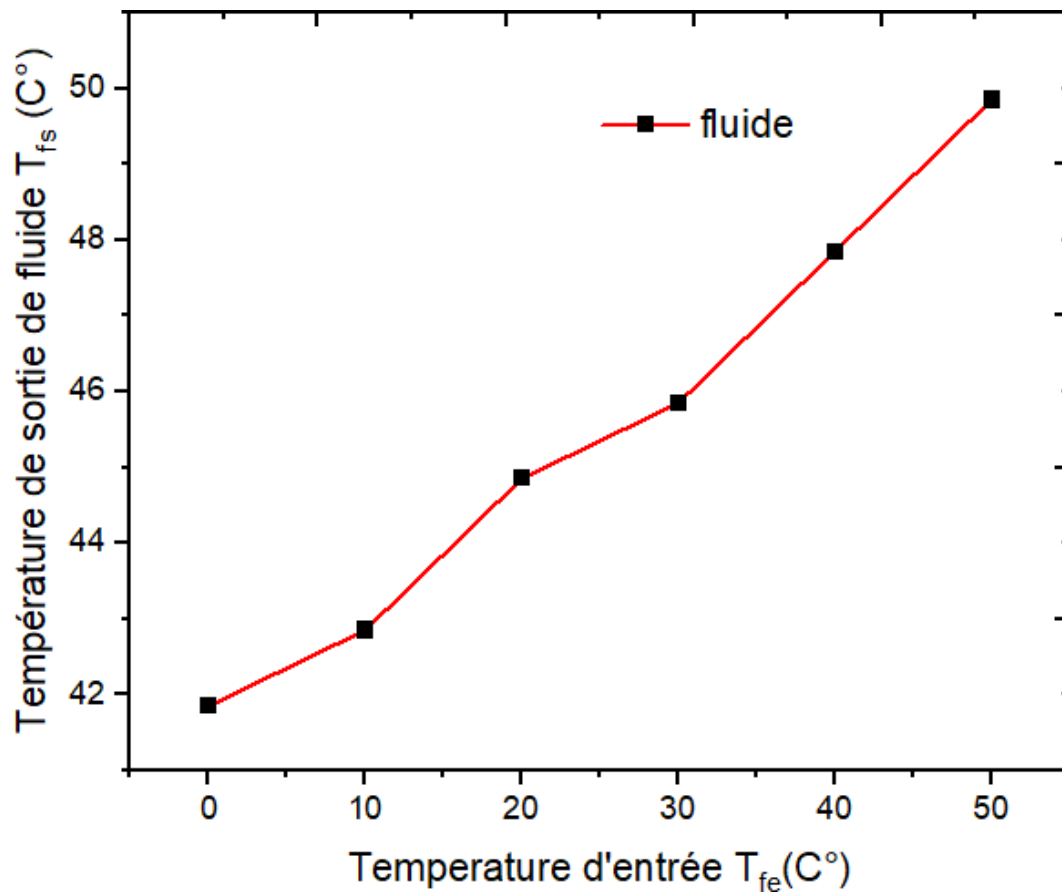


Figure IV.05 : variation de température de sortie en fonction de la température d'entrée

La courbe représentée sur la Fig. 05 montre la loi de variation de la température de soufflage en fonction de la hauteur du conduit. Il est à noter que l'augmentation progressive de l'élévation de la température entriez génère une élévation de la température sortie

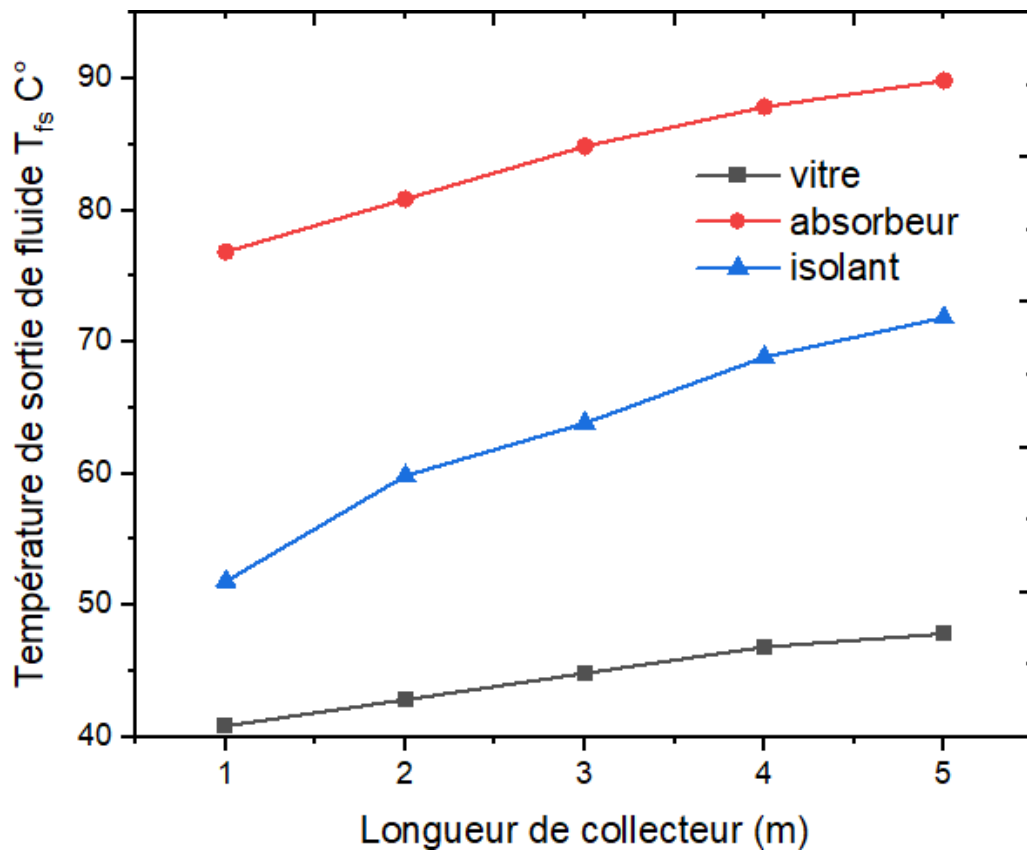


Figure IV.06 : Variation de la température de sortie en fonction de la longueur de collecteur

La figure 06 montre que les températures du verre et des composants absorbants et isolants de la plaque générée par le modèle augmentent avec l'augmentation de la longueur de collecteur à un débit de 0,02 kg/s. Il a également été montré que la température de l'adsorbant était la plus élevée, et cela était dû à son coefficient d'absorption plus élevé que les autres composants.

3. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter et de valider les résultats des modèles mathématiques développés pour analyser les bilans énergétiques des panneaux solaires à air double passe en régime stationnaire. La comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'expérimentation ainsi qu'avec ceux de la littérature a confirmé la validité et la précision des modèles proposés. De plus, l'étude paramétrique réalisée a permis d'optimiser le dimensionnement du panneau solaire plan à air, en identifiant les paramètres clés qui influencent les performances énergétiques. Les principaux résultats graphiques ont été présentés sous forme de courbes et de tableaux, offrant une visualisation claire et concise des conclusions obtenues. Ces résultats fournissent des informations essentielles pour la conception et l'amélioration des panneaux solaires à air double passe, contribuant ainsi au développement des technologies solaires durables.

4. Reference bibliographique

- [1] Fudholi, K. Sopian, M. H. Ruslan and M. Y. Othman, Performance and cost benefits analysis of double-pass solar collector with and without fins, *Energy Conversion and Management*, vol. 76 pp. 8-19, 2013. <http://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.015>

Conclusion générale

L'objectif de cette étude était de contribuer à la recherche sur les phénomènes de transfert thermique dans les systèmes de collecteurs solaires à air, en se concentrant sur les propriétés et les mécanismes de transfert de chaleur en régime stationnaire. Pour commencer, nous avons effectué une revue bibliographique succincte des travaux existants dans la littérature portant sur la perspective thermique et dynamique des capteurs solaires plans à air double passage. Notre étude a accordé une attention particulière aux contributions théoriques, qui ont permis de quantifier certains paramètres physiques et thermiques à différents points de l'écoulement d'air à travers les panneaux solaires.

Ensuite, nous avons exposé les modèles mathématiques et numériques utilisés pour simuler le transfert de chaleur dans un capteur solaire à air à double passage. En appliquant les équations qui régissent le problème étudié, nous avons divisé le collecteur en éléments différentiels afin de déterminer les profils de température de chaque composant du capteur. De plus, nous avons effectué une étude paramétrique pour évaluer les performances thermiques des collecteurs examinés. Les résultats indiquent que l'augmentation de la longueur du collecteur et la diminution de la hauteur du canal entraînent une augmentation de la température du fluide caloporteur en sortie, ainsi qu'une amélioration du rendement thermique et de la puissance utile.

Notre contribution principale dans cette thèse, sur le plan théorique, est le développement d'un code de calcul numérique permettant de simuler le fonctionnement dynamique de la chaîne énergétique des capteurs solaires à air à double passage. Ce code, basé sur la méthode des différences finies, repose sur un ensemble d'équations dérivées d'un modèle physique détaillé, prenant en compte les caractéristiques thermo-physiques spécifiques des différents éléments du capteur solaire plan à air.

Ce code a été largement validé par une série d'expérimentations que nous avons menées et exposées dans ce mémoire de thèse. Les expériences ont été conçues pour évaluer le comportement thermique des capteurs en fonction des conditions extérieures telles que l'ensoleillement et la température, ainsi que pour différents débits de fluide.

Les résultats de cette étude représentent une contribution significative à l'enrichissement des connaissances et à la recherche sur la convection forcée à l'intérieur des conduits, en particulier dans le contexte des capteurs solaires à air. L'ensemble des résultats présente un caractère novateur et met en évidence une grande richesse phénoménologique.

Des résultats obtenus qui mettent en évidence l'influence des paramètres internes et externes sur le rendement instantané, on peut tirer les résultats suivants

- On a montré aussi que la température de l'absorbeur est la plus élevée, ceci est dû au son coefficient d'absorption plus grand par rapport à vitre et isolant.
- Il a également été montré que plus on augmente la longueur de collecteur, plus la température de sortie est élevée.
- Il a également été démontré que plus la température ambiante est élevée, plus la température de sortie est élevée.
- L'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.
- Il a également été prouvé que plus la hauteur du canal est basse, plus la température de sortie est élevée.
- Il a également été prouvé que plus le débit massique est bas, plus la température de sortie est élevée.