



إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنحزة من طرف الطالبة التالية أسماؤهم:

- 1- الطالب (ة): قوبح ابراهيم
- 2- الطالب (ة): غندور اسام
- 3- الطالب (ة):

تخصص: Electrotechnique Energie renouvelables en electrotechnique

نصح نحن الأستاذ (ة):

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
عكرمي خوزي	M A A	مصصح (1)	
دمشي نيا مياك	M C B	مصصح (2)	
عزاوي محمد	M C B	مؤطر	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Effet des couches sélectives sur la performance d'un
Capteur relais thermique

إمضاء رئيس القسم

العلوي عبد اللطيف
رئيس قسم الآلية
والكهرباء وميكانيك





الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

**Effet des couches sélectives sur la performance d'un capteur
solaire thermique**

Présenté par :

GHANDOUR Islam

GOUDJA Ibrahim

Soutenue publiquement le:

Devant le jury :

CHERIF Salah

MCB

Univ. Ghardaïa

Président

MAIZ HADJ AHMED Hamza

MCB

Univ. Ghardaïa

Examineur

AKERMI Faouzi

MAA

Univ. Ghardaïa

Examineur

AZZAOUI Mohammed

MCB

Univ. Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2023/2024

Remerciements

*Nous remercions Dieu de nous avoir fourni force et patience pour
faire ce travail.*

*Tout d'abord, nous adressons nos sincères remerciements au Dr.
AZZAOUI Mohammed, qui a affiché sa présence tout pour nous aider,
pour nous guider, Aussi pour sa confiance et sa compréhension ce
qu'il nous a toujours prouvé.*

*Je tiens à exprimer également mes plus profonds remerciements à tous
les membres de jury,*

Dr CHERIF Salah, Professeur à l'université de Ghardaïa ;

Dr AKRMI Faouzi, Professeur à l'université de Ghardaïa ;

Dr MAIZ Hadj Ahmed Hamza, Professeur à l'université de Ghardaïa;

qui ont accepté d'examiner ce travail :

*Je remercie également tous les membres des Laboratoires MESTEL de
l'Université de Ghardaïa pour leurs conseils, aides et encouragements*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à tous les
membres de notre famille en particulier nos parents pour leur aide et
pour leur précieux soutien.*

*Nous remercions tous nos collègues et tout le monde qui a contribué
directement ou indirectement aux résultats de ces travaux,*

Nous les remercions tous.

Dédicace

Grâce à Dieu tout puissant, je dédie ce modeste travail

- *A ma chère mère l'amour et la vie.*
- *A mon chère père ma force et ma détermination.*
- *A ma très chère sœur.*
- *A mes chers frères surtout Ismail , Nassime, Ilyes.*
- *A tous ma famille et mes amis*
- *A tous ceux qui me sont chers*
- *A toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.*

GHANDOUR Islam

إهداء

الحمد لله وكفى والصلاة والسلام على الحبيب المصطفى وآله
ومن وفى الحمد لله الذي وفقنا للوصول إلى ما هو مراد أما بعد:
✓ أهدي عملي هذا إلى من كلَّه الله بالهيبة والوقار إلى من كلَّت
أنامله ليقدم لنا لحظة السعادة إلى من حصد الأشواك عن دربي
ليمهد لي طريق العلم أرجو من الله أن يمد في عمرك لتري ثمارا
قد حان قطفها بعد طول انتظار

أبي العزيز.

✓ إلى حكمتي ... و علمي... إلى أدبي ... و حلمي إلى ينبوع الصبر
والتفاؤل والأمل إلى كل من في الوجود بعد الله ورسوله

أمي الغالية.

✓ إلى من أحبهم ولا تكتمل سعادتي إلا بهم إخوتي وإخواني إلى
أمي الثانية عمتي
✓ إلي من سار معي في الدراسة خطوة بخطوة وكان عوناً لي في
كل مساري خالي محمد و صاحب القلب الكبير خالي عبد الرحمان .
✓ إلى كل العائلة الكريمة
✓ إلى كل عزيز إلى كل صديق إلى كل حبيب.

قودج إبراهيم

ملخص

في بحثنا هذا نهتم بدراسة اللاقط الحراري الشمسي المسطح، و تحديدًا المواد الانتقائية وتأثيرها على أداء اللاقط. من أجل تحقيق هذا الهدف، كتبنا المعادلات التوازن الحراري على مستوى كل جزء من اللاقط الشمسي. لقد قمنا بتقطيع المعادلات التفاضلية الناتجة وصياغتها في شكل مصفوفات، ثم قمنا بحلها باستخدام طريقة غوس سيدل. قمنا بحساب الإستطاعة الإشعاعية الممتصة من طرف الزجاج و من طرف اللوحة الممتصة و قمنا بحساب درجات الحرارة للعناصر المختلفة للاقط الحراري الشمسي و هذا في حالة لوحة امتصاصية معدنية مغطاة إما بطبقة رقيقة من الدهان الأسود أو بأغشية انتقائية مثل الألمنيوم المؤكسد، والفولاذ المصقول على النحاس، أو الألمنيوم المؤكسد، والفولاذ المصقول، والنحاس أكسيد النحاس. أظهرت النتائج أن الإستطاعة الإشعاعية الممتصة عند الظهيرة من قبل لوحة النحاس (أو الألمنيوم) مدهونة بدهان أسود تبلغ 750 واط/متر مربع، تليها لوحة مغطاة بطبقة انتقائية من CuO على الألمنيوم بقوة تقدر بـ 719 واط/متر مربع. وكانت أقصى درجة حرارة تم الحصول عليها هي 64.50 درجة مئوية للممتص عندما استخدم CuO كطبقة انتقائية على الألمنيوم، متفوقة على الدهان الأسود والأغشية الانتقائية الأخرى.

الكلمات المفتاحية: الاستطاعة الإشعاعية، اللاقط الشمسي الحراري، الطبقات الانتقائية.

Résumé

Dans notre travail, nous intéressons à l'étude du capteur solaire thermique plan, particulièrement les matériaux sélectifs et ses effets sur les performances du capteur solaire. Pour cet objectif, nous avons écrit le bilan thermique au niveau de chaque composante du capteur solaire. Nous avons discrétisé les équations différentielles résultantes et nous les écrivons sous forme matricielle puis nous les résolvons en utilisant la méthode de Gauss Seidel. Nous avons calculé la puissance de rayonnement absorbée par le vitrage et par la plaque absorbante et les températures de différents éléments du capteur solaire thermique pour une plaque absorbante métallique recouverte d'une mince couche de peinture noire ou par des couches sélectives comme aluminium anodisé, Acier poli sur le cuivre ou aluminium anodisé, Acier poli, CuO sur l'aluminium. Le résultat obtenu montre que la puissance de rayonnement absorbée à midi par une plaque de cuivre (ou Aluminium) peint par une peinture noire vaut 750 W/m², suivie par une plaque revêtue par une couche sélective CuO sur l'aluminium avec une puissance estimée 719 W/ m². La température maximale obtenue est de 64,50°C pour l'absorbant lorsque le CuO était placé comme une couche sélective sur l'aluminium ce qui était mieux que la peinture noire et les autres couches sélectives.

Mots clés : Puissance de rayonnement, capteur solaire thermique, couches sélectives.

Abstract

In our work, we studied the flat plate solar thermal collector, particularly on selective materials and their effects on the collector's performance. To achieve this objective, we developed the thermal balance for each component of the solar collector. We discretized the resulting differential equations and formulated them into matrix form, then solved them using the Gauss-Seidel method. We calculated the absorbed radiation power by the glazing and absorber plate and temperatures of various elements of the solar thermal collector for a metallic absorber plate coated either with a thin layer of black paint or with selective coatings such as anodized aluminum, polished steel on copper or anodized aluminum, polished steel, and CuO on aluminum. The results show that the radiation power absorbed at noon by a copper (or aluminum) plate painted with black paint is 750 W/m², followed by a plate coated with a CuO selective layer on aluminum with an estimated power of 719 W/m². The maximum temperature obtained is 64.50°C for the absorber when CuO was used as a selective layer on aluminum, which was superior to black paint and other selective coatings.

Keys words : radiation power ,solar thermal collector , selective layers.

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les capteurs solaires thermiques	
I.1 Introduction	3
I.2 Historique des capteurs solaires plans	4
I.3 Types des capteurs solaires.....	5
I.3.1 Capteurs solaires photovoltaïques	5
I.3.2 Capteurs solaires thermiques	5
I.4 Matériaux constituant la plaque de l'absorbeur.....	9
I.5 Principe fonctionnement d'un capteur solaire plan	11
I.6 Différents types des capteurs thermiques plans.....	12
I.6.1 Capteurs plans sans vitrage	12
I.6.2 Capteurs plans vitrés.....	12
I.6.3 Capteurs sous vide	13
I.6.4 Capteur solaire à air.....	14
I.6.5 Capteur solaire à eau	14
I.7 Paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan	15
I.7.1 Paramètres externes	15
I.7.2 Paramètres internes.....	15
I.8 Détermination les caractéristiques du capteur solaire.....	15
I.8.1 Pertes optiques.....	16
I.8.2 Pertes thermiques.....	16
I.9 Structure de rayonnement.....	16
I.9.1 Réflexion	16
I.9.2 Transmission.....	16
I.9.3 Absorption	16
I.10 Spectre du rayonnement solaire.....	17
I.11 Comment fonctionne le processus absorbée rayonnement.....	17

I.11.1	Paramètres optiques des matériaux	18
I.11.2	Caractéristiques des surfaces sélectives	18
I.11.3	Caractérisation optique	19
I.12	Comportement thermique d'absorbeur	19
I.12.1	Autres caractérisations.....	21
I.13	Conclusion.....	22
Chapitre 2 : Etude théorique et modélisation numérique		
II.1	Introduction	23
II.2	Différents modes de transferts thermiques	23
II.2.1	Conduction	23
II.2.2	Convection.....	23
II.2.3	Rayonnement.....	27
II.3	Puissances absorbées	28
II.4	Pertes	28
II.5	Échanges thermiques	30
II.5.1	Échanges thermiques par convection	30
II.5.2	Échanges thermiques par rayonnement	32
II.5.3	Échanges thermiques par conduction	33
II.5.4	Échanges thermiques au niveau de la vitre.....	34
II.6	Rendement optique	34
II.7	Rendement.....	34
II.8	Etablissement des équations du système	36
II.9	Hypothèses simplificatrices.....	36
II.10	Mise en équation des différents échanges thermiques.....	36
II.11	Discretisation des équations	38
II.12	Conclusion.....	43
Chapitre 3 : Résultats et discussions		
III.1	Introduction	43

III.2	Position du problème	43
III.2.1	Structure du programme numérique	43
III.2.2	Préparations des données d'entrée.....	43
III.2.3	Validation de modèle.....	45
III.3	Résultats et comparaisons.....	46
III.3.1	Puissance absorbée par l'absorbeur lorsqu'on utilise quelques surfaces sélectives	46
III.3.2	Rendement optique	47
III.3.3	Effet des couches sélectives sur la température de la plaque absorbante.....	47
III.3.4	Evolutions des températures des différents composants du capteur	50
III.4	Conclusion.....	52
IV.	Conclusion générale	54
	Références	

LISTE DES FIGURES

Figure (I.1) : Schéma d'un capteur solaire.....	6
Figure (I.2): Vue en coupe d'un capteur plan.	6
Figure (I.3): Réflecteur parabolique.	7
Figure (I.4): cylindre-parabolique.....	7
Figure (I.5): Centrale à tour.	7
Figure (I.6): Centrale Miroirs de Fresnel.	8
Figure (I.7): Composants d'un capteur solaire.....	8
Figure (I.8): Schéma de principe d'un capteur solaire plan.....	11
Figure (I.9): Capteurs plans sans vitrages.	12
Figure (I.10): Capteur solaire thermique plan vitré.	13
Figure (I.11): Capteur sous vide.	13
Figure (I.12): Capteur solaire thermique à air.	14
Figure (I.13): capteur solaire thermique à eau.	14
Figure (I.14): Absorption, transmission et réflexion	17
Figure (I.15): Spectrale du rayonnement solaire	17
Figure (I.16): Schéma récapitulatif des principaux types d'absorbeurs sélectifs	18
Figure (I.17): Composants d'un capteur solaire plan.....	21
Figure (II.1): coupe du capteur solaire thermique.	38
Figure (III.1) : variation de puissance absorbée en fonction de TSV.....	46
Figure (III.2): Evolution des couches sélectives (TpAln—TpAc) sur le cuivre et peinture noire sur Cu.	48
Figure (III.3): Evolution des températures pour différentes revêtements des surfaces sur l'aluminium.....	49
Figure (III.4): Variation des températures pour la meilleure couche sélective CuO sur l'aluminium.	50
Figure (III.5): Les températures des différents composants de capteur solaire (Al-CuO).	51

LES TABLEUX

Tableau (I.1): Matériaux utilisés comme absorbeurs .	10
Tableau (I.2): matériaux et paramètres optiques.	18
Tableau (II.1) : Caractéristiques radiatives de quelques surfaces.	32
Tableau (III.1): Les paramètres internes, externes.	43
Tableau (III.2): Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques.	44
Tableau (III.3): propriétés optiques de quelques revêtements sélectifs .	44
Tableau (III.4) : Changement de température de fluide.	45
Tableau (III.5): Rendement optique de chaque couche sélective.....	47
Tableau (III.6) : les valeurs de rendement optique (Peinture noir sur aluminium, oxyde de cuivre sur aluminium.....	47
Tableau (III.7) : Température maximale et minimale de (CuO).	50

NOMENCLATURE

Abréviations

dd : Durée du jour heure (heure)

TSV : Temps Solaire Vrai (heure)

Nombres adimensionnels

Pr : Nombre de Prandtl

Rz : Nombre de Reynolds

Gz : Nombre de Graetz

Nu : Nombre de Nusselt

Introduction générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables font référence à des sources d'énergie caractérisées par un renouvellement naturel durable, les rendant pratiquement inépuisables dans le contexte des échelles de temps humaines. Ces sources d'énergie proviennent de phénomènes naturels cycliques ou continus influencés par les corps célestes, notamment le soleil pour la chaleur et la lumière, ainsi que la lune (pour les marées) et la terre (pour l'énergie géothermique). La durabilité des énergies renouvelables dépend du taux de consommation de la source et de sa vitesse de régénération ultérieure.

Il est important de noter que la production de capteurs solaires peut varier en fonction de leur type spécifique. Il existe différents types de capteurs solaires tels que les panneaux solaires photovoltaïques utilisés pour la production d'électricité et les capteurs solaires thermiques utilisés pour la production de chaleur. Chaque type de capteur solaire possède ses propres caractéristiques de conception et de fabrication [1].

L'utilisation la plus simple et la plus immédiate de l'énergie solaire concerne la production d'eau chaude à des fins résidentielles. Il s'agit de l'une des applications les plus anciennes, de nombreux systèmes de chauffe-eau solaires ayant été formulés dans le monde entier depuis le début du 20e siècle, chaque système suivant présentant une efficacité accrue. Un système de chauffage solaire comprend généralement trois composants fondamentaux : le captage, le stockage et la distribution. L'élément central de la conversion de l'énergie solaire est le captage, qui implique principalement le capteur solaire. Ce composant est chargé de transformer l'énergie solaire en chaleur et de la transférer ensuite au fluide caloporteur contenu dans son absorbeur. Par conséquent, étant donné le rôle central joué par le capteur solaire dans la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, de nombreuses recherches se sont concentrées sur l'étude du capteur solaire plat, en particulier dans le but d'améliorer son efficacité instantanée, qui représente l'indicateur de performance le plus crucial. L'efficacité instantanée du capteur solaire plat est influencée par des facteurs tels que la géométrie du capteur, les paramètres internes et les conditions externes telles que l'irradiation solaire, la température ambiante, entre autres.

Un des éléments principaux de capteur solaire est l'absorbeur. Ses propriétés sont les clefs dans le développement de ces différentes technologies solaires. Parmi les objets importants de recherche est l'étude des couches sélectives de l'absorbeur solaire et leurs propriétés optique,

dans le but de capter un maximum d'énergie incidente sans en réémettre sous forme infrarouge (sélectivité).

Dans ce travail, nous allons faire dans le premier chapitre une bibliographie sur les capteurs solaires thermiques, nous nous intéressons par les types des capteurs solaires thermiques et ses caractéristiques géométriques et les éléments principaux des capteurs solaires et aussi les modes de fonctionnement et les propriétés optiques des couches sélectives. Dans le deuxième chapitre nous allons modéliser le système thermique résultant des capteurs solaires thermiques. Dans le troisième chapitre, nous discuterons des résultats obtenus correspondant des couches sélectives Aluminium anodisé (An), Acier Poli (Ac) et l'oxyde de cuivre (CuO) et de la manière dont elles affectent la température et le rendement du système solaire thermique.

Chapitre 1

Etude bibliographique sur

les capteurs solaires

thermiques

Chapitre 1 : Etude bibliographique sur les capteurs solaires thermiques

I.1 Introduction

Un capteur solaire thermique est destiné à convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basses et moyennes températures et au transfert au fluide caloporteur. La technologie de ces systèmes est simple : elle se repose sur le pouvoir absorbant d'une surface traitée appelé l'absorbeur. Le capteur solaire combine deux principes physiques : les effets de serre et celui du corps noir.

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour :

- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages
- Faire fonctionner des moteurs thermiques
- Alimenter des machines de réfrigération.

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur et les pertes de chaleur par ces différentes faces.

Avantages :

- Technologies accessibles : Faciles à maîtriser et adaptées à toutes les régions.
- Matériaux et techniques courants : Similaires à ceux du chauffage traditionnel et des sanitaires.
- Formation simple : La main-d'œuvre nécessite peu de formation supplémentaire.
- Adaptabilité : Production d'énergie modulable selon les besoins.
- Coûts de maintenance réduits : Faibles coûts de maintenance et de fonctionnement, bien que l'entretien soit nécessaire.

Inconvénients :

- Variabilité temporelle : Changement selon les saisons, surtout sous les climats tempérés, nécessitant un stockage coûteux.
- Énergie diffuse : Puissance limitée par unité de surface, compliquant la satisfaction des besoins importants (comme pour les grands ensembles d'appartements).

I.2 Historique des capteurs solaires plans

Les premiers travaux sur la théorie du capteur plan ont été établis en 1942 par HATELL et WOERTZ [2]. Ces travaux ont été menés afin de déterminer empiriquement le coefficient de perte thermique en avant du capteur (entre l'absorbeur et l'environnement)

Depuis, d'autres recherches ont été faites sur différentes configurations du capteur plan, comme celle de BLISS en 1959 [3], qui a déterminé le rapport des résistances thermiques représentant les échanges thermiques entre le fluide, l'absorbeur et l'extérieur, ceci pour un fluide circulant entre deux plaques parallèles en premier, un absorbeur constitué de tubes soudés à des ailettes et enfin à des tubes soudés, au-dessus d'une plaque absorbante.

Des études portant sur différentes configurations de la plaque, ont été menées. ABDEL KHALIF [4] a étudié un capteur plan dont le tube en serpentins est soudé au-dessus de l'absorbeur

En 1959, les recherches de WHILIER [5], ont été faites pour des zones particulières des capteurs, elles étaient basées sur la détermination de la fixation la plus appropriée entre le tube et la plaque absorbante.

Les recherches de KLEIN [6], portent sur la détermination du coefficient de perte thermique vers l'avant du capteur en se basant sur les résultats de HOTELLE et WORTZ [7], qui seront améliorées plus tard par d'autres.

Des études plus récentes visent à l'optimisation des capteurs solaires plans sont effectuées, dans lesquelles on cherche à augmenter les rendements par la minimisation des pertes vers l'avant du capteur comme par exemple A.BENKHLIFA [8], en comparant des résultats numériques avec les résultats expérimentaux trouvés par les auteurs précités. De même, l'influence de quelques paramètres sur le coefficient des pertes thermiques à l'avant du capteur.

Des études ont été faites également sur les transferts radiatifs dans l'absorbeur, ainsi que la position optimale du capteur par rapport au soleil, à savoir l'orientation et l'inclinaison du capteur [9].

Dans le système de chauffage d'eau, qui est considéré comme l'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire, on trouve plusieurs configurations d'installations, selon le type de CHAOUACHI, S.GABSI [10].

Les études de B.CHAOUACHI et S.GABSI ont été faites pour examiner expérimentalement un chauffe-eau solaire, déterminer ses performances et la manière idéale de stocker l'énergie thermique qu'on récupère. Les performances peuvent être améliorées

par l'utilisation de surfaces sélectives de captation et d'absorption, et le perfectionnement de l'isolation thermique pour diminuer les pertes nocturnes.

Il y a dans la littérature de très nombreuses études sur l'analyse économique et environnementale (étude de l'impact sur l'environnement) du cycle de vie des chauffe-eau solaires.

Ces travaux ont été complétés par les recherches de SOTERIS A. KALOGIROU en 2008, où il a discuté en détail les bénéfices des systèmes solaires dans la réduction de l'impact néfaste des systèmes à énergie conventionnelle [11].

Dans cette étude, faite par SOTERIS A. KALOGIROU, L'auteurs ont fait la présentation des différents systèmes de collecte de l'énergie solaire et leurs applications, l'étude s'étale sur plusieurs points parmi lesquels, une introduction sur l'historique de l'utilisation l'énergie solaire, la description des différentes technologies de captation de l'énergie, une analyse optique, thermique et thermodynamique des collecteurs, et la description des méthodes utilisées pour augmenter leurs performances. Et enfin, la présentation de quelques applications types, afin de démontrer l'extension de leurs applicabilités dans l'industrie.

Une étude des transferts thermiques dans une cuve de stockage et son enveloppe d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire à été faite par M. DOUCHA en 2012, où ils'intéresse aux transferts thermiques qui ont lieu en son sein aussi bien au niveau de l'enveloppe que dans la cuve elle-même. Cette étude a pour objectifs d'aider au développement de cette cuve de stockage et à l'optimisation de ses performances [12].

I.3 Types des capteurs solaires

Les capteurs solaires peuvent être divisés en deux groupes en fonction de la manière dont ils convertissent l'énergie. Les deux principales catégories de capteurs solaires sont les suivantes :

I.3.1 Capteurs solaires photovoltaïques

Ce type de capteur transforme l'énergie solaire en énergie électrique.

I.3.2 Capteurs solaires thermiques

Les dispositifs appelés capteurs de chaleur solaire utilisent l'effet de serre pour transformer le rayonnement solaire en énergie thermique. L'effet de serre est un effet de piégeage de la chaleur. Dans notre travail, on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique.

I.3.2.1 Définition d'un capteur solaire thermique

Un capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour collecter l'énergie solaire et la convertir en chaleur utilisable. Il est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un revêtement sélectif, et d'une isolation thermique. Son rôle est de capter le rayonnement

solaire et de transférer la chaleur à un fluide caloporteur, qui peut être utilisé pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage des locaux. Les capteurs solaires thermiques permettent d'utiliser l'énergie solaire propre de manière durable.

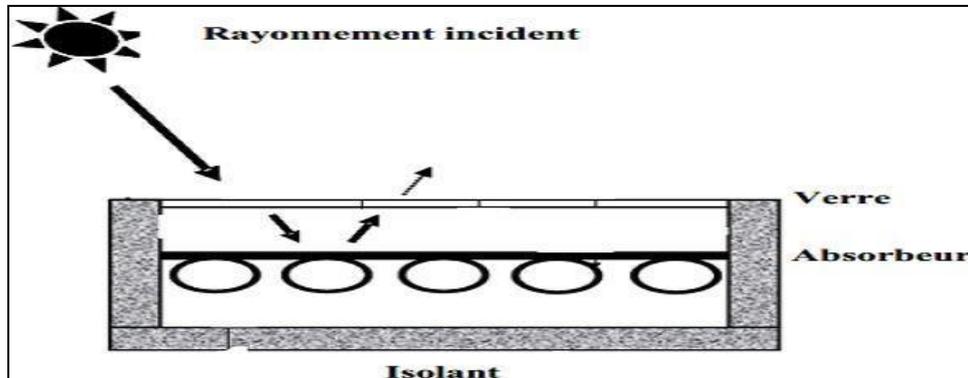


Figure (I.1) : Schéma d'un capteur solaire.

I.3.2.2 Catégories des capteurs thermiques

Les capteurs à basse température, à moyenne température et à haute température constituent les trois principales catégories de capteurs solaires thermiques [13].

Il n'existe essentiellement que deux types de capteurs solaires thermiques, les capteurs plans et les capteurs solaires à concentration.

I.3.2.3 Capteurs plans

Ce sont les capteurs solaires les plus couramment utilisés et ils sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Le flux tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser 1kw/m^2 . Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C . Ils sont essentiellement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage d'habitation [14].



Figure (I.2): Vue en coupe d'un capteur plan.

I.3.2.4 Capteurs solaires à concentration

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très haute température. Afin de monter les températures dans les capteurs solaires, il apparaît de nombreux types de capteurs solaires conduit à une augmentation de l'intensité lumineuse

absorbée, ce qui rend les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines, voire plusieurs milliers de degrés Celsius.

Les photographies et figures ci-dessous mettent en évidence certains des types de capteurs solaires les plus courants.

- Systèmes à réflecteur parabolique

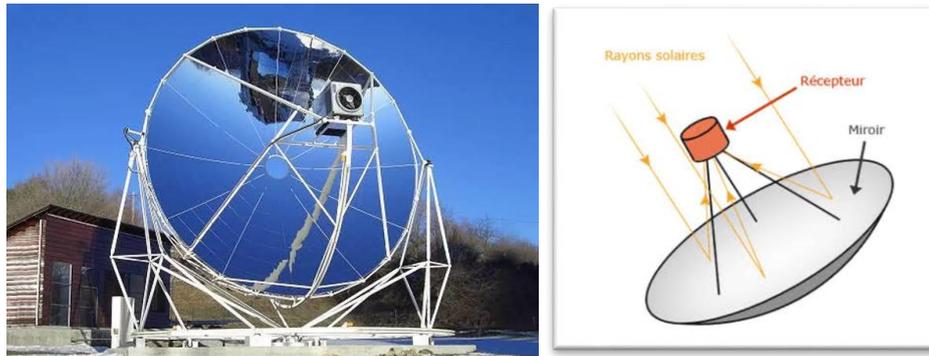


Figure (I.3): Réflecteur parabolique.

- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.



Figure (I.4): cylindre-parabolique.

- Systèmes de centrale à tour.

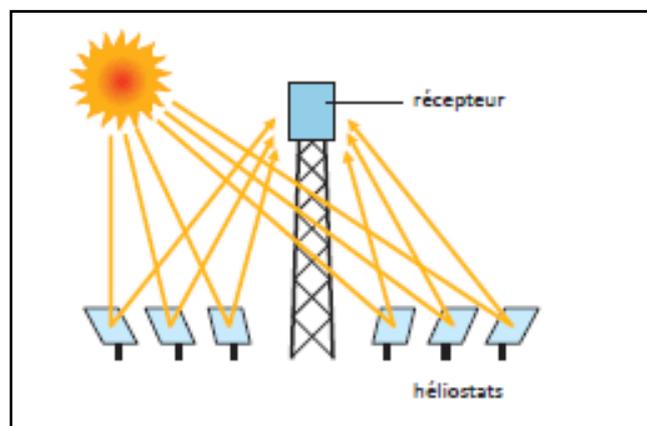


Figure (I.5): Centrale à tour.

- Miroirs de Fresnel Figure



Figure (I.6): Centrale Miroirs de Fresnel.

I.3.2.5 Composantes d'un capteur plan

Un capteur plan se compose principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre. (Figure I.7).

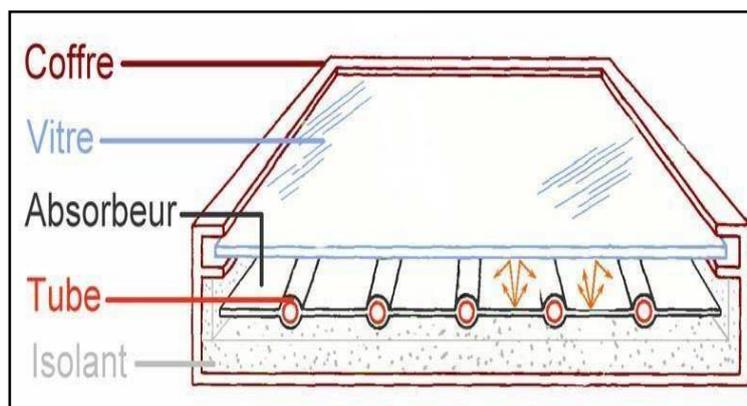


Figure (I.7): Composants d'un capteur solaire.

La couverture transparente : d'un capteur solaire est fabriquée à partir d'un matériau qui laisse passer le rayonnement visible et les UV tout en bloquant le rayonnement infrarouge. Cela crée un effet de serre qui permet d'augmenter le rendement du capteur et de maintenir des températures supérieures à 70°C. Les matériaux couramment utilisés sont le verre simple ou traité, qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à une faible teneur en oxyde de fer, mais il existe également des alternatives synthétiques disponibles.

Cette couverture transparente réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur et empêche le refroidissement de celui-ci par le vent.

L'absorbeur : quant à lui, est le composant central du capteur solaire. Il absorbe le rayonnement solaire global, principalement de courtes longueurs d'onde, et le convertit en chaleur[7].

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur.

Fluide caloporteur : Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de propriétés physiques et chimiques qu'il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée.

Dans le cas des capteurs plans, on peut utiliser de l'eau et dans certain utilisation à laquelle on ajoute un antigel(généralement de l'éthylène glycol), ainsi on peut utiliser de l'air dans une autre utilisation.

L'isolation thermique : Les isolants des capteurs solaires sont des couches utilisées pour réduire les pertes de chaleur et augmenter l'efficacité de la collecte de l'énergie solaire dans les systèmes d'énergie solaire. Ces isolants réduisent le transfert de chaleur vers et depuis le capteur solaire, ce qui contribue à améliorer les performances du système et à augmenter son efficacité. Les isolants pour capteurs solaires sont généralement constitués de matériaux d'isolation thermique tels que l'aluminium recouvert de polyéthylène et le polyuréthane, et sont placés entre le capteur solaire et la surface sur laquelle il est installé. Ces isolants aident à prévenir les pertes de chaleur du capteur vers l'atmosphère environnante et à maintenir la température de l'eau ou du matériau chauffé par le capteur. En général, l'utilisation de bons isolants peut augmenter l'efficacité du système d'énergie solaire et réduire les coûts d'exploitation et de maintenance.

Pour réduire les pertes thermiques aux bords du capteur, il est conseillé d'installer une ou plusieurs couches d'isolant résistantes aux hautes températures, sans risque de dégazage. Sinon, des dépôts pourraient se former sur la face intérieure de la couverture. En outre, pour optimiser la résistance thermique, il est essentiel de minimiser la pression entre la plaque, l'isolant et le coffre. Un contact trop serré entre ces surfaces peut créer un film d'air en cas de rugosité élevée, ce qui limite la conduction thermique. [15],[17],[18].

Coffre ou la cadre: Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, en ferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

I.4 Matériaux constituant la plaque de l'absorbeur

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement

dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [15].

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3mm [17].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes .Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [17].

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [17].

Voici les propriétés de quelques matériaux utilisés comme absorbeurs:

Tableau (I.1): Matériaux utilisés comme absorbeurs [17].

Matériaux	Absorptivité α	Emissivité ε	Sélectivité α/ε	Température max (°C)
Nickel noir	0,88 – 0,98	0,03 – 0,25	3,7- 32	300
Graphitique Films	0,876 – 0,92	0,025 – 0,061	14,4 – 36,8	250
Cuivre noir	0,97 – 0,98	0,02	48,5 – 49	250
Chromé noir	0,95 – 0,97	0,09 – 0,30	3,2 – 10,8	350 – 425

L'absorbeur se caractérise par deux paramètres:

- Le facteur d'absorption solaire α (ou absorptivité): le rapport du rayonnement lumineux absorbé par le rayonnement lumineux incident;
- Le facteur d'émission infrarouge ε (ou émissivité): le rapport entre l'énergie rayonnée dans l'infrarouge lorsque l'absorbeur est chaud et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité.

Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevée le transforme en par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du rayonnement I.R ($\epsilon < 0.15, \alpha > 0.9$). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [15].

I.5 Principe fonctionnement d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide. Ce système de captage est basé sur l'effet de serre où le rayonnement capté est dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante [19].

L'absorbeur, à base des effets du corps noir, émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée subit une élévation de température à la traversée du capteur [20].

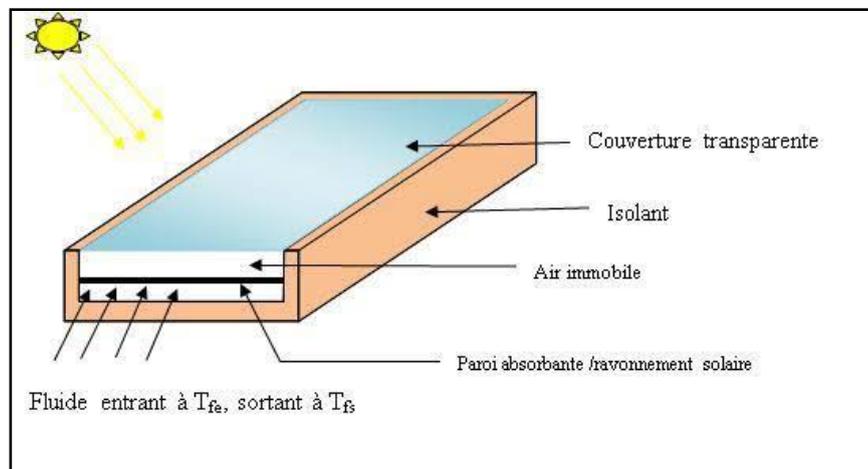


Figure (I.8): Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

Le principe est le suivant :

Le rayonnement solaire, dont le spectre est essentiellement aux longueurs d'onde de la lumière visible (courtes longueurs d'onde), traverse une couverture transparente (ici composée de verre), atteint l'absorbeur, le chauffe, puis transfère l'énergie thermique par convection à l'eau circulant dans le tuyau, et réémet un rayonnement thermique (grande longueur d'onde) vers l'extérieur.

I.6 Différents types des capteurs thermiques plans

Afin d'intercepter l'énergie provenant du rayonnement solaire, il existe plusieurs sortes de capteurs solaires. Dans ce qui suit une brève description de trois types de capteurs solaires plans les plus usuels:

I.6.1 Capteurs plans sans vitrage

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse température (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment de la vente que la température extérieure n'est pas assez élevée. Brassé par de l'air chaud, ces capteurs absorbent la chaleur échangée en particulier au cours de la nuit lorsque la température est élevée en présence du vent à l'extérieur [21].

La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver.



Figure (I.9): Capteurs plans sans vitrages.

I.6.2 Capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plats avec vitrage sont largement répandus et existent sous deux formes principales : les capteurs à eau et les capteurs à air.

Ces capteurs sont particulièrement adaptés pour des applications à température modérée, généralement entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont couramment utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire à petite ou grande échelle, pour des besoins industriels, ainsi que pour le chauffage des piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage et pour chauffer l'air des espaces intérieurs, y compris l'air de ventilation.

En résumé, les capteurs solaires plats vitrés constituent une solution efficace et respectueuse de l'environnement pour exploiter l'énergie solaire dans une variété d'applications, selon les besoins spécifiques de chauffage ou de séchage [21].



Figure (I.10): Capteur solaire thermique plan vitré.

I.6.3 Capteurs sous vide

Les capteurs solaires sous vide sont constitués d'une série de tubes en verre transparents.

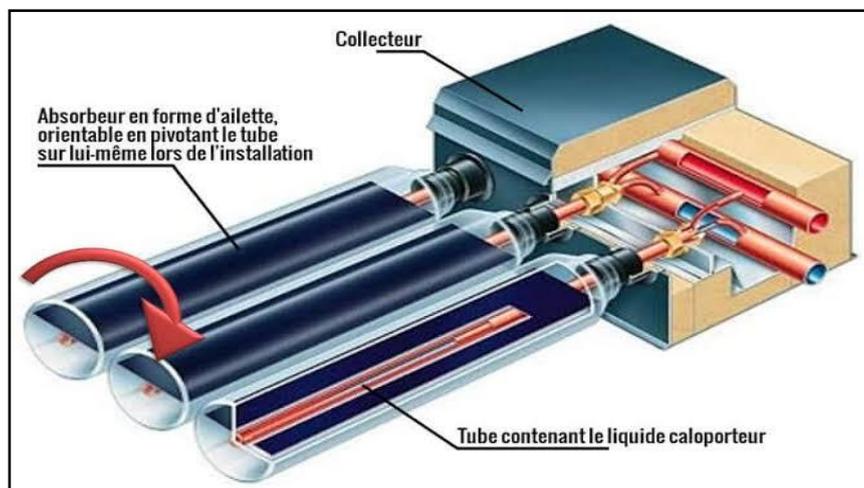


Figure (I.11): Capteur sous vide.

Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à se dissiper sous forme de rayonnement à longue longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation

thermique rapportée ou un coffre de protection [21].

I.6.4 Capteur solaire à air

Contrairement au capteur à eau ou le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en général formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeur plus faible que celui de l'eau [22] :

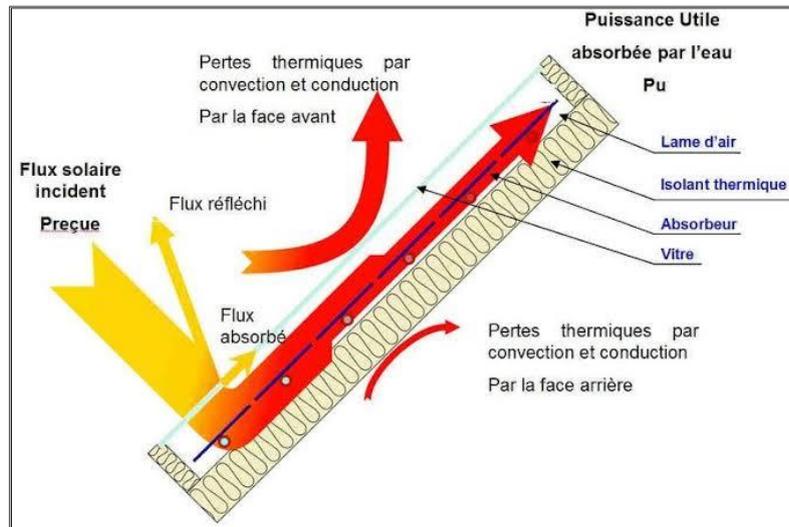


Figure (I.12): Capteur solaire thermique à air.

I.6.5 Capteur solaire à eau

Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant. La figure (I.13) représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur [22].

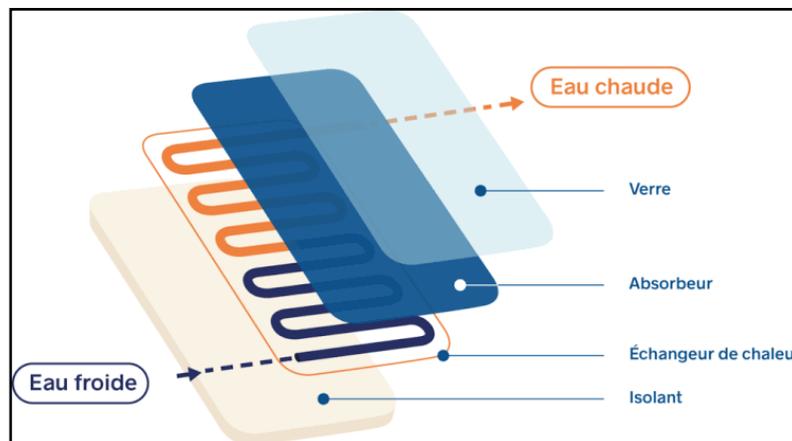


Figure (I.13): capteur solaire thermique à eau.

I.7 Paramètres caractérisant le fonctionnement d'un capteur plan

Les paramètres qui déterminent le fonctionnement d'un capteur solaire plan peuvent être divisés en deux catégories : les paramètres externes et les paramètres internes.

I.7.1 Paramètres externes

Les facteurs externes principaux qui peuvent influencer directement les performances d'un capteur plat sont :

- La luminosité : le rayonnement solaire, la position du soleil, la durée d'exposition au soleil...
- La température ambiante.
- La vitesse du vent.

I.7.2 Paramètres internes

Paramètres géométriques :

Les paramètres de position incluent : l'angle d'inclinaison, l'orientation du capteur et sa surface.

Les dimensions des différents éléments comprennent : l'épaisseur, la longueur et la largeur .

Paramètres de fonctionnement :

La température d'entrée du fluide caloporteur ;

Le débit massique du fluide caloporteur ;

Les températures des différents éléments du capteur ;

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes ; un meilleur rendement du capteur.

I.8 Détermination les caractéristiques du capteur solaire

La puissance d'un capteur dépend de son mode de fonctionnement. En effet, plus la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur du capteur est grande, plus ses pertes thermiques sont importantes, ce qui entraîne une diminution de son rendement [23].

Les capteurs sont caractérisés par :

- Leurs pertes optiques
- Leurs pertes thermiques

Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

I.8.1 Pertes optiques

En premier lieu, les capteurs sont caractérisés par leur rendement optique.

Le rendement optique du capteur représente le pourcentage de la puissance radiative du soleil qui sera réellement absorbée par le capteur.

I.8.2 Pertes thermiques

Lorsque le fluide caloporteur q qui circule dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par conduction et par convection vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un coefficient k exprimé en $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$.

$$P_{th} = k \cdot A \cdot \Delta T \quad (I.1)$$

I.9 Structure de rayonnement

Le rayonnement est un mode d'échange d'énergie par émission et absorption de radiations électromagnétiques. L'échange thermique par rayonnement se fait suivant le processus :

I.9.1 Réflexion

Lorsqu'un faisceau de lumière étroit rencontre la limite entre deux milieux optiquement distincts, une partie de celui-ci peut modifier sa direction de propagation tout en restant dans le même milieu. Cette occurrence optique est appelée réflexion, le rayon lumineux étant réfléchi. Dans le cas d'une surface réfléchissante hautement polie comme un miroir argenté, plus de 95 % de la lumière incidente peut être réfléchie.

I.9.2 Transmission

La partie restante du rayon est absorbée par le second milieu, soit le traverser (si le milieu est transparent, comme le verre ou l'eau), ce phénomène connu sous le nom de transmission (Figure II.1). En cas de transmission, le rayon lumineux traverse le matériau du second milieu et émerge du côté opposé. Dans le cas d'un matériau transparent, les rayons lumineux transmis subissent une décélération et une réfraction. Inversement, dans le cas d'un matériau non transparent (matériau translucide), les rayons lumineux se dispersent dans différentes directions.

I.9.3 Absorption

Dans les scénarios impliquant une absorption, l'énergie de la lumière est assimilée par le matériau et convertie en énergie thermique en raison du piégeage de la lumière.

Généralement, les trois phénomènes (transmission, absorption et réflexion) se produisent simultanément. La distribution de l'énergie entre ces phénomènes dépend de nombreux facteurs tels que l'angle d'incidence, la longueur d'onde et les disparités entre les matériaux adjacents [24].

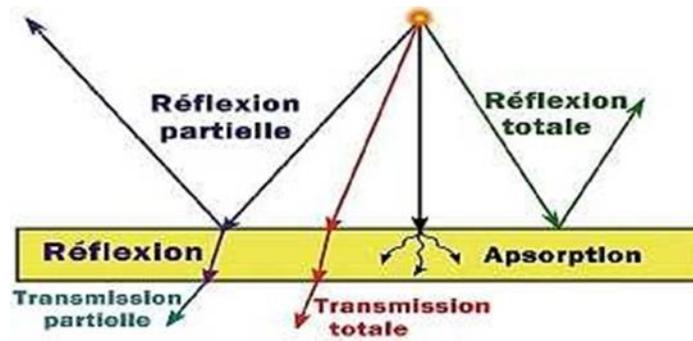


Figure (I.14): Absorption, transmission et réflexion [24].

I.10 Spectre du rayonnement solaire

Le spectre du rayonnement solaire est influencé par des interactions complexes impliquant le rayonnement émis par le soleil, l'atmosphère terrestre et sa surface. La transformation du rayonnement extraterrestre lorsqu'il traverse l'atmosphère se traduit par un spectre qui varie de manière significative, déterminé par des facteurs tels que la composition de l'atmosphère et la géométrie de transmission Figure (I.15).

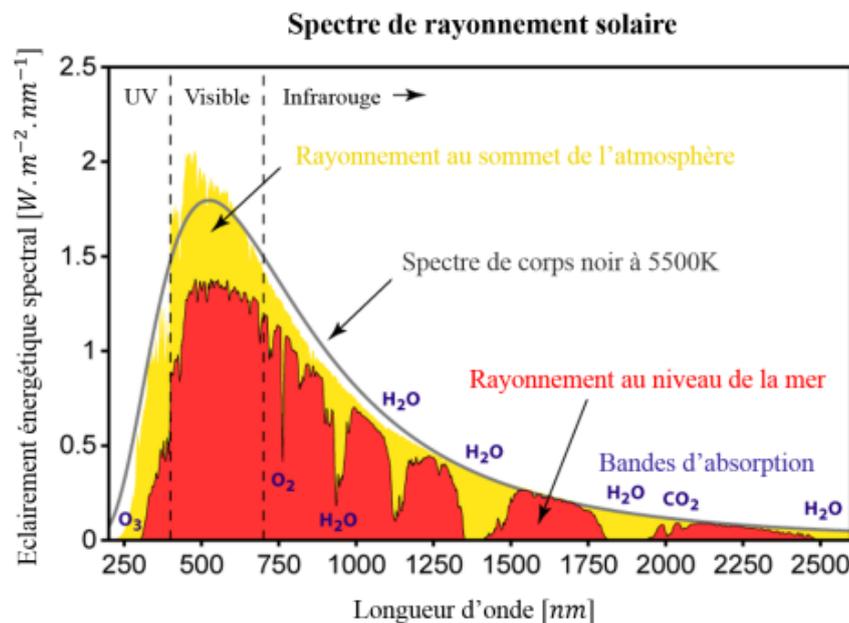


Figure (I.15): Spectrale du rayonnement solaire [25]

I.11 Comment fonctionne le processus absorbée rayonnement

Une partie du rayonnement solaire incident sur le capteur est absorbée ou réfléchi par le verre. L'absorbeur saisit (attrape) l'énergie des ondes électromagnétiques (courtes longueurs d'onde) qui traversent le verre. Lorsqu'il est chauffé, l'absorbeur émet une partie sous forme de rayonnement infrarouge (grandes longueurs d'onde) et de convection. La partie absorbée par la

plaque absorbante qui est considéré comme corps noir est transféré au fluide de travail (fluide caloporteur) par conduction puis par convection [26].

I.11.1 Paramètres optiques des matériaux

Les différents matériaux et caractéristiques optiques sont décrits dans le tableau présenté ci-dessous.

Tableau (I.2): matériaux et paramètres optiques.

Parameters	Matériaux	Reflectivity	Absorptive	Transitivité
Champ de miroir	Miroirs ordinaire	87%	-	-
Tubes absorbeurs	Cuivre	-	85%	45%
Réflecteur secondaire	Inox	83%	-	-
Couverture Transparente	vitre ordinaire	5%	-	91%

I.11.2 Caractéristiques des surfaces sélectives

L'analyse optique conserve certainement son importance cruciale ; l'identification de la composition chimique, de la capacité et de la morphologie de la surface est tout aussi importante.

Les principaux types d'absorbeurs vont être détaillés dans la Figure (I.16) :

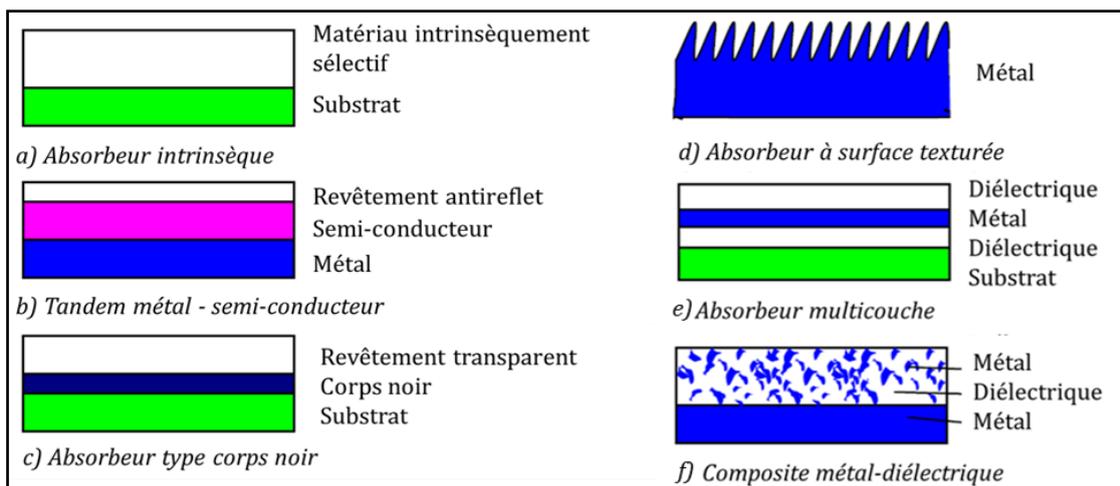


Figure (I.16): Schéma récapitulatif des principaux types d'absorbeurs sélectifs [27].

I.11.3 Caractérisation optique

Pour les échantillons non diffusants, l'évaluation consiste à acquérir la réflectivité bidirectionnelle et potentiellement la transmittivité (dans le cas du traitement du vitrage) dans une plage spectrale de 0,3 à environ 15 ou 20 μm (selon les températures de fonctionnement du matériau), en fonction de l'angle d'incidence et de la polarisation du rayonnement. En particulier, ces valeurs monochromatiques directionnelles constituent la base pour faire la distinction entre le rayonnement direct et le rayonnement diffus atteignant la surface, ou pour calculer les variations de l'absorption solaire au cours d'une journée avec différents angles d'incidence directe du rayonnement sur le capteur. Par la suite, grâce à l'intégration spatiale et en longueur d'onde de ces données, les paramètres a et e peuvent être dérivés, qui peuvent également être obtenus par des mesures calorimétriques. Dans le scénario de diffusion d'échantillons, la mesure se concentre sur la réflectivité directionnelle hémisphérique. Cette étude a utilisé deux sphères d'intégration qui couvrent le spectre visible et l'infrarouge jusqu'à 14 μm . Ces sphères, fabriquées dans nos installations, servent de source et de contenant d'échantillon, l'une étant recouverte de peinture blanche diffusante et l'autre de microbilles de verre recouvertes d'or. Ils facilitent la mesure de la réflectivité directionnelle pour un flux incident isotrope, ce qui, selon le principe de réciprocité, revient à mesurer la réflectivité directionnelle hémisphérique [25].

I.12 Comportement thermique d'absorbeur

a. couche sélective de l'absorbeur :

Un absorbeur, dont la température augmente en raison de sa couche absorbante, libère inévitablement de l'énergie par convection et rayonnement. La quantité d'énergie dissipée par rayonnement constitue une part importante de la dissipation thermique. La composante convective des pertes, imputable à la température extérieure et au vent, n'est pas constante. À l'inverse, les pertes dues au rayonnement d'un absorbeur exposé à la température extrêmement basse d'un ciel clair sont continues.

En effet, tout objet dont la température $T(^{\circ}\text{K})$ n'est pas nulle émet un rayonnement thermique, semblable à la lumière, sur une large gamme de longueurs d'onde déterminées par sa température. Par exemple, le Soleil, caractérisé par une température de surface de 6 000 K, émet un rayonnement allant de 0,2 à 2,5 (μm), avec un pic à 0,55 (μm). À l'inverse, la surface d'un absorbeur à 100 $^{\circ}\text{C}$ émet un rayonnement principalement dans le spectre de l'infrarouge lointain (IR), allant de 2,5 à 40 (μm), avec un pic à environ 8 (μm).

Les surfaces peuvent être conçues pour présenter à la fois une absorbance élevée vis-à-vis du rayonnement solaire, connue sous le nom de surfaces noires, et une faible émissivité dans le spectre infrarouge lointain, appelée surfaces réfléchissantes. Ces surfaces spécialisées, appelées surfaces sélectives, sont définies par des paramètres clés tels que leur coefficient d'absorption α dans le spectre solaire, idéalement fixé à 100 % ($\alpha = 1$). De plus, l'émissivité ϵ , représentant la fraction de rayonnement émise par rapport au maximum possible, devrait idéalement être de 0 pour une surface sélective idéale et de 1 pour une valeur d'émissivité maximale [35].

b. Surface sélective

Une surface est considérée comme sélective lorsqu'un film mince qui lui est appliqué permet de filtrer de manière sélective le rayonnement entrant et sortant, ce qui entraîne une diminution des pertes de chaleur. Cette surface présente des caractéristiques spécifiques dans une plage spectrale définie relatives à la transmission, à l'émission et à l'absorption du rayonnement. Les surfaces sélectives présentent une capacité accrue à absorber le rayonnement solaire visible tout en présentant une capacité d'émission plus faible vis-à-vis du rayonnement infrarouge. Une capture efficace de l'énergie solaire nécessite la présence de surfaces absorbantes noires à la surface de l'absorbeur, présentant une faible émissivité et une absorption solaire élevée. Ces surfaces peuvent être obtenues grâce à des revêtements noirs spécialisés tels que les peintures Minnesota 3M ou à des traitements électrochimiques tels que le chrome noir mat ou l'oxyde de cuivre sur de l'aluminium. Diverses techniques sont utilisées pour conférer des propriétés optiques spécifiques aux surfaces utilisées pour capter le rayonnement solaire.

Revêtement par peinture : le coefficient d'absorption (α) est généralement élevé : $\alpha > 0,90$; cependant, le coefficient d'émission (ϵ) est également élevé : $\epsilon > 0,70$. Certaines peintures présentent une émissivité égale à leur absorption.

Revêtement par électrodéposition : les revêtements comme le chrome noir ou le nickel noir sont réputés pour leur efficacité. Le coefficient d'absorption (α) est élevé, supérieur à 0,95, tandis que le coefficient d'émission (ϵ) est faible, inférieur à 0,15. Cependant, une application minutieuse de ces produits est nécessaire pour éviter tout phénomène de pelliculage avec le temps.

Par oxydation provoquée de l'absorbeur : aucune couche n'est déposée. L'oxydation du matériau est délibérément induite, soit par anodisation (processus électrochimique), soit par traitement chimique (immersion). Les caractéristiques d'absorption et d'émission (α et ϵ) sont au moins équivalentes à celles des revêtements par électrodéposition. Il est important de noter

que tant le revêtement par électrodéposition que le traitement par oxydation provoquée demeurent des procédés de traitement de surface assez coûteux.

c. Différents revêtements possibles

- **peinture noire** : La peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission est très élevé de l'ordre de 0,85.
- **Oxyde de chrome** : Le revêtement en « black chrome » (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, formant une couche extrêmement fine sur un support métallique, dont les coefficients d'absorption et d'émission sont $\alpha = 0,95$ et $\varepsilon = 0,12$ à 0,18.
- **Traitement sous vide** : Ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995, facilement reconnaissable par sa couleur bleu marine. Ce procédé consiste à déposer différents métaux sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ε est inférieur à 0,05.

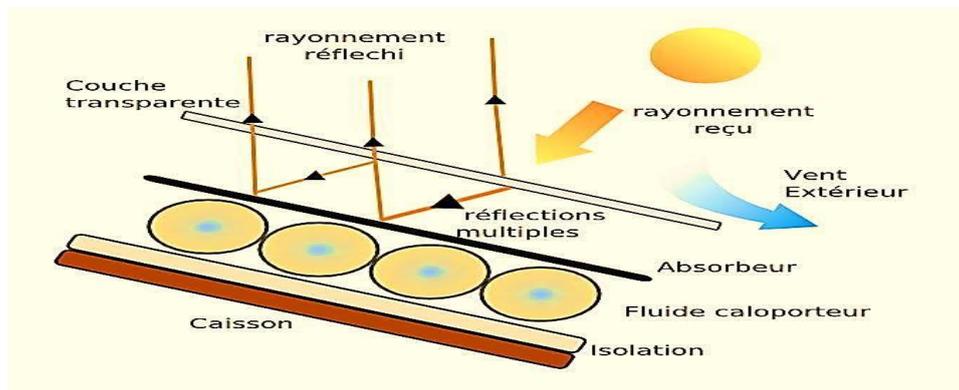


Figure (I.17): Composants d'un capteur solaire plan.

I.12.1 Autres caractérisations

La composition est déterminée sur la base des constituants par analyse chimique, rayons X, diffraction électronique ou, comme dernière option et de manière plus qualitative, par ESCA. La détermination de la texture de surface peut être réalisée par microscopie traditionnelle ou, de préférence, par microscopie électronique à balayage. Des mesures de rugosité sont également possibles. Les informations concernant la structure volumique peuvent être obtenues en effectuant une diffraction des rayons X ou des électrons à la suite d'une attaque chimique sur le substrat ou d'un amincissement ionique. Les valeurs d'épaisseur sont ensuite établies soit à l'aide d'un Talystep, soit à l'aide de techniques interférométriques [25].

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étalé une étude descriptive sur les capteurs solaires, leurs composants, leurs caractéristiques et les paramètres de fonctionnement qui influent sur leur efficacité. Les capteurs solaires thermiques sont des dispositifs responsables de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, notamment les capteurs thermiques.

Chapitre 2

Etude théorique et modélisation numérique

Chapitre 2 : Etude théorique et modélisation numérique

II.1 Introduction

L'amélioration des dispositifs solaires est l'une des objectifs de nombreux efforts de recherche scientifique qui visent à améliorer l'efficacité en temps réel des capteurs solaires. L'efficacité opérationnelle d'un capteur plan est sujet aux modifications de sa configuration, de ses attributs structuraux et aux éléments intrinsèques tels que les couvertures, la surface absorbante, l'interface entre la plaque et le tube, ainsi que les facteurs extérieurs tels que le rayonnement solaire et les conditions de température environnantes.

Nous essayons dans ce chapitre de donner un modèle théorique performant qui couvre le mieux possible le bilan total du capteur solaire.

II.2 Différents modes de transferts thermiques

Un capteur solaire thermique met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, à savoir la conduction, la convection et le rayonnement.

II.2.1 Conduction

La conduction est un mode de transfert de chaleur caractérisée par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation suivante [28]:

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot A \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{II.1})$$

ϕ : Flux de chaleur. [W]

λ : Coefficient de conductivité thermique. [W/m.K]

II.2.2 Convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques, on distingue deux types de convection [29].

$$\phi = h_{cv} \cdot A \cdot (T_p - T_\infty) \quad (\text{II.2})$$

ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h_{cv} : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/m². °C)

T_p : Température de surface du solide (°C)

A : Surface d'échange m².

a. Convection forcée

Le mouvement du milieu fluide est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe,

un ventilateur...). L'échange de chaleur entre les solides et les fluides en mouvement se fait par convection forcée

$$Nu = \frac{h_{cv} D_h}{\lambda} \quad (II.3)$$

Où

h_{cv} : Coefficient de transfert thermique par convection

Nu : Nombre du Nusselt

Le nombre de Nusselt est écrit en fonction de nombre de Reynolds (Re) et nombre de Prandtl (Pr)

$$Nu = f(Re, Pr) \quad (II.4)$$

où le nombre de Reynolds est donné par la relation

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (II.5)$$

ρ : Masse volumique (kg/m^3)

U : Vitesse moyenne du fluide (m/s)

μ : Viscosité dynamique (kg/m.s)

b. Convection naturelle

Dans le cas de la convection naturelle, ou convection libre, le mouvement du fluide est généré par les variations de densité provoquées par les différences de température au sein du fluide.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [29]:

$$\phi = h \cdot A \cdot (T_p - T_f) \quad (II.6)$$

ϕ : Flux échangé par convection [W].

h : Coefficient de convection [$W/m^2.K$].

A : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide [m^2].

T_p : Température de la paroi solide [K].

T_f : Température du fluide [K].

Dans ce cas le nombre de Nusselt écrit en fonction des nombres adimensionnels de Grashof (Gr) et de Prandtl :

$$Nu = f(Gr, Pr) \quad (II.7)$$

$$Gr = \frac{\beta_c \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot L^3}{\mu^2} \quad (II.8)$$

β_c : Coefficient de dilatation cubique

g : Accélération de la pesanteur (m/s²)

Les échanges par convection qui interviennent dans notre système sont

$h_{cv,V-A}$: Entre la vitre et l'air ambiant.

$h_{cv,P-V}$: Entre la plaque et la vitre.

$h_{cv,T-F}$: Entre le tube et le fluide caloporteur.

$h_{cv,I-A}$: Entre l'isolant et l'air ambiant.

Le coefficient de transfert thermique par convection entre la vitre et l'air ambiant est donné par Mac Adams 1961 [31].

$$h_{cv,v-A} = 5.67 + 3.86.V_v \quad (\text{II.9})$$

V_v : Est la vitesse moyenne journalière du vent (m/s)

Une fonction de l'inclinaison du collecteur est fournie pour déterminer le coefficient d'échange de chaleur qui a lieu dans le petit espace entre l'absorbeur et la couverture transparente.

$$h_{cv,p-v} = \frac{NU_\beta \cdot \lambda_a}{e_{vp}} \quad (\text{II.10})$$

NU_β : Nombre de Nusselt pour une inclinaison β

λ_a : Conductivité thermique de l'air (w/m°C)

e_{vp} : Espace entre l'absorbeur et la couverture transparente (m).

Si $0 < \beta < \beta_0$

$$NU_\beta = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708}{Gr.Pr.\cos(\beta)} \right] \cdot \left[1 - \frac{1708(\sin(1.8\beta))^{1.6}}{Gr.Pr.\cos(\beta)} \right] + \left[\left(\frac{Gr.Pr.\cos(\beta)}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (\text{II.11})$$

Si $\beta < \beta < 90^\circ$

$$NU_\beta = [\sin(\beta)]^{1/4} \cdot NU_{90^\circ} \quad (\text{II.12})$$

Si $\beta_0 < \beta < 90^\circ$

Si $90^\circ < \beta < 180^\circ$

$$NU_\beta = 1 + [NU_{90^\circ} - 1] \sin(\beta) \quad (\text{II.13})$$

Avec :

$$\beta_0 = \tan^{-1}(4800.Pr) \quad (\text{II.14})$$

Nu_{90} : Nombre de Nusselt pour une inclinaison $\beta=90^\circ$

$$Gr = \frac{\beta_c \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho_a^2 \cdot e_{vp}^3}{\mu_a^2} \quad (\text{II.15})$$

$$Pr = \frac{C_{pa} \cdot \mu_a}{\lambda_a} \quad (\text{II.16})$$

λ_a : Conductivité thermique de l'air (w/m°C)

μ_a : Viscosité dynamique de l'air (kg/m.s)

C_{pa} : Chaleur massique de l'air (j/kg°C)

ρ_a : Masse volumique de l'air (kg/m³)

g : Accélération de la pesanteur (m/s²)

e_{vp} : Est l'espace entre la vitre et l'absorbeur (m).

ΔT : Écart de température entre les deux surfaces (°C)

Le coefficient d'échange convectif peut également être calculé en fonction de l'angle d'inclinaison.

Si $Gr < 1700 + 47,8 \cdot \beta$

$$NU = 1.013 \quad (\text{II.17})$$

Si $1700 + 47,8 \cdot \beta \leq Gr \leq 80000$

$$NU = [0.06 + 0.003 \cdot (90 - \beta)] \cdot Gr^{1/3} \quad (\text{II.18})$$

Si $Gr > 80000$

$$NU = 2.5 + 0.0133 \cdot (90 - \beta) \quad (\text{II.19})$$

Du fait de la convection forcée, le coefficient d'échange thermique entre le tube et le fluide caloporteur est le suivant [25].

$$h_{cv,T-F} = \frac{NU \cdot \lambda_F}{d_i} \quad (\text{II.20})$$

$$Re = \frac{\rho_F \cdot U \cdot d_i}{\mu_F} \quad (\text{II.21})$$

$$Gz = Re \cdot Pr \cdot \frac{d_i}{L} \quad (\text{II.22})$$

$$st = \frac{Nu}{Re \cdot Pr} \quad (\text{II.23})$$

Re : Nombre de Reynolds

Gz : Nombre de Graetz

St : Nombre de Stanton

d_i : Diamètre intérieur du tube (m)

u : Vitesse moyenne du fluide (m/s)

L : Longueur du tube (m)

$Re < 2100$ Régime laminaire

$Gz < 100$ Haussen

$$NU = 3.66 + \frac{0.085 \times Gz}{1 + 0.047 \times Gz^{2/3}} \times \left(\frac{\mu_F}{\mu_p} \right) \quad (II.24)$$

$Gz > 100$ Seider-Tate

$$NU = 1.86 \times Gz^{1/3} \times \left(\frac{\mu_F}{\mu_p} \right)^{0.14} + 0.87 \times (1 + 0.015 \times Gz^{1/3}) \quad (II.25)$$

$2100 < Re < 10000$ Zone transitoire Haussen

$$NU = 0.16 (Re^{1/3} - 125) \times Pr^{1/3} \times \left[1 + \left(\frac{d_i}{L} \right)^{2/3} \right] \times \left(\frac{\mu_F}{\mu_p} \right) \quad (II.26)$$

$Re > 10000$ Régime turbulent Seider-Tate

$$NU = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{1/3} \times \left(\frac{\mu_F}{\mu_p} \right)^{0.14} \quad (II.27)$$

Avec :

μ_F : Viscosité dynamique du fluide à la température considérée (kg/m.s)

μ_p : Viscosité dynamique du fluide près de la paroi à la température considérée (kg/m.s)

II.2.3 Rayonnement

Le transfert thermique par rayonnement se fait au moyen d'ondes électromagnétiques qui traversent un milieu transparent, lorsque les ondes rencontrent un obstacle, elles leur cèdent une partie de leur énergie sous forme de chaleur, ce mode de transfert ne nécessite pas un milieu particulier, il peut aussi se produire dans le vide.

$$Q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad (II.28)$$

Q : Densité de flux de chaleur émis par le corps [W / m^2].

σ : Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \cdot 10^{-8} W / m^2 \cdot K^4$).

ε : Émissivité thermique du matériau.

T : Température du corps en [K].

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et l'absorbeur.

- La vitre et le ciel.
- L'isolant et le sol [32].

II.3 Puissances absorbées

Considérons un flux lumineux incident sur un corps (capteur), une partie de cette radiation est réfléchie, une autre partie est absorbée par le corps et l'autre est transmise. On adopte les trois coefficients suivants : le facteur d'absorption (α), le facteur de réflexion (ρ) et le facteur de transmission (τ).

La relation entre les différents coefficients est donnée comme suit :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{II.29})$$

a. puissance absorbée par la couverture transparente

➤ La puissance absorbée par la vitre supérieure :

$$P_{v1} = P_{dir} \alpha_{v1-dir} + P_{dif} \alpha_{v1-dif} \left(\frac{w}{m^2} \right) \quad (\text{II.30})$$

II.4 Pertes

L'intégralité des pertes de chaleur (Q_{pt}) est donnée par la relation suivante :

$$Q_{pt} = U_{pt} \cdot A_C \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{II.31})$$

A_C : Surface du capteur.

T_a : Température de l'ambiance

T_p : Température de plaque

U_{pt} : Coefficient global des pertes de chaleur, défini comme suit :

$$U_{pt} = U_{av} + U_{arr} + U_{lat} \quad (\text{II.32})$$

Les pertes vers l'avant sont dues à la convection et aux radiations entre la surface absorbante et la face extérieure de la couverture. Le coefficient des pertes vers l'avant est comme suivi :

$$U_{av} = \frac{1}{R_i + R_e} \quad (\text{II.33})$$

R_i : Résistance intérieure opposant le transfert entre la surface de captation et la surface de la vitre.

$$R_i = \frac{1}{h_{cv,p-v} + h_{r,p-v}} \quad (\text{II.34})$$

Avec :

$h_{cv,p-v}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitreintermédiaire et l'absorbeur (W/m².K).

$h_{r,p-v}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitreintermédiaire et l'absorbeur (W/m².K).

R_e : Résistance extérieure opposant le transfert convectif et radiatif entre lasurface de la vitre et l'environnement.

$$R_e = \frac{1}{h_{cv,v-a} + h_{r,v-c}} \quad (\text{II.35})$$

Avec :

$h_{cv,v-a}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre deprotection et l'ambiance (W/m².K).

$h_{r,v-c}$: Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitresupérieure et le ciel. (W/m².K).

R_i, R_e sont données en [m².K/W]

Finalement on aura :

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{cv,v-a} + h_{r,v-c}} + \frac{1}{h_{cv,p-v} + h_{r,v-p}} \right]^{-1} \quad (\text{II.36})$$

Les pertes par le fond du capteur sont dues à la conduction par l'isolant arrière.

Le coefficient des pertes de chaleur par unité de surface par l'arrière du capteur s'écrit :

$$U_{ar} = \frac{\lambda}{e_i} \left(\frac{w}{m^2.k} \right) \quad (\text{II.37})$$

λ : Conductivité thermique de l'isolant.

e_i : Épaisseur de l'isolant

Le coefficient des pertes latérales par unité de surface est :

$$U_{lat} = \frac{\lambda_{ilat} \cdot e_b \cdot p_b}{e_{lat} \cdot S} \quad (\text{II.38})$$

λ_{ilat} : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

e_b : Épaisseur du boîtier.

p_b : Périmètre du boîtier.

e_{lat} : Épaisseur de l'isolant latéral.

II.5 Échanges thermiques

II.5.1 Échanges thermiques par convection

- Entre le vitrage et l'air ambiant

Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant est donné par:

$$Q_{cv,v-a} = h_{cv,v-a} A_v (T_v - T_{am}) \quad (\text{II.39})$$

T_{am} : Température ambiante (°K).

$h_{cv,v-a}$: Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. Ce dernier est dû entièrement à la vitesse du vent (W/(m² °K)).

$$h_{cv,v-a} = 5.67 + 3.86 \times V_{vent} \quad (\text{II.40})$$

V_{vent} : Vitesse du vent (m/s).

- Entre l'absorbeur et le vitrage

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage est donné par [34]:

$$Q_{cv,p-v} = A h_{cv,p-v} (T_p - T_v) \quad (\text{II.41})$$

T_p : Température de l'absorbeur (°K).

T_v : Température de la vitre (°K).

A: Surface de l'absorbeur (m²).

$h_{cv,p-v}$: Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur (W/(m²K)).

Le coefficient d'échange thermique par convection $h_{cv,p-v}$ est calculé suivant la relation

$$h_{cv,p-v} = N_u \frac{\lambda_{air}}{e_{pv}} \quad (\text{II.42})$$

Avec

$$N_u = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708}{G_r P_r \cos \beta} \right) \left(\frac{|X| + X}{2} \right) \left(\frac{|y| + y}{2} \right)$$

$$X = 1 - \frac{1780 \sin(1.8\beta)}{G_r P_r \cos \beta}$$

$$y = \frac{(G_r P_r \cos \beta)^{\frac{1}{3}}}{5830}$$

P_r : Nombre de Prandtl

e_{pv} : Épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante (m).

G_r : Nombre de Grashof.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air (W/K m).

β : Inclinaison du capteur (rad).

- Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) :

$$Q_{cv,p-f} = h_{cv,p-f} A (T_p - T_f) \quad (\text{II.43})$$

T_3 : Température du fluide caloporteur (K).

A: Surface de contact absorbeur fluide caloporteur (m²).

$h_{cv,p-f}$: Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (W/(m²K)).

Le coefficient d'échange de chaleur interne est donné par :

$$h_{cv,p-f} = \frac{N_u \lambda_{\text{eau}}}{d_i} \quad (\text{II.44})$$

λ_{eau} : Conductivité thermique de l'eau (W m⁻¹ °K⁻¹).

d_i : Diamètre du tube intérieur (m).

Le coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur des tubes $h_{cv,p-f}$ est calculé suivant Gnielinski [34], il a exploité un grand nombre de données expérimentales sur le transfert de chaleur dans les tubes et il a proposé une corrélation utilisable pour le régime de transition et pour le régime turbulent en tenant compte de la longueur d'établissement de l'écoulement.

$$N_u = \frac{\Omega}{8} \frac{(R_e - 10^3) P_r}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} \left(\frac{2}{P_r^3} - 1\right)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (\text{II.45})$$

Ω : Coefficient de Darcy.

P_r : Nombre de Prandtl.

R_e : Nombre de Reynolds.

d_i : Diamètre intérieur du tube (m).

l : Longueur du tube (m).

Les propriétés physiques sont calculées à la température moyenne de l'eau.

Cette corrélation est utilisable pour $0.6 < P_r < 2000$, $2300 < R_e < 10^6$.

Le nombre de Reynolds est donné par:

$$R_e = \frac{V d_i}{\mu} \quad (\text{II.46})$$

μ : Viscosité dynamique de l'eau (Pa s).

V: Vitesse moyenne du fluide (m/s).

Pour un écoulement turbulent dans un conduit hydraulique lisse, le coefficient de Darcy est déterminé par différentes relations en fonction du nombre de Reynolds

Si $2300 \leq R_e \leq 10^5$, on applique la formule de Blasius :

$$\Omega = 0.3164 R_e^{0.25} \quad (\text{II.47})$$

Si $10^5 \leq R_e \leq 10^6$, on applique la relation de Herman :

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 R_e^{0.3} \quad (\text{II.48})$$

II.5.2 Échanges thermiques par rayonnement

- Entre l'absorbeur et le vitrage

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage est donné par l'équation [34] :

$$Q_{r,p-v} = A_v h_{r,p-v} (T_p - T_v) \quad (\text{II.49})$$

Avec

$$h_{r,p-v} = \frac{\sigma (T_p + T_v) (T_p^2 - T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{II.50})$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: Sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.

σ : Constante de Stéphane Boltzmann $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/m}^2 \text{ K}^4$

Caractéristiques radiatives de quelques surfaces

La sélectivité est le rapport de l'absorptivité solaire α sur l'émissivité infrarouge ε .

Sélectivité = α / ε

Tableau (II.1) : Caractéristiques radiatives de quelques surfaces.

revêtements sélectifs	A	E	α / ε
CuO sur l'aluminium	0,93	0,11	8,5
Acier poli	0,63	0,09	7
Aluminium anodisé	0,80	0,14	5,71
Peinture noir (silicate)	0,97	0,88	1,10

- Entre le vitrage et le ciel

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel est donné par l'équation:

$$Q_{r,v-c} = h_{r,v-c} A_v (T_{ve} - T_c) \quad (\text{II.51})$$

$$h_{r,v-c} = \varepsilon_2 \sigma (T_c + T_{ve}) (T_{ve}^2 + T_c^2) \left(\frac{T_{ve} - T_c}{T_{ve} - T_{am}} \right) \quad (\text{II.52})$$

$$T_c = 0.0552 T_{am}^{1.5}$$

T_c : Température du ciel (°K).

$h_{r,v-c}$: Coefficient d'échange par rayonnement entre le vitrage et le ciel $\left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right)$.

II.5.3 Échanges thermiques par conduction

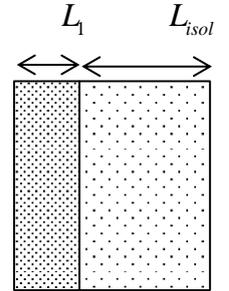
Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par l'équation [34] :

$$Q_{cd,p-is} = \frac{T_p - T_{is}}{\frac{L_1}{A_{p,is} \lambda_{isol}} + \frac{L_{isol}}{A_{p,is} \lambda_{abs}}} + \frac{T_p - T_{is}}{\frac{L_1}{A_{p,lat} \lambda_{isollat}} + \frac{L_{isollat}}{A_{p,lat} \lambda_{abs}}} \quad (\text{II.53})$$

+horizontales Echanges aux niveaux des surfaces = $Q_{cd,isolant}$ Echanges aux niveaux des surfaces latérales.

T_{isol} : Température de l'isolant (°K).

$A_{p,is}$: Surface de contact absorbeur isolant pour la face avant (m²).



$A_{p,lat}$ Surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale (m²).

λ_{isol} : Conductivité thermique de l'isolant (laine de roche). (W m⁻¹ °K⁻¹).

$\lambda_{isollat}$: Conductivité thermique de l'isolant. (Laine de verre). (W m⁻¹ °K⁻¹).

λ_{abs} : Conductivité thermique de l'absorbeur (W m⁻¹ °K⁻¹).

L_1 : Épaisseur de l'absorbeur (m).

L_{isol} : Épaisseur de l'isolant (laine de roche) (m).

$L_{isollat}$: Épaisseur de l'isolant latéral (laine de verre) (m).

II.5.4 Échanges thermiques au niveau de la vitre

Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur est donné par la formule suivante :

$$Q_{incident1} = \alpha_1 \tau_2 s_1 G \quad (II.54)$$

α_1 : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

τ_2 : Coefficient de transmission de la vitre.

G: éclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan. (W/m²). On désigne par m_1 la masse de l'absorbeur (en kg) et par C_1 sa chaleur spécifique (J/(kg °K)).

Il existe un autre flux de chaleur incident qui sera absorbé par la vitre mais avec peu d'importance.

$$Q_{incident} = \alpha_v A_v G \quad (II.55)$$

α_v : Coefficient d'absorption de la vitre.

A_v : Surface de la vitre (m²).

II.6 Rendement optique

Le rendement optique d'un système solaire thermique, tel qu'un collecteur solaire, est une mesure de son efficacité à convertir l'énergie solaire en chaleur utilisable. Il représente le pourcentage de l'énergie solaire incidente qui est effectivement absorbée par le collecteur et convertie en chaleur.

Un rendement optique élevé indique que le collecteur est capable d'absorber et de convertir efficacement l'énergie solaire en chaleur, ce qui peut augmenter la performance globale du système de chauffage solaire.

$$\eta_0 = \frac{Q_a}{Q_0} \quad (II.56)$$

Où :

η_0 : Rendement optique du capteur.

Q_a : Flux absorbée par l'absorbeur

Q_0 : Flux arrivant sur le plan du capteur.

II.7 Rendement

Le rendement d'un capteur solaire est défini comme le rapport entre l'énergie récupérée par le fluide caloporteur sur une période donnée et le produit de l'irradiation solaire reçue pendant cette même période, multiplié par la superficie du capteur, en régime stationnaire.

Il dépend de l'ensoleillement et de l'écart de températures entre le milieu ambiant et l'absorbeur, ainsi que des vents (qui favorisent les pertes par convection) [33].

II.7.1.1 Rendement instantané

C'est le rapport entre l'énergie utile Q_u (l'énergie réellement transférée vers le fluide caloporteur ou vers un milieu de stockage) et la puissance solaire globale Q_0 (le flux arrivant sur le plan du capteur).

$$\eta_{cap} = \frac{Q_u}{Q_0} = 1 - \frac{Q_p}{Q_0} \quad (II.57)$$

Où :

η_{cap} : Rendement instantané d'un capteur solaire plan.

Q_0 : Flux arrivant sur le plan du capteur.

Q_p : Flux perdu par le capteur vers l'extérieur

La performance thermique d'un capteur plan est déterminée par son rendement instantané défini par la relation suivant :

$$\eta = \frac{\rho \cdot q_v \cdot C_p (T_{fs} - T_{fe})}{I_G \cdot A_c} \quad (II.58)$$

η : Rendement instantané du capteur plan.

ρ : Masse volumique (kg/m^3) ; pour l'eau $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$.

C_p : Chaleur spécifique (J/kg K) ; pour l'eau $C_{pa} = 4184 \text{ J/kg.K}$.

T_{fs} et T_{fe} sont respectivement les températures de fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie du capteur (K).

A_c : Surface du capteur (m^2).

I_G : Densité de flux solaire global incident (W/m^2).

q_v : Débit volumique de fluide (m^3/s).

$$q_v = v \cdot S \quad (II.59)$$

v = Vitesse du fluide en $[\text{m/s}]$.

S = Section de passage en $[\text{m}^2]$.

II.8 Etablissement des équations du système

Considérons un maillage de plusieurs nœuds à l'instant "t". Supposons que i soit un nœud de la maille avec la masse m_i , la capacité spécifique Cp_i , la section A_i et la température T_i . L'application de la loi d'OHM au nœud "i" se traduit par:

$$\frac{m_i \cdot cp_i}{A_i} \cdot \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{k \in E} h_{i-k} \cdot (T_k - T_i) + Q_i$$

$\sum_{k \in E}$: Ensemble de nœuds (k) pour lesquels T_k est un potentiel connecté à T_i .

Δt : Pas de temps.

Q_i : Facteur puits ou source (W/m²).

II.9 Hypothèses simplificatrices

- Le ciel est considéré comme un corps noir de température équivalente (T_c).
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance (T_s).
- Les surfaces d'échanges de chaleur par rayonnement sont supposées grises et diffusants aussi la voûte céleste.
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes.
- Le vent est supposé souffler parallèlement aux faces du système.
- La température du fluide à l'entrée d'une tranche quelconque est égale à sa température de sortie de la tranche précédente.
- Le rayonnement diffus atmosphérique est isotrope.
- Les températures des faces intérieures et extérieures de la vitre, de l'absorbeur et isolant sont supposées uniformes.
- La température intérieure de l'isolant est supposée la même avec la température de l'absorbeur.
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- On néglige les pertes thermiques au niveau des faces latérales.

II.10 Mise en équation des différents échanges thermiques

Les échanges thermiques (bilan thermiques) sont mis en équation de la manière suivante :

- Bilan thermique au niveau extérieur de la couverture transparente

$$\frac{m_v \cdot cp_v}{2 \cdot A_c} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} = \left[\frac{1}{2} Q_v + h_{r,v-c} (T_v - T_c) + h_{cv,v-a} (T_v - T_a) + h_{cd,v} (T_{ve} - T_{vi}) \right]$$

- Bilan thermique au niveau intérieur de la couverture transparent

$$\frac{m_v \cdot cp_p}{2 \cdot A_v} \cdot \frac{dT_{vi}}{dt} = \left[\frac{1}{2} Q_v + h_{r,p-v} (T_p - T_{vi}) + h_{cv,p-v} (T_p - T_{vi}) + h_{cd,v} (T_{ve} - T_{vi}) \right]$$

On note que l'air intermédiaire entre l'absorbant et le coté intérieur de vitre transfère par convection naturelle le flux thermique :

$$\phi = h_{cv,p-v} \cdot A_p \cdot (T_p - T_{vi})$$

$h_{cv,p-v}$: Coefficient d'échange thermique par convection.

- Bilan thermique au niveau de la plaque absorbante

$$\frac{m_p \cdot cp_p}{A_p} \frac{dT_p}{dt} = \left[Q_p + h_{r,pv} (T_{vi} - T_p) - h_{cv,pv} (T_{vi} - T_p) + h_{cd,p-tu} \cdot \frac{A_{ptu}}{A_p} (T_{tu} - T_p) + h_{cv,pi} \frac{A_{pi}}{A_p} (T_p - T_i) \right]$$

- Bilan thermique au niveau du tube

$$\frac{m_{tu} \cdot Cp_{tu}}{A_{tu}} \frac{dT_{tu}}{dt} = \left[h_{cd,ptu} \cdot \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} (T_p - T_{tu}) + h_{cv,tu} \cdot \frac{A_f}{A_{tu}} (T_f - T_{tu}) \right]$$

- Bilan thermique au niveau du fluide caloporteur

$$\dot{m}_f \cdot cp_f (T_f - T_{f-1}) = A_f \left[h_{cv,tuf} \cdot \frac{A_{tu}}{A_f} (T_{tu} - T_f) \right]$$

- Bilan thermique au niveau de l'isolant extérieur

$$\frac{m_{is} \cdot cp_i}{A_{is}} \cdot \frac{dT_{is}}{dt} = \left[h_{cd,is-p} (T_p - T_{is}) + h_{r,is-a} (T_a - T_{is}) + h_{cv,is-a} (T_a - T_{is}) \right]$$

Où : $A_v = A_p = A_i$ (m^2)

A_{tu} : Surface extérieur du tube (m^2)

$$A_i = \pi \cdot d_e \cdot \frac{L \cdot I}{p}$$

I : Largeur de capteur

A_{pt} : Surface de jonction plaque – tube (m^2)

$$A_{pt} = \frac{A_{pt}}{4} = \pi \cdot d_e \cdot \frac{L \cdot I}{4p}$$

A_f : Surface de contact fluide – tube (c'est la surface intérieur du tube) (m^2)

$$A_f = \pi \cdot d_i \cdot \frac{Ll}{P}$$

A_{pi} : Surface de contact effectif du plaque absorbante avec l'isolant, (m^2).

$$A_{pi} = A_p - (A_{pu})$$

T_{f-1} : Température du fluide caloporteur à la maille (j -1).

La figure (II.2) illustre les surfaces de contact entre la plaque, le tube et l'isolant.

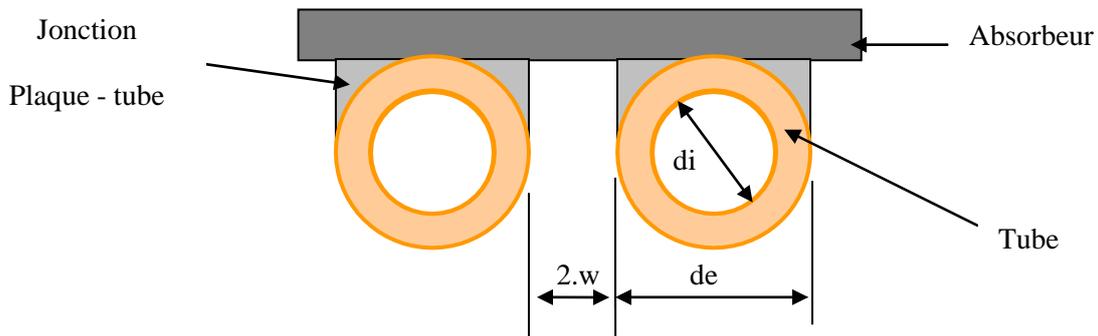


Figure (II.1): coupe du capteur solaire thermique.

d_i : Diamètres intérieur (m).

d_e : Extérieur du tube (m).

$2.w$: Est l'espace libre séparant les conduites.

II.11 Discrétisation des équations

Le système des équations différentielles aux dérivées partielles n'est pas facile à résoudre analytiquement, pour cela on utilise la méthode des différences finies. Pour cela, on se donne

un pas de discrétisation en espace $\Delta x = \frac{L}{n} > 0$ et un pas de discrétisation en temps $\Delta t > 0$.

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial t}; \frac{T_j^t - T_j^{t-\Delta t}}{\Delta t}$$

$$\frac{\partial T(x,t)}{\partial x}; \frac{T_j^t - T_{j-1}^t}{\Delta x}$$

Au niveau extérieur de la couverture transparente :

$$\frac{m_v cp_v}{2A_v \Delta t} (T_{ve}^j(t) - T_{ve}^j(t - \Delta t)) = \frac{Q_v}{2} + h_{r,v-c} (T_c - T_{ve}^j(t)) + h_{cv,v-a} (T_a - T_{ve}^j(t)) + h_{cd,v} (T_{vi}^j(t) - T_{ve}^j(t))$$

On a

$$\frac{m_v c p_v}{2A_v \Delta t} = \frac{\rho_v V_v c p_v}{2A_v \Delta t} = \frac{\rho_v \cdot e_v \cdot c p_v}{2\Delta t}$$

Donc :

$$\frac{\rho_v \cdot e_v \cdot c p_v}{2\Delta t} (T_{ve}^j(t) - T_{ve}^j(t - \Delta t)) = \frac{Q_v}{2} + h_{r,v-c} (T_c - T_{ve}^j(t)) + h_{cv,a-v} (T_a - T_{ve}^j(t)) + h_{cd,v} (T_{vi}^j(t) - T_{ve}^j(t))$$

Au niveau intérieur de la couverture transparente :

$$\frac{m_v c p_v}{2A_v} (T_{vi}^j(t) - T_{vi}^j(t - \Delta t)) = \frac{Q_v}{2} + h_{cd,v} (T_{ve}^j(t) - T_{vi}^j(t)) + (h_{cv,p-v} + h_{r,p-v}) (T_p^j(t) - T_{vi}^j(t))$$

On sait que : $m_v = \rho_v \cdot e_v$

Donc :

$$\frac{\rho_v \cdot e_v \cdot c p_v}{2\Delta t} (T_{vi}^j(t) - T_{vi}^j(t - \Delta t)) = \frac{Q_v}{2} + h_{cd,v} (T_{ve}^j(t) - T_{vi}^j(t)) + (h_{cv,p-v} + h_{r,p-v}) (T_p^j(t) - T_{vi}^j(t))$$

Au niveau de la plaque absorbante :

$$\frac{m_p C p_p}{A_p} (T_p^j(t) - T_p^j(t - \Delta t)) = Q_p + (h_{r,v-p} + h_{cv,p-v}) (T_{vi}^j(t) - T_p^j(t)) + h_{cd,p-tu} \frac{A_{ptu}}{A_p} (T_{tu}^j(t) - T_p^j(t))$$

$$\frac{\rho_p \cdot e_p \cdot C p_p}{\Delta t} (T_p^j(t) - T_p^j(t - \Delta t)) = Q_p + (h_{r,v-p} + h_{cv,p-v}) (T_{vi}^j(t) - T_p^j(t)) + h_{cd,p-tu} \frac{A_{ptu}}{A_p} (T_{tu}^j(t) - T_p^j(t))$$

$$+ h_{cd,p-ii} \frac{A_{pii}}{A_p} (T_{ii}^j(t) - T_p^j(t))$$

$$\frac{A_{pt}}{A_p} = \frac{3.14 r_e L}{2A_p}$$

$$\frac{A_{pii}}{A_p} = \frac{A_p - A_{tu}}{A_p}$$

Au niveau du tube :

$$\frac{m_{tu} \times C p_{tu}}{A_{tu} \Delta t} \times (T_{tu}^j(t) - T_{tu}^j(t - \Delta t)) = h_{cd,tu-p} \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} (T_p^j(t) - T_{tu}^j(t)) + h_{cv,f-tu} \frac{A_f}{A_{tu}} (T_f^j(t) - T_{tu}^j(t))$$

$$\frac{m_{tu} \times C p_{tu}}{A_{tu} \Delta t} = \frac{A_{tu} e_{tu} \rho_{tu} \times C p_{tu}}{A_{tu} \Delta t} = \frac{e_{tu} \rho_{tu} \times C p_{tu}}{\Delta t}$$

$$\frac{e_{tu} \rho_{tu} \times C p_{tu}}{\Delta t} (T_{tu}^j(t) - T_{tu}^j(t - \Delta t)) = h_{cd,tu-p} \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} (T_p^j(t) - T_{tu}^j(t)) + h_{cv,f-tu} \frac{A_f}{A_{tu}} (T_f^j(t) - T_{tu}^j(t))$$

Au niveau du fluide caloporteur :

$$\frac{\dot{m}_f \cdot Cp_f}{A_f} (T_f^j(t) - T_{f-1}^j(t)) = h_{cv,tuf} \cdot \frac{A_{tu}}{A_f} (T_{ty}^j(t) - T_f^j(t))$$

$$\frac{q_v \rho_f cp_f}{A_f} \times (T_f^j(t) - T_{f-1}^j(t)) = h_{cv,tu-f} \frac{A_{tu}}{A_f} (T_{tu}^j(t) - T_f^j(t))$$

Au niveau intérieur de l'isolant :

$$T_p = T_{isi}$$

Au niveau extérieur de l'isolant :

$$\frac{m_{is} \times cp_{is}}{2A_{is} \Delta t} \times (T_{ise}^j(t) - T_{ise}^j(t + \Delta t)) = h_{cd,is} (T_{isi}^j(t) - T_{ise}^j(t)) + h_{r,ise-c} (T_c^j(t) - T_{ise}^j(t))$$

$$+ h_{cv,ise-a} (T_a^j(t) - T_{ise}^j(t))$$

$$\text{Lorsque } T_p = T_{isi} \text{ et d'où } \frac{m_{is} cp_{is}}{2A_{is} \Delta t} = \frac{\rho_{is} e_{is} A_{is} cp_{is}}{2A_{is} \Delta t} = \frac{\rho_{is} e_{is} cp_{is}}{2\Delta t}$$

$$\frac{\rho_{is} e_{is} cp_{is}}{2\Delta t} (T_{ise}^j(t) - T_{ise}^j(t + \Delta t)) = h_{cd,is} (T_p^j(t) - T_{ise}^j(t)) + h_{r,ise-c} (T_c^j(t) - T_{ise}^j(t))$$

$$+ h_{cv,ise-a} (T_a^j(t) - T_{ise}^j(t))$$

Nous avons calculé la première dérivée en fonction de temps, en utilisant l'approximation de méthode des différences finis

Après le calcul on trouve :

Au niveau extérieur de la couverture transparente :

$$\left(\frac{\rho_v \cdot e_v \cdot cp_v}{2\Delta t} + h_{r,v-c} + h_{cv,a-v} + h_{cd,v} \right) T_v^j(t) - h_{cd,v} T_{vi}^j(t) = \frac{Q_v}{2} + h_{r,v-c} T_c + h_{cv,a-v} T_a + \frac{\rho_v \cdot e_v \cdot cp_v}{2\Delta t} T_{ve}^j(t - \Delta t)$$

Au niveau intérieur de la couverture transparente :

$$-h_{cd,v} T_{ve}^j(t) + \left(\frac{\rho_v \cdot e_v \cdot cp_v}{2\Delta t} + h_{cd,v} + h_{cv,p-v} + h_{r,p-v} \right) T_{vi}^j(t) - (h_{cv,p-v} + h_{r,p-v}) T_p^j(t) = \frac{Q_v}{2} + \frac{\rho_v \cdot e_v \cdot cp_v}{2\Delta t} T_{vi}^j(t - \Delta t)$$

Au niveau de la plaque absorbante :

$$-(h_{r,v-p} + h_{cv,v-p}) T_{vi}^j(t) + \left(\frac{\rho_p \cdot e_p \cdot cp_p}{\Delta t} + h_{r,v-p} + h_{cv,v-p} + \frac{A_{ptu}}{A_p} h_{cd,p-tu} \right) T_p^j(t) - \frac{A_{ptu}}{A_p} h_{cd,p-tu} T_{tu}^j(t) =$$

$$Q_p + \frac{\rho_p \cdot e_p \cdot cp_p}{\Delta t} T_p^j(t - \Delta t)$$

Au niveau du tube :

$$-h_{cd,tu-p} \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} T_p^j(t) + \left(\frac{\rho_{tu} \cdot e_{tu} \cdot cp_{tu}}{\Delta t} + h_{cd,tu-p} \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} + h_{cv,f-tu} \frac{A_f}{A_{tu}} \right) T_{tu}^j(t) - h_{cv,f-tu} \frac{A_f}{A_{tu}} T_f^j(t) = \frac{\rho_{tu} \cdot e_{tu} \cdot cp_{tu}}{\Delta t} T_{tu}^j(t - \Delta t)$$

Au niveau du fluide caloporteur :

$$\left(\frac{\rho_f q_v cp_f}{A_f} + h_{cv,tu-f} \frac{A_{tu}}{A_f} \right) T_f^j(t) - h_{cv,tu-f} \frac{A_{tu}}{A_f} T_{tu}^j(t) = \left(\frac{q_v \rho_f cp_f}{A_f} \right) T_f^{j-1}(t)$$

Au niveau extérieur de l'isolant

$$-h_{cd,is} T_p^j(t) + \left(\frac{\rho_{is} e_{is} cp_{is}}{2\Delta t} + h_{cd,is} + h_{r,ise-c} + h_{cv,ise-a} \right) T_{ise}^j(t) = \frac{\rho_{is} e_{is} cp_{is}}{2\Delta t} T_{ise}^j(t + \Delta t) + h_{r,ise-c} T_c^j(t) + h_{cv,ise-a} T_a^j(t)$$

Dans ce système d'équations les paramètres inconnus sont :

T_{ve} : La température de face externe de la vitre.

T_{vi} : La température de face interne de la vitre.

T_p : La température de plaque.

T_{tu} : Le tube.

T_f : Le fluide caloporteur.

T_{ise} : La face externe de l'isolant

Donc on peut écrire le système d'équations sous forme matricielle $A \cdot T = B$

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{bmatrix}$$

$$MatA(6,6) \times MatT(6,1) = MatB(6,1)$$

Avec

T_i ($i=1,6$) sont les températures de différents nœuds dans notre système

a_{mn} ($m=1, 6$ et $n=1, 6$) correspond aux coefficients de chaque température

b_m ($m=1, 6$) correspond aux coefficients de second membre des équations considérées.

Tel que :

$$a_{11} = \frac{\rho_v e_v c p_v}{2\Delta t} + h_{r,v-c} + h_{cv,v-a} + h_{cd,v}$$

$$a_{12} = -h_{cd,v}$$

$$a_{21} = a_{12}$$

$$a_{22} = \frac{\rho_v e_v c p_v}{2\Delta t} + h_{cd,v} + h_{r,p-v} + h_{cv,p-v}$$

$$a_{23} = -(h_{r,p-v} + h_{cv,p-v})$$

$$a_{32} = a_{23}$$

$$a_{33} = \frac{\rho_p c p_p e_p}{\Delta t} + h_{r,p-v} + h_{cv,p-v} + \frac{A_{ptu}}{A_p} h_{cd,p-tu}$$

$$a_{34} = -\frac{A_{ptu}}{A_p} h_{cd,p-tu}$$

$$a_{43} = a_{34}$$

$$a_{44} = \frac{\rho_p c p_p e_{tu}}{\Delta t} + h_{cv,tu-f} + \frac{A_{ptu}}{A_{tu}} h_{cd,p-tu}$$

$$a_{45} = -h_{cv,tu-f}$$

$$a_{54} = a_{45}$$

$$a_{55} = \frac{q_v \rho_f C p_f}{A_f} + h_{cv,tu-f} \frac{A_{tu}}{A_f}$$

$$a_{66} = \frac{\rho_{is} e_{is} C p_{is}}{2\Delta t} + h_{r,ise-c} + h_{cd,is} + h_{cv,ise-a}$$

Les autres éléments a_{mn} de matrice \mathbf{A} sont nuls.

$$b_1 = \frac{Q_v}{2} + h_{r,v-c} T_c + h_{cv,v-a} T_a + \frac{\rho_v e_v c p_v}{2\Delta t} T_1^{i-1}$$

$$b_2 = \frac{\rho_v e_v C p_v}{2\Delta t} T_2^{i-1} + \frac{Q_v}{2}$$

$$b_3 = \frac{\rho_p e_p c p_p}{\Delta t} T_3^{i-1} + Q_p$$

$$b_4 = \frac{\rho_{tu} e_{tu} C p_{tu}}{\Delta t} T_4^{i-1}$$

$$b_5 = \frac{q_v \rho_f C p_f}{A_f} T_5^{j-1}$$

$$b_6 = \frac{\rho_{is} e_{is} c p_{is}}{2\Delta t} T_6^{i-1} + h_{r,ise-c} T_c^j(t) + h_{cv,ise-a} T_a^j(t)$$

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons employé la modélisation numérique pour évaluer l'impact des couches sélectives sur les performances des capteurs solaires. Les différentes méthodes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) sont expliquées théoriquement, en illustrant le bilan thermique lors du transfert de chaleur d'un matériau à un autre. Les échanges thermiques ont également été modélisés au niveau de la plaque absorbante, du fluide caloporteur et des couches isolantes.

Chapitre 3

Résultats et discussions

Chapitre 3 : Résultats et discussions

III.1 Introduction

Les énergies renouvelables proviennent de sources naturelles dont le renouvellement est suffisamment rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. L'énergie solaire est la plus dominante ainsi la plus facile à exploiter. La captation, le stockage et la distribution sont les trois parties de fonctionnement d'un système solaire, la captation est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie solaire.

L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées. Plusieurs études ont été menées afin d'optimiser les caractéristiques des capteurs solaires. L'optimisation d'un capteur plan varie avec sa géométrie, ses paramètres de construction et les paramètres internes comme les vitres, l'absorbeur, la jonction plaque-tube et avec les paramètres externes comme le rayonnement, la température ambiante.

III.2 Position du problème

III.2.1 Structure du programme numérique

Pour accomplir ce travail nous avons utilisé un programme numérique structuré suivant une série d'étapes :

- Importation de données essentielles ;
- Sélection des jours de calcul ;
- Calcul de différents paramètres liés au champ solaire ;
- Détermination des coefficients d'échange thermique ;
- Initialisation des températures $T(n, i, j)$ pour tous les nœuds ($n = 1,6$) ;
- Résolution d'un ensemble d'équations interconnectées ($A T=B$) à l'aide de la méthode itérative de Gauss-Seidel.
- Tester la convergence de la solution pour chaque température $T(n, i, j)$;
- Fin du calcul de température lors de la convergence ;
- Si ce résultat n'est pas atteint, le processus revient à l'étape de résolution du système d'équations ;

Le programme de calcul utilisé est écrit en langage FORTRAN.

III.2.2 Préparations des données d'entrée

Nous avons préparé les données d'entrée nécessaire pour l'étude le capteur solaire thermique. Le tableau (III.1) représente les paramètres internes et externes de capteur solaire thermique, ce tableau contient les coordonnées géographiques correspondant au site de Ghardaïa.

Tableau (III.1): Les paramètres internes, externes.

Paramètres externes	Paramètres internes
Journée de calcul : 21 décembre 2022	Épaisseur de vitre : 0.003mm
Température maximale : 19°C	Espace vitre- plaque absorbante : 0.003 mm
Température minimale : 9°C	Epaisseur de plaque : 0.001mm
Longitude : 3.6738412 Est	Diamètre extérieur de tube : 14 mm
Latitude : 32.49 Nord	Diamètre intérieur de tube : 12mm
Altitude : 500 m	Epaisseur de tube : 0.002 mm
Albédo : 0,25	Epaisseur isolant, vitre : 0.9 mm
Vitesse du vent : 10 m/s	Débit du fluide caloporteur : 70l/h
Orientation : plein sud	
Inclinaison : 60°	

Le tableau (III.2) ci-dessous présente les propriétés thermo-physiques de certains matériaux utilisés usuellement comme absorbants.

Tableau (III.2): Caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux métalliques[36].

Métal	$\lambda(w/m.k)$	$Cp(J/Kg.K)$	$\rho(Kg/m^3)$
Cuivre	384	398	8900
Acier inoxydable	14	460	7800
Aluminium	204	879	2700

λ : Conductivité Thermique

Cp : Chaleur massique

ρ : Masse volumique

Le tableau (III.3) donne les propriétés optiques de quelques revêtements sélectifs. On peut noter que la sélectivité est le rapport de l'absorptivité solaire α sur l'émissivité infrarouge ϵ .

Tableau (III.3): propriétés optiques de quelques revêtements sélectifs [37].

revêtements sélectifs	α	E	α/ϵ
Chrome noir	0.93	0.10	9.3
Nickel de nickel poli	0.92	0.11	8.14
Nickel noir sur le fer galvanisé	0.89	0.12	7.4
CuO sur le nickel	0.81	0.17	4.7

Co₃O₄ sur l'argent	0.90	0.27	3.3
CuO sur l'aluminium	0.93	0.11	8.5
CuO sur l'aluminium anodis	0.85	0.11	7.7
Acier poli	0,63	0,09	7
Aluminium anodisé	0,80	0,14	5,71
Peinture noir (silicate)	0,97	0,88	1,10
Acier sablé	0,75	0,80	0,94

III.2.3 Validation de modèle

Pour vérifier la validité de notre modèle, nous calculons les températures des différents éléments de capteur solaire dans les mêmes conditions du travail de HADJI Malek [38] où les coordonnées géographiques au Constantine sont :

Température maximale : 19°C

Température minimale : 9°C

Longitude : 3.6738412 Est

Latitude : 32.49 Nord

Altitude : 500 m

Nous comparons les résultats de notre calcul avec les résultats de HADJI Malek. Dans le tableau (III.4), nous présentons seulement les températures de l'eau à la sortie du capteur solaire (T_F).

Tableau (III.4) : Changement de température de fluide.

TSV	8	10	12	14	16
Travail de HADJI Malek (Constantine).					
T_F	10.48	31.99	47.69	47.57	31.99
Notre étude (Constantine).					
T_F	11.54	32.94	47.97	52.32	44.49

En comparant les températures de l'eau à la sortie du capteur solaire (T_F) de notre calcul avec celles calculées du travail de HADJI Malek [38], nous remarquons que les valeurs de températures obtenues sont presque égales dans le matin (TSV=8-12) mais après midi (TSV=14-

16) on remarque une différence dans les températures, cela est dû aux pertes latérales qui nous n'avons pas pris en compte les dans notre étude.

III.3 Résultats et comparaisons

III.3.1 Puissance absorbée par l'absorbeur lorsqu'on utilise quelques surfaces sélectives

La figure (III.12) indique la puissance absorbée par l'absorbeur lorsqu'on utilise quelques surfaces sélectives sur la plaque absorbante en l'aluminium.

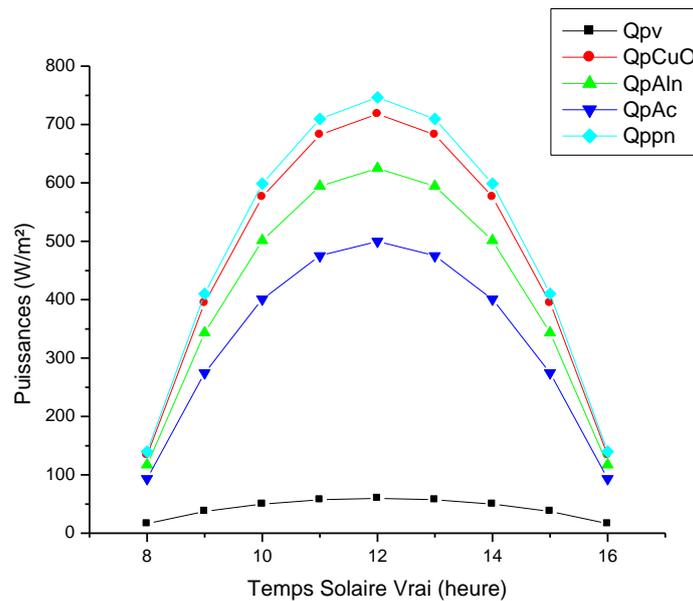


Figure (III.1) : variation de puissance absorbée en fonction de TSV.

Q_x : La puissance absorbée par le corps x (v, pn, CuO, Ac, Aln)

Avec

v : Vitre.

pn : Peinture noire sur une plaque d'aluminium.

CuO : Couche sélective (cuivre oxydé) sur une plaque d'aluminium.

Ac : Couche sélective (Acier poli) sur une plaque d'aluminium.

Aln : Couche sélective (aluminium anodisé) sur une plaque d'aluminium.

On remarque que la puissance absorbée dans le cas de peinture noire sur l'aluminium prend la plus grande valeur $750(W/m^2.K)$ par rapport aux autres couches sélectives, la même remarque quand on applique les mêmes couches sélectives et le revêtement noir sur le cuivre.

III.3.2 Rendement optique

Le tableau (III.5) représente le rendement optique de chaque couche sélective au TSV=12 h .

Tableau (III.5): Rendement optique de chaque couche sélective

	Couches sélective			peinture noire
Revêtement	CuO	Ac	Aln	silicate
η_{op} %	82	57	72	86.

Le calcul montre que le meilleur rendement optique est pour la peinture noir sur la plaque absorbante d'aluminium. Pour les couches sélectives, le meilleur rendement optique est pour la couche sélective CuO sur l'aluminium. On peut noter que la vitre absorbe 5% de puissance de rayonnement incident.

Le tableau suivant affiche les valeurs de rendement optique pour la peinture noir et l'oxyde de cuivre sur l'aluminium.

Tableau (III.6) : les valeurs de rendement optique (Peinture noir sur aluminium, oxyde de cuivre sur aluminium)

TSV (h)	8	10	12	14	16
QP(pn)/G %	80.90	85.69	86.10	85.69	80.90
QP(CuO)/G%	77.85	82.45	82.85	82.45	77.85

III.3.3 Effet des couches sélectives sur la température de la plaque absorbante

La variation temporelle de la température des différents éléments d'un capteur solaire dépend de plusieurs facteurs, notamment de l'environnement, des conditions météorologiques, de la conception du capteur et de l'utilisation prévue.

Dans ce parti nous intéressons à l'effet des couches sélectives sur la température du capteur plan. Nous essayons d'étudier l'aluminium et le cuivre en tant que plaque absorbante et sur laquelle on applique de la peinture noire et un groupe de couches sélectives.

1^{ere} cas : Etude des couches sélectives déposées sur une plaque métallique de cuivre

Les revêtements des surfaces déposées sur une plaque métallique de cuivre sont :

- peinture noire
- aluminium anodise (sélectif)

- Acier poli (sélectif)

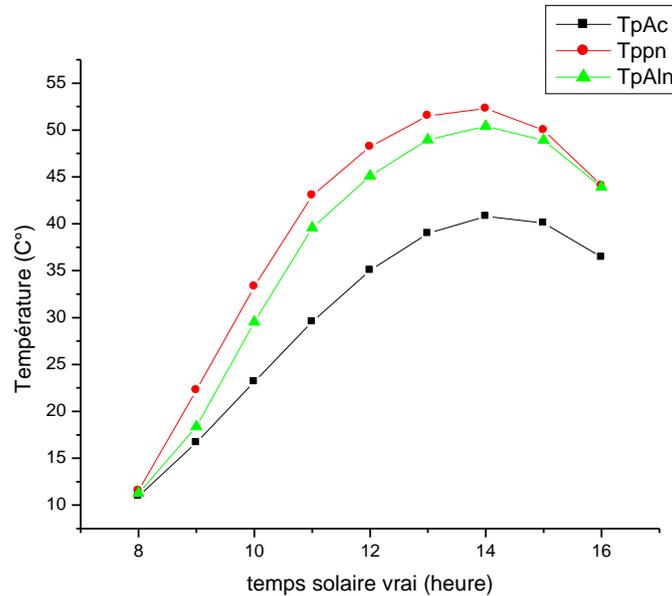


Figure (III.2): Evolution des couches sélectives (**TpAln—TpAc**) sur le cuivre et peinture noire sur Cu.

Les courbes dans la figure (III.2) illustrent les variations de température de la plaque absorbante avec les différents revêtements des surfaces, la peinture noire sur le cuivre pendant toute la journée (TSV) donne les supérieures valeurs de température avec une valeur maximale de plus de 57 °C à TSV=14 h.

La température de la couche absorbante qui tient l'acier poli comme couche sélective reste toujours basse.

On peut noter que le contact direct de l'aluminium avec du cuivre ou l'un de ses alliages tel l'aiton ou bronze est toujours très dangereux car pouvant provoquer une corrosion galvanique importante de l'aluminium même anodisé ou thermo laqué

2^{eme} cas : Etude des couches sélectives déposées sur une plaque d'aluminium

Les revêtements des surfaces déposées sur une plaque métallique d'aluminium sont :

- peinture noire
- aluminium anodisé (sélectif)
- Acier poli (sélectif)
- Couche sélective : CuO (sélectif)

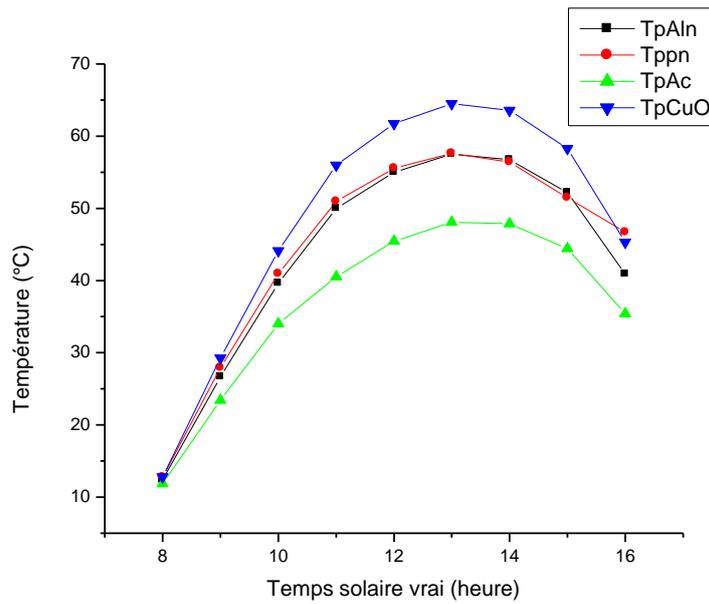


Figure (III.3): Evolution des températures pour différents revêtements des surfaces sur l'aluminium

Les courbes dans la figure (III.3) illustre les variations de température de la plaque absorbante avec les différents revêtements des surfaces sur l'aluminium, la couche sélective CuO pendant toute la journée (TSV) était donné les supérieures valeurs de température avec une valeur maximale plus de 65 °C à TSV=13 h.

La température de la couche absorbante qui tient l'acier poli comme couche sélective reste toujours basse.

La courbe suivante représente les changements des températures lorsque l'oxyde de cuivre est revêtu comme couche sélective sur l'aluminium :

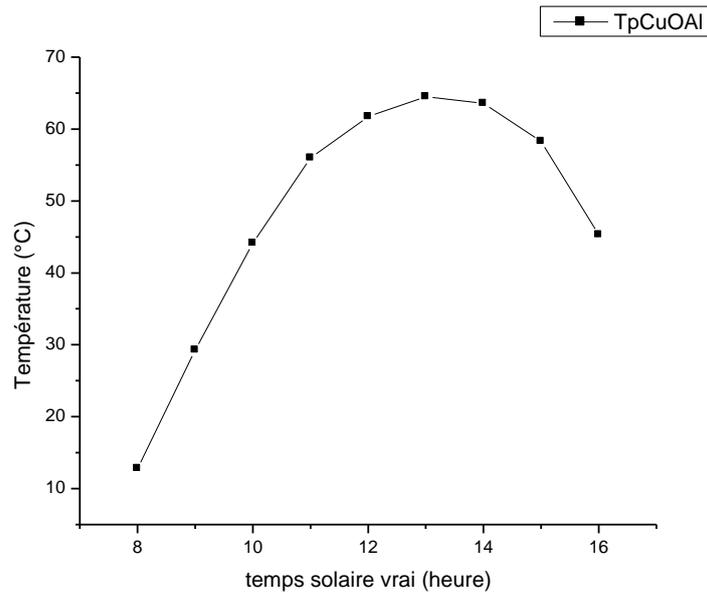


Figure (III.4): Variation des températures pour la meilleure couche sélective CuO sur l'aluminium.

Tableau (III.7) : Température maximale et minimale de (CuO).

Couche sélective	Plaque absorbante	Température (°C) max	Température (°C) min
CuO	Aluminium	64.50	12.81

Nous remarquons que le CuO sur l'aluminium prend une valeur maximale $T_{\max} = 64.50(^{\circ}\text{C})$

III.3.4 Evolutions des températures des différents composants du capteur

Nous traçons figure (III.5) l'évolution de la température des constituants du capteur ainsi que celle de l'eau à la sortie du ce capteur pour

Plaque absorbante Al avec la couche sélective CuO (Al-CuO).

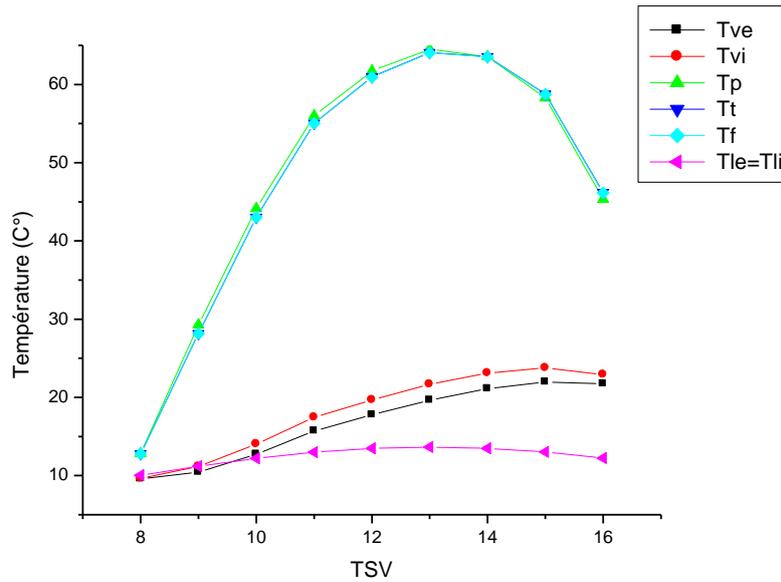


Figure (III.5): Les températures des différents composants de capteur solaire (Al-CuO).

L'ensemble des courbes issue du modèle, indique que les températures des différents éléments du capteur augmentent en fonction du temps jusqu'à TSV~ (12-13) puis diminuent, elles suivent l'allure de la température ambiante.

La température la plus élevée est celle de l'absorbeur puisqu'il dispose d'une importante absorptivité et d'une faible réflectivité, ces dernières sont dues à la sélectivité de sa surface. Les températures du tube et du fluide caloporteur sont légèrement inférieures à celle de la plaque mais elles restent très proches.

On remarque que les températures de la plaque et du tube et de l'eau presque égales en tous les temps en raison de la bonne conductibilité du matériau constituant la plaque qui transmet la chaleur au fluide caloporteur via le tube. La bonne conductibilité du matériau constituant la plaque qui transmet la chaleur au fluide caloporteur via le tube. Ainsi la bonne isolation (faible conductibilité) de l'isolant, nous impose que la température d'isolant interne égale à température de l'absorbeur et aussi parce que nous négligeons les pertes latérales.

On peut noter que le contact direct de l'aluminium avec du cuivre ou l'un de ses alliages tel laiton ou bronze est toujours très dangereux car pouvant provoquer une corrosion galvanique importante de l'aluminium même anodisé ou thermo laqué.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous présentons les résultats obtenus. Dans un premier temps nous présentons la puissance absorbée par l'absorbeur lorsqu'on utilise une peinture noire et quelques surfaces sélectives sur une plaque absorbante l'aluminium ou cuivre. Le meilleur résultat obtenu correspondant au peinture noire avec une puissance absorbante 750 W/m^2 à midi suivi par CuO sur l'aluminium avec une puissance estimée 719 W/m^2 puis l'aluminium anodisé sur l'aluminium avec une puissance estimée 620 W/m^2 , alors que la puissance pour acier poli égale à 500 W/m^2 . Nous observons que la meilleure température est correspondue continûment au peinture noire dans tous les temps (TSV), suivi par la température dans le cas de couche sélective CuO.

Dans le cas où nous utilisons la peinture noire sur la plaque absorbante d'Aluminium la température maximale obtenu est $57,36 \text{ }^\circ\text{C}$ et dans le cas de la plaque absorbante est de cuivre la température est devenu $52.22 \text{ }^\circ\text{C}$.

Nous enregistrons une valeur de température maximale $57.36 \text{ }^\circ\text{C}$ pour l'absorbant lorsque la peinture est placée sur l'aluminium. Lorsqu'on place cuivre oxydé comme couche sélective sur l'aluminium, la valeur maximale égale à $64.5 \text{ }^\circ\text{C}$, ce qui était meilleur que la première.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, sont essentielles au développement durable. Cette étude met en évidence l'importance de matériaux sélectifs pour améliorer l'efficacité des capteurs solaires thermiques. Les résultats indiquent que les revêtements sélectifs peuvent améliorer considérablement les performances du capteur en augmentant la température d'absorption et en réduisant les pertes thermiques.

Le premier chapitre présente les différents types de capteurs solaires (photovoltaïques et thermiques), leurs principaux composants (absorbeur, fluide caloporteur, couvercle transparent, isolation thermique et caisson) ainsi que les principes de fonctionnement basés sur l'effet de serre. Il explique également les pertes thermiques et lumineuses liées à ces dispositifs et les critères de choix des matériaux qui composent les feuilles absorbantes, comme le cuivre, l'acier inoxydable ou l'aluminium, en raison de leur bonne conductivité thermique et de leurs propriétés sélectives.

Dans le deuxième chapitre, nous avons utilisé la modélisation numérique pour évaluer l'effet des couches sélectives sur les performances des capteurs solaires. Différentes méthodes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) sont expliquées théoriquement en montrant le bilan thermique dans le passage de la chaleur d'un matériau à un autre. Les échanges thermiques ont également été modélisés au niveau de la plaque absorbante, du fluide caloporteur et des couches isolantes, permettant de comprendre comment chaque composant affecte l'efficacité globale du capteur.

Le modèle mathématique de ce problème est écrit sous un système d'équation différentielle de premier degré. La modélisation numérique est appuyée sur la discrétisation des équations différentielles couplées par la méthode de différences finies, résultant sous forme matrice vecteur.

La résolution numériquement de système des équations couplées des températures des différents nœuds a été résolue en utilisant un algorithme basé sur la méthode itérative de Gauss-Seidel avec un programme Fortran.

Le meilleur résultat obtenu correspond à la peinture noire avec une puissance absorbante 750 W/m^2 à midi suivi par CuO sur l'aluminium avec une puissance estimée 719 W/m^2 puis l'aluminium anodisé sur l'aluminium avec une puissance estimée 620 W/m^2 , alors que la puissance pour acier poli égale à 500 W/m^2 . Nous avons observé que le meilleur résultat est correspondu continûment à la peinture noire dans tous les temps (TSV), suivi par la couche sélective CuO.

Nous avons enregistré une valeur de température maximale 57,30 °C pour l'absorbant lorsque le cuivre oxydé était placé comme couche sélective sur le cuivre. Lorsque la même couche sélective était placée sur l'aluminium, la valeur maximale vaut 64,50 °C, ce qui était meilleur que la première.

Dans le cas où on utilise la peinture noire sur la plaque absorbante Al la température maximum obtenu est 57,36 °C et dans le cas de la plaque absorbante est le cuivre la température est devenu 52.22 °C.

Références

- [1] P.-J. ANTONY et R.-F. BIZEC, « La Recherche sur les énergies nouvelles », 1980.
- [2] Ne-Zheng Sun, «Mathematical modeling of ground water pollution Springer-Verlag», Berlin, 1996.
- [3] M. KANOUTE, « système chauffe-eau-capteur solaire », projet de fin d'étude MASTER 2, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou ,2018.
- [4] SOTERIS A. KALOGIROU, « Solar thermal collectors and application, Progress in Energy and Combustion Science», Vol 30, P 231-295, 2004.
- [5]CODE, Price. Eurocode 3: Design of steel structures-part 1-2: General rules-structural fire design. London: European Committee for Standardisation, 2007.
- [6] N. HAMANI, A. MOUMMI, N. MOUMMI, A. SAADI, Z. MOKHTARI. « Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra », Revue des Energies Renouvelables, Vol 10, n°2, p215-244. (2007).
- [7] N. Z. SUN AND J.F. THOVERT, « Mathematical modeling of ground water pollution», Springer-Verlag, Berlin, 1996.
- [8] A. BENKHLIFA, « Optimisation d'un capteur solaire plan », Revue des Energie Renouvelable : physique Energétique (1998)
- [9] Anies, Guillaume « le rafraichissement solaire par machine à absorption » thèse de doctorat. fr. Diss. Pau, 2011.
- [10] A. BENALLOU et J. BOUGARD « Guide de l'énergie solaire, le solaire thermique au service développement durable »1996.
- [11] J. BERNARD, « L'énergie : Énergie Solaire-Piscine solaire, INSA Toulouse » Article revue 2009,
- [12] M. DOUCHA, « Etude des transferts thermiques dans une cuve de stockage à double enveloppes d'un système solaire de production d'eau chaude sanitaire », PhD thèse de doctorat, 2012.
- [13] H. BENFIFI, « Etude comparative de deux types de capteurs solaires plans à eau », Mémoire Master, Université Med Khider Biskra, 2019.
- [14] J. Benard ,«calculs et optimisation, Technosup Génie énergétique»,Ellpsis Marketing, paris 383p,2011.

- [15] Aoues, K., Moumami, N., Zellouf, M., M.oumami, A., Labed «Etude théorique et expérimentale des performances d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle», Mémoire Master, Université Med Khider Biskra, 2009.
- [16] A. H. KHEDIM, « Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque », Cent. Publ. Univ., 2003.
- [17] A. A. SFEIR et G. GUARRACINO, Ingénierie des systèmes solaires : applications à l'habitat. Technique et documentation-Lavoisier », 1981.
- [18] S. EL MOKRETAR, R. MIRI, et M. BELHAMEL, « Etude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre applications au séchage des produits agro-alimentaires », J. Renew. Energ., vol. 7, no 2, p. 109-123, 2004.
- [19] L. ROBERT, « Techniques de l'ingénieur « Génie des procédés » », Adsorption, 1999.
- [20] Slimane, B. O. U. G. H. A. L. I « Etude et optimisation du séchage solaire des produits agro-alimentaires dans les zones arides et désertiques » Doctorat thesis, Université de Batna 2 (2010).
- [21] Maigne, Y., « les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE ». Commission «Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » »2008.
- [22] A. BRAHIMI, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », PhD thèse de doctorat, Université de Lorraine, 2016.
- [23] L. BENAHMED et F. Z. BEN MOSTEFA, « Intégration d'un système de rafraichissement solaire au bâtiment. Faisabilité technico-economique », PhD thèse de doctorat, 2013.
- [24] S.KARATHANASIS, Linear Fresnel Reflector Systems for Solar Radiation Concentration: Theoretical Analysis, Mathematical Formulation and Parameters' Computation using MATLAB». Cham : Springer International Publishing, 2019.
- [25] R. BERNARD, G. MENGUY, et M. SCHWARTZ, Le rayonnement solaire. Conversion thermique et applications ». 1979.
- [26] P.BESSEMOULIN et J. OLIVIERI, « Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », La météorologie, vol. 2000, no 31, p. 42-59, 2000.
- [27] Kennedy, Cheryl E. « Review of mid-to high-temperature selective absorber materials, NREL Tech. Rep » National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States), 2002.
- [28] P.LABAT, « Contribution à l'aide à la conception par l'analyse morphologique. Application à des filières de conversion de l'énergie solaire », phdt thesis, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 1977.

- [29] C. ZIDANI, F. BENYAROU, et B ENYOUCEF, « Simulation de la position apparente du soleil et estimation des Energies Solaires incidentes sur un Capteur Plan pour la Ville de Tlemcen en Algérie », *J. Renew. Energ.*, vol. 6, no 2, p. 69-76, 2003.
- [30] J. F. SACADIRA, « Initiation aux transferts thermiques, Technique et Documentation », Paris, 1980.
- [31] B. LIPS et J. VIRGONE, « Séchage solaire des produits en feuilles. Etudes théorique et expérimentale d'un capteur solaire à air », in Huitième Séminaire International sur la Physique Energétique (SIPE'8), 2006.
- [32] Y. Maigne, J. P. CAUSSE, M. CLAVERIE, et B. EQUER, « les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE », Comm. « Energie Chang. Clim. Groupe Trav. « Energie Solaire » Juillet, 2008.
- [33] J. BONAL, P. ROSSETTI, « les énergies alternatives, Omniscience » thèse de doctorat, (2007).
- [34] TAYEBBENOUAZON All content following this page was uploaded by, 22 November 2015.
- [35] P. MOURATOGLOU, et P.G. THEROND, « L'énergie solaire photovoltaïque : Un peu d'Histoire », *Réal. Ind.*, no 4, p. 61-70, 2009.
- [36] ANTOINE, S « 1ere Conférence Euro-méditerranéenne sur la Télégestion, l'Environnement et le Développement Durable », Oran, 19 & 20 octobre 2014.
- [37] C. BERNER, F. DURST, et D. M. MCELIGOT, « Numerical study of fluid flow and heat transfer in a parallel plate channel with baffles », *J. Heat Transf.*, p. 106-743, 1984.
- [38] M.HADJI, « Etude de l'impact de l'espace entre la vitre et l'absorbeur sur le rendement d'un capteur solaire » Mémoire Magister Université LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI 2008.