

MRÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad DAHLAB BLIDA 1
Faculté de Technologie



Département de Mécanique



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Mécanique

Option : Installations Energétique et Turbomachines / Energétique

Thème :

**Étude paramétrique d'un capteursolaire
thermique à eau destine à la région de
Blida**

Présenté par :

Ghezal Imade Eddine

Zemmouri Ahcene

Encadré par :

Dahmani Mourad

Année universitaire : 2023/2024

Remerciements

Nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir accordé la force, le courage et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail.

*Nos remerciements les plus sincères et respectueux s'adressent aussi à monsieur **Dahmani Mourad** qui a veillé à l'élaboration de ce travail de recherche et qui a déployé tous ses efforts pour notre réussite, il n'a cessé de nous faire profiter de sa très haute compétence, de ses conseils faisant preuve de qualité noble peu commune, nous tenons à lui témoigner notre gratitude et notre profonde reconnaissance, et nous le remercions pour l'enseignement plein, et sagesse qui nous a toujours dispensé.*

A monsieur le président de jury, qui nous a fait l'honneur de présider le jury, nous tenons à lui exprimer notre profonde reconnaissance.

A monsieur l'examineur le membre de jury pour le grand honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de juger notre travail et assurer notre soutenance, nous les prions d'accepter tous nos remerciements et l'expression de notre haute considération

<<Un grand merci à mon binôme Zemmouri Ahcene

pour m'avoir accompagné à l'élaboration et à la finalisation de ce projet>>

Ghezal Imade Eddine

<<Je remercie également de ma part mon binôme Ghezal Imade Eddine

de m'avoir accompagné du début à la fin de ce projet >>

Zemmouri Ahcene

Dédicace

A Nos parents

*Pour les sacrifices déployés à nos égards, pour
leur soutien Leur amour et leur confiance en
nous.*

*Qu'ils trouvent dans ce modeste travail, le témoignage de notre
profonde affection Et reconnaissance.*

Que dieu leur réserve la bonne santé et une longue vie.

A Nos familles et nos amis

*Nos sincères sentiments vont à tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué
à la réalisation de ce projet, en particulier nos chères familles et nos amis.*

A Toute personne qui nous a aidé à faire ce projet.

Ghezal Imade Eddine

Zemmouri Ahcene

Résumé

Cette étude a présenté une analyse détaillée des performances thermiques d'un capteur solaire plan à eau, basée sur des simulations numériques 3D réalisées avec Ansys Fluent. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'impact des conditions environnementales et des paramètres de conception sur l'efficacité et le rendement de ce type de capteur solaire.

Les résultats de cette étude montrent que les capteurs solaires thermiques plans peuvent offrir des performances élevées lorsque leurs paramètres de conception sont optimisés en fonction des conditions environnementales locales. La compréhension de l'influence de l'irradiance solaire, du débit massique, des matériaux utilisés et de la température ambiante est essentielle pour maximiser le rendement et l'efficacité des systèmes de capteurs solaires.

Mots-clés : Lame d'Air, Transfert thermique, modélisation, simulation numérique, capteur solaire thermique.

Abstract

This study presented a detailed analysis of the thermal performance of a flat-plate solar water heater, based on 3D numerical simulations conducted with Ansys Fluent. The results obtained help to better understand the impact of environmental conditions and design parameters on the efficiency and performance of such solar collectors.

The findings of this study demonstrate that flat-plate thermal solar collectors can achieve high performance when their design parameters are optimized according to local environmental conditions. Understanding the influence of solar irradiance, mass flow rate, materials used, and ambient temperature is crucial for maximizing the efficiency and effectiveness of solar collector systems.

Keywords: Air gap, Heat transfer, Modeling, Numerical simulation, Thermal solar collector

ملخص

أنتم هذه الدراسة تحليلاً مفصلاً لأداء الحراري لجهاز تسخين مياه الطاقة الشمسية المسطح، استناداً إلى محاكاة رقمية النتائج المحصلة تساعد على فهم أفضل لتأثير الظروف البيئية والمعاملات. Ansys Fluent ثلاثية الأبعاد باستخدام التصميمية على كفاءة وأداء مجمعات الطاقة الشمسية من هذا النوع

تظهر نتائج هذه الدراسة أن جمعيات الطاقة الشمسية الحرارية المسطحة يمكن أن تحقق أداءً عاليًا عند تحسين معاملات التصميم بناءً على الظروف البيئية المحلية. فهم تأثير إشعاع الشمس، ومعدل التدفق الكتلي، والمواد المستخدمة، ودرجة الحرارة المحيطة أمر بالغ الأهمية لتعظيم كفاءة وفعالية أنظمة جمع الطاقة الشمسية

الكلمات الرئيسية: فجوة هوائية، نقل حراري، نمذجة، محاكاة عددية، مجمع طاقة شمسية حرارية

Table des matières

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction Générale	1

Chapitre I : Les capteurs solaires

1.1	Introduction.....	2
1.2	Définition et principe d'un capteur solaire plan.....	2
1.3	Les types d'un capteur solaire thermique	3
1.3.1	Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif	3
1.3.2	Les capteurs plans vitrés.....	3
1.3.3	Les capteurs à tubes sous vide	4
1.4	Constituants d'un capteur solaire plan.....	6
1.4.1	Une couverture transparente	6
1.4.2	Partie absorbante	7
1.4.3	Le fluide caloporteur	8
1.4.4	Partie avant de l'absorbeur L'espace	9
1.4.5	Parties arrière et latérale	9
1.4.6	Le coffre	10
1.5	Les avantages et les inconvénients d'un capteur plan	10
1.5.1	Avantage.....	10
1.5.2	Inconvénients	10
1.6	Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.....	11
1.6.1	Les paramètres internes	11
1.6.1.1	La vitre	11
1.6.1.2	L'absorbeur	11
1.6.1.3	Forme et diamètres des pipes	11
1.6.1.4	La circulation du fluide caloporteur.....	12
1.6.1.5	L'isolation	12
1.6.1.6	L'orientation et l'inclinaison du capteur	12
1.6.2	Paramètres externes.....	12
1.6.2.1	Obstacles	12
1.6.2.2	Rayonnement solaire.....	12
1.6.2.3	Température.....	13
1.6.2.4	Vitesse du vent	13
1.7	Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire.....	13
1.7.1	La conduction	13

1.7.1.1	Pertes par conduction.....	14
1.7.2	La convection.....	14
1.7.2.1	Pertes par convection.....	15
1.7.3	Le rayonnement.....	15
1.7.3.1	Pertes par rayonnement.....	16
1.8	Orientation et inclinaison d'un capteur plan.....	16
1.9	Performances d'un capteur solaire plan.....	16
1.10	Analyse Bibliographie.....	17
1.11	Conclusion.....	18

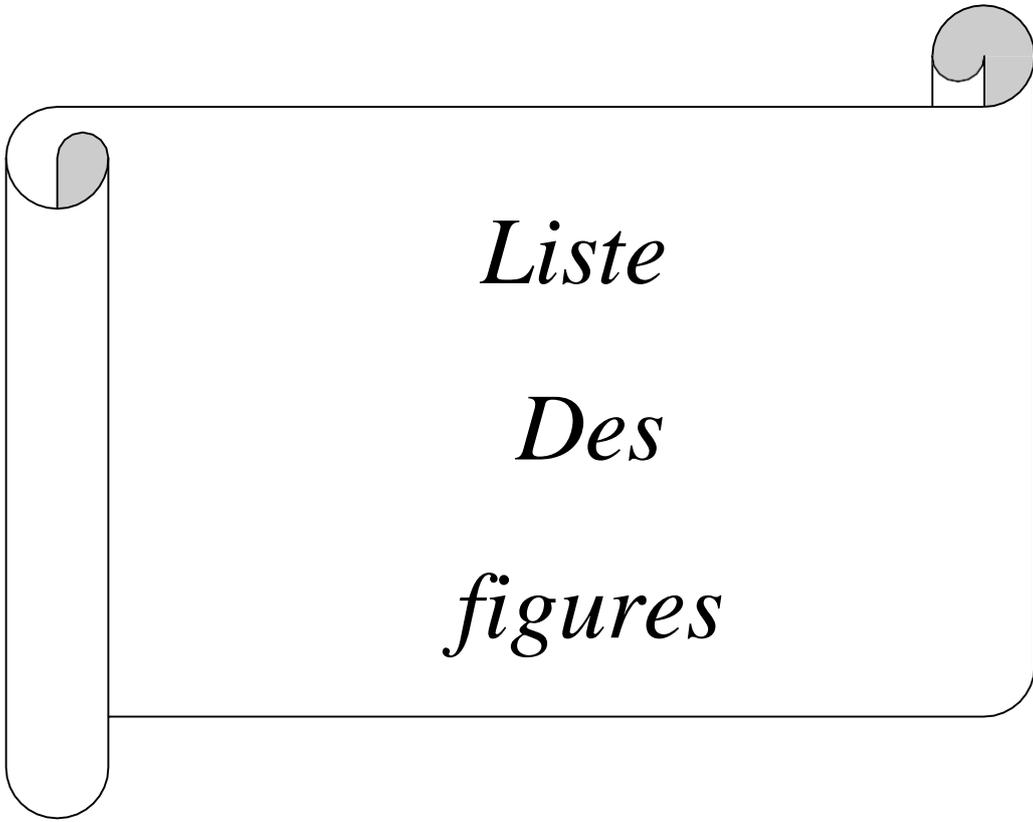
Chapitre 2 : Formulation mathématique et approche numérique

2.1	Introduction.....	19
2.2	Présentation du problème.....	19
2.3	Formulation mathématique du problème.....	20
2.3.1	Formulation générale des équations.....	21
2.3.1.1	Equation de continuité.....	21
2.3.1.2	Equation de quantité de mouvement (Equation de Navier-stokes)	21
2.3.1.3	Equation de conservation de l'énergie.....	21
2.3.2	Hypothèses de simplification.....	22
2.3.3	Equations simplifiées.....	23
2.4	Conditions initiales et aux limites.....	25
2.5	Bilan thermique d'un capteur solaire plan.....	26
2.5.1	Bilan thermique des composants du capteur solaire plan.....	28
2.5.1.1	Bilan énergétique de la couverture transparente (vitre).....	28
2.5.1.2	Bilan énergétique de la plaque absorbante.....	29
2.5.1.3	Bilan énergétique de l'isolation.....	30
2.5.1.4	Bilan énergétique du fluide caloporteur.....	31
2.6	Présentation de l'outil de simulation.....	31
2.7	Définition de la CFD.....	31
2.7.1	Préprocesseur Gambit.....	31
2.7.1.1	Création de la géométrie et son maillage.....	32
2.7.2	Solveur (Fluent, ANSYS-Fluent).....	32
2.7.2.1	Choix des paramètres sur FLUENT.....	32
2.8	Les différentes étapes de l'approche numérique.....	33
2.9	Choix du modèle de rayonnement (Load Solar Model).....	33
2.10	Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Présentation et interprétation des résultats

3.1	Introduction.....	35
3.2	Irradiation solaire pour la journée 21 juin (La ville de Blida).....	35
3.3	Le modèle physique étudié.....	36

3.4	Les résultats obtenus de la simulation numérique d'un capteur solaire thermique à eau	37
3.4.1	Evolution de la température de l'eau à la sortie de capteur ,l'énergie utile récupérée et le rendement du capteur au cours de la journée.....	37
3.4.2	Effet du débit massique sur le rendement thermique et la température de l'eau à la sortie des tubes	39
3.4.3	Influence de la nature du matériau de l'absorbeur sur la température du fluide caloporteur et le rendement.	40
3.4.4	Effet de l'absorptivité de l'absorbeur et de la transmissivité de la couverture en verre sur l'efficacité thermique	41
3.4.5	Effet de la température de l'environnement (T_a).....	43
3.5	Conclusion	44
	Conclusion générale.....	45
	Liste des Références	47



Liste
Des
figures

Liste des figures

Chapitre 1 : Les capteurs solaires

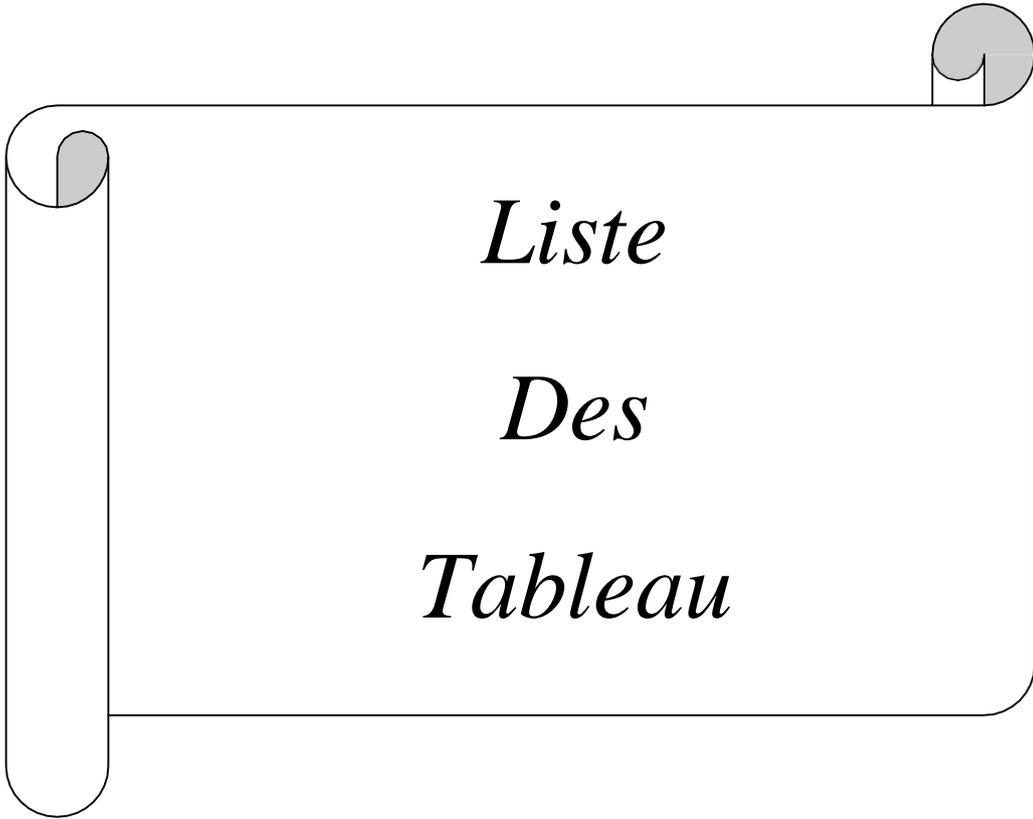
Figure 1.1 : Capteur solaire thermique	2
Figure 1.2 : Capteurs solaires sans vitrage.....	3
Figure 1.3 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif	3
Figure 1.4 : Capteur solaire vitré	4
Figure 1.5 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....	4
Figure 1.6 : capteurs à tube sous vide	5
Figure 1.7 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.....	5
Figure 1.8 : Composants d'un capteur solaire	6
Figure 1.9 : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.....	13

Chapitre 2 : *Formulation mathématique et approche numérique*

Figure 2. 1 : Configuration géométrique du modèle 3D domaine d'étude	19
Figure 2.2 : Présentation des conditions aux limites.....	26
Figure 2.3 : Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire	27
Figure 2.4 : Quelques vues du maillage généré avec Gambit	32
Figure 2.5 : Etapes de résolution suivies par Gambit et Fluent	33

Chapitre 3 : *Présentation et interprétation des résultats*

Figure 3.1 : Variation d'irradiation solaire du la journée 21 juin pour différents instants ...	36
Figure 3.2 : Variation de la température de l'eau à la sortie de capteur et l'énergie utile reçue pour la journée 21 juin à différents instants	38
Figure 3.3 : La variation du rendement de capteur pour la journée 21 juin à différents instants	39
Figure 3.4 : Evolution de la température et le rendement de capteur en fonction du débit	40
Figure 3.5 : Rendement du capteur de différents matériaux absorbants.....	41
Figure 3.6 : La variation du rendement et la température de sortie d'un capteur solaire en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur	42
Figure 3.7 : La variation du rendement et la température de sortie d'un capteur solaire en fonction de la transmissivité de la vitre	42
Figure 3.8 : La variation du rendement et la température de sortie en fonction de la température ambiante	43



Liste

Des

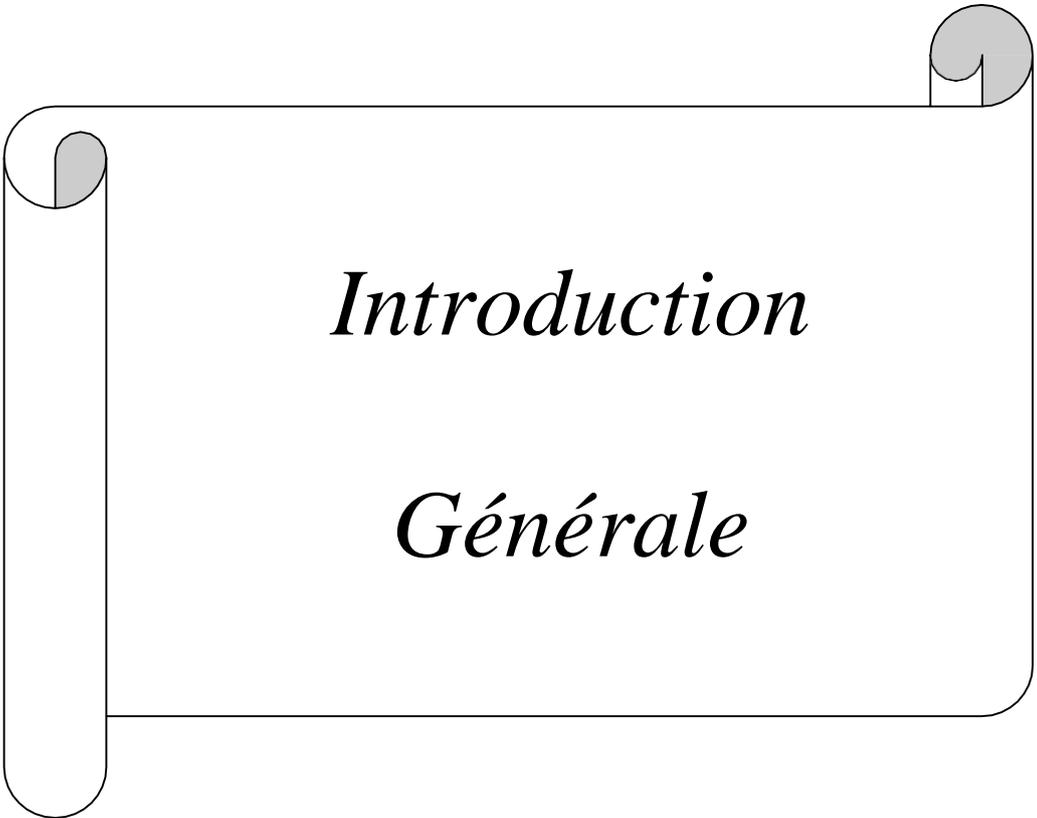
Tableau

Chapitre 1: Les capteurs solaires

Tableau 1.1 : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge	7
Tableau 1.2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques	8
Tableau 1.3 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants	10

Chapitre 2 :Formulation mathématique et approche numérique

Tableau 2. 1 : Les paramètres de la géométrie	20
Tableau 2. 2 : Les propriétés physiques des différents composants de la géométrie	20



Introduction

Générale

Le capteur solaire thermique plat est un dispositif conçu pour capter l'énergie solaire et la convertir en chaleur afin de chauffer un fluide caloporteur. Cette étude propose une analyse approfondie des performances thermiques d'un capteur solaire plan à eau, en s'appuyant sur des simulations numériques 3D réalisées avec Ansys Fluent. Les résultats obtenus permettent d'évaluer l'influence des conditions environnementales et des paramètres de conception sur l'efficacité et le rendement de ce type de capteur.

Pour mener cette analyse, plusieurs hypothèses ont été formulées, et des équations fondamentales de la mécanique des fluides ont été utilisées. L'objectif principal de cette recherche est d'optimiser les performances du capteur solaire thermique plat afin d'améliorer son efficacité énergétique.

Le premier chapitre est consacré à la présentation des capteurs solaires plans, de leurs composants et de leur principe de fonctionnement. Il aborde également les différents modes de transfert thermique intervenant au sein du capteur.

Le deuxième chapitre traite de la modélisation mathématique, des modèles étudiés, des équations de conservation et des hypothèses retenues. Il introduit ensuite le logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) et décrit la méthodologie employée pour résoudre numériquement le système d'équations.

Enfin, le troisième chapitre expose et analyse les résultats obtenus, en les mettant en perspective avec les objectifs de l'étude. L'ensemble du travail se conclut par une synthèse des principaux résultats et des perspectives d'amélioration.



CHAPITRE 1

Capteur solaire

1.1 Introduction

Les capteurs solaires sont des dispositifs dont le principe de fonctionnement est basé sur la transformation de l'énergie solaire en chaleur. Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur les capteurs solaires. On va voir la notion et les composantes d'un capteur solaire, ainsi que ses types et ses utilisations dans le domaine de l'énergie solaire.

1.2 Définition et principe d'un capteur solaire plan

Un capteur solaire (Fig. 1.1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur, qui est transférée à un fluide « fluide caloporteur ». Le système de capture est converti en chaleur, qui est transférée à un fluide « fluide caloporteur ». Le système de capture est basé sur l'effet de serre et capte le rayonnement dans le domaine visible et proche infrarouge (longueurs d'onde comprises entre 0,3 et 3 μm), qui traverse le verre et est piégé à l'intérieur, où il est capté par la surface absorbante [1].

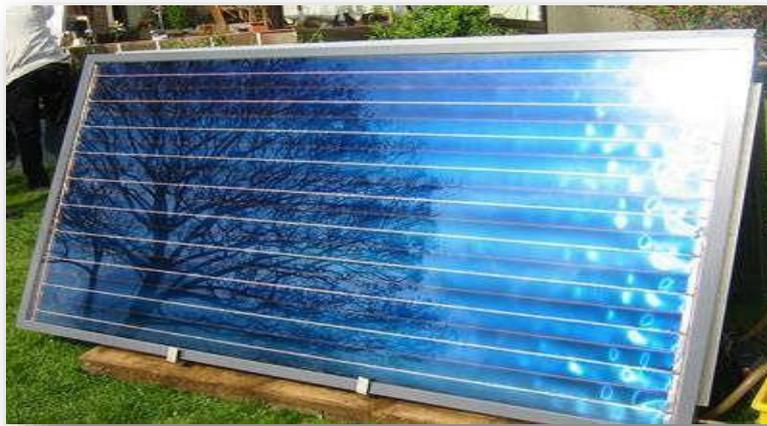


Figure1.1 : Capteur solaire thermique [2].

L'absorbeur émet un rayonnement thermique dans la plage infrarouge (4 à 30 μm) loin de la lumière visible. Ce rayonnement est complètement bloqué par la paroi de verre qui s'échauffe et rayonne pour moitié vers la surface absorbante et pour moitié vers l'extérieur. Le fluide circulant sous l'absorbeur récupère une partie de l'énergie absorbée par convection et monte en température au passage du capteur [3]

1.3 Les types d'un capteur solaire thermique

1.3.1 Les capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et moins sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement. Ils peuvent être utilisés pour chauffer les piscines et chauffer l'eau chaude sanitaire. [4] Leur principe de fonctionnement est illustré sur la figure



Figure1.2 : Capteurs solaires sans vitrage [5].

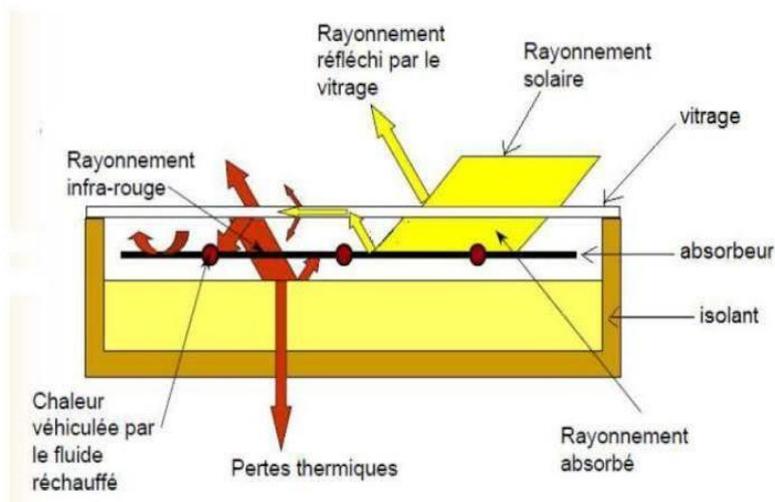


Figure 1.3: Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [3].

1.3.2 Les capteurs plans vitrés

Il s'agit d'un dispositif sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est une plaque métallique sensiblement plate et est traitée en noir pour absorber la quantité maximale de rayonnement.

La façade est recouverte de verre et les côtés et l'arrière sont isolés. La lumière du soleil traversant le verre est absorbée par l'absorbeur qui chauffe et émet des rayons infrarouges. Cette dernière reste piégée dans le capteur du fait du verre (effet de serre) et de l'isolation des autres parois. Le liquide présent dans les tubes récupère la chaleur et la transporte jusqu'au point d'utilisation.

Ce type de capteur peut être intégré à la structure d'un bâtiment, sa température de fonctionnement correspond à la température de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire lorsque la demande est plus importante (hôtels), comme le montre la figure, c'est le principe de fonctionnement [6].

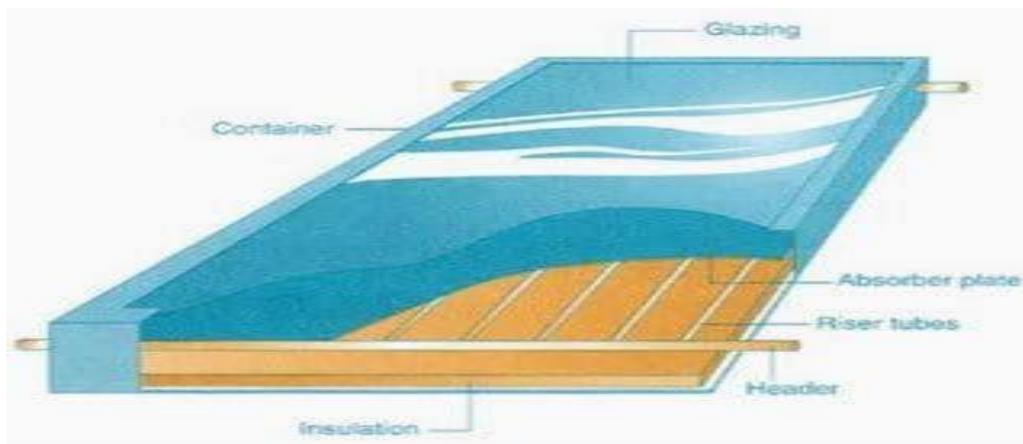


Figure 1.4: Capteur solaire vitré [7].

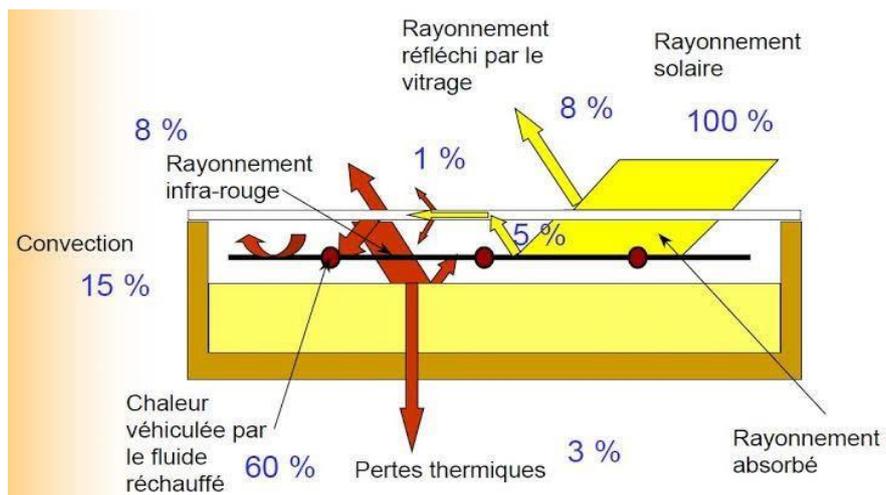


Figure 1.5 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [8].

1.3.3 Les capteurs à tubes sous vide

Un capteur solaire "sous vide" (figure 1.6) est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur, celui-ci reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique ou un coffre de protection. La fabrication des tubes et l'assemblage des capteurs sont simplifiés, car il n'y a pas de soudures verre-métal. Par contre, les tubes thermos sont particulièrement fragiles au point de liaison avec le collecteur, où la partie extérieure et la partie intérieure de chaque tube se rejoignent. En général, la pression dans l'espace vide est inférieure à 1 Pa. Ainsi, les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur sont quasiment éliminées.[9]



Figure 1.6 : capteurs à tube sous vide [10].

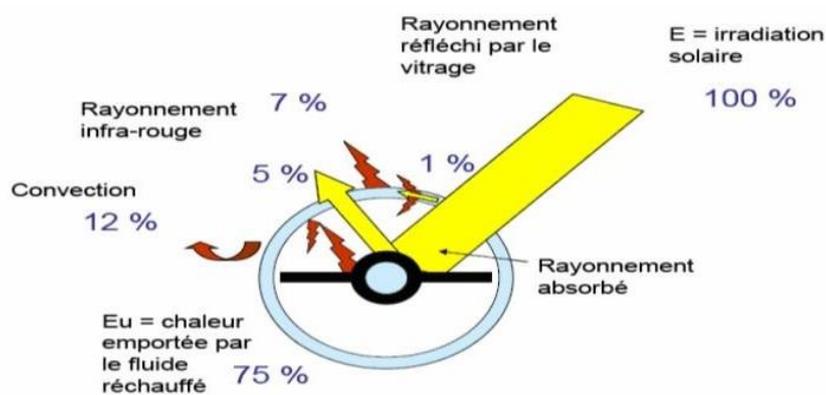


Figure 1.7: Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [11].

1.4 Constituants d'un capteur solaire plan

Les technologies et les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux utilisés dans les secteurs traditionnels du chauffage, du sanitaire et des verrières. De manière générale, un capteur solaire se compose des éléments suivants.

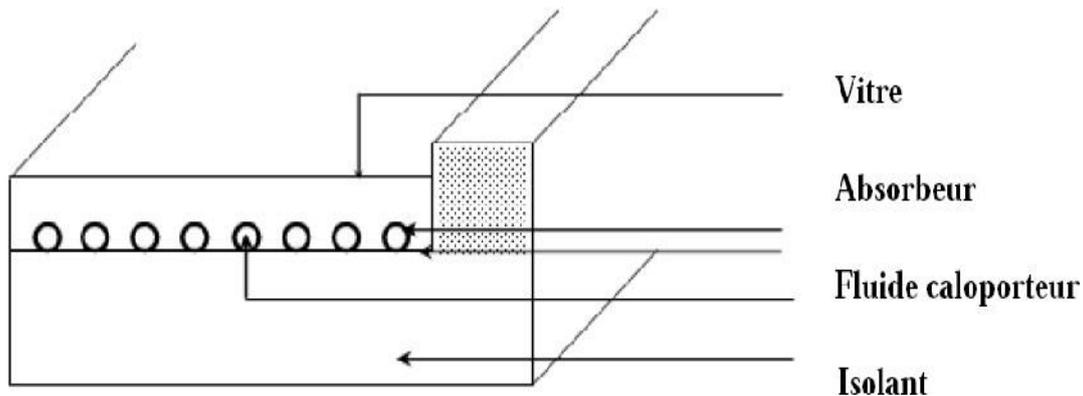


Figure 1.8 : Composants d'un capteur solaire [12]

1.4.1 Une couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré pénètre dans le capteur. Seuls des matériaux transparents peuvent être utilisés. Les avantages de la protection solaire transparente habituelle sont plus importants lorsque la température de fonctionnement du convertisseur est plus élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions fondamentales :

- Reçoit une quantité maximale de rayonnement incident sans réflexion ni diffusion important.
- Transmet la majeure partie du rayonnement reçu.
- Empêche les pertes de chaleur par convection et rayonnement

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres. [13] Le tableau 1.1 fournit quelques indications sur ces matériaux:

Tableau 1.1 : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire maisopaques au rayonnement infrarouge .

Matériau	Facteur de transmission solaire (%)	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)	Dilatation thermique (K ⁻¹)
Verre	85-92	2700	840	0.93	$0.9 \cdot 10^{-5}$
Polycarbonate	82-89	1200	1260	0.2	$6.6 \cdot 10^{-5}$
Polyméthacrylate	89-92	1200	1460	0.2	$7 \cdot 10^{-5}$
Polyester armé	77-90	1400	1050	0.21	$3.5 \cdot 10^{-5}$
Polytéréphtalate Ethylène	84	1.38	1170	0.25	$7 \cdot 10^{-5}$
Polyfluoroéthylène Opoyléne	97	2.15	1170	0.25	10^{-5}
Polyflurure Vinyle	93	1.50	1380	0.12	$4 \cdot 10^{-5}$

1.4.2 Partie absorbante

Sa fonction est d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de le transférer au fluide caloporteur tout en minimisant les pertes. D'une manière générale, un absorbeur est simplement une plaque métallique plane dont la couche superficielle tournée vers le soleil doit avoir le coefficient d'absorption le plus élevé possible. Le coefficient optimal est d'environ 0,95.

L'absorbeur doit assurer les fonctions suivantes [14] :

- Absorbe la majeure partie du rayonnement incident.
- Transfère la chaleur générée par absorption au fluide caloporteur.
- Seul un minimum d'échange thermique avec l'extérieur est accepté pour rendre la section efficace

Tableau1.2 : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques .

Métal	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur massique (J/kg.K)	Masse volumique (kg/m³)	Diffusivité (10⁻⁶m²/s)
Cuivre	384	398	8900	108
Acier Inoxydable	14	460	7800	04
Aluminium	204	879	2700	86

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm .

Les canaux qui contiennent le fluide caloporteur ne doivent pas être trop éloignés les uns des autres ; cela facilite la transmission de la chaleur de l'absorbeur au fluide. En pratique, un espace de 100 à 120 mm entre tubes est généralement utilisé [. .]. Il s'agit d'un compromis entre maximiser la dissipation thermique, avoir une faible inertie thermique et utiliser moins de métal tout en maintenant de faibles coûts de fabrication

1.4.3 Le fluide caloporteur

Pour éliminer la chaleur emmagasinée à la surface de l'absorbant, on utilise généralement de l'air ou de l'eau ; en raison des conditions climatiques, des mélanges eau-glycol sont également utilisés ; la chaleur spécifique de ces mélanges est inférieure à celle de l'eau pure ; Comparé à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel en hiver, d'ébullition en été ou de corrosion. Cependant, l'air ne peut être utilisé que pour le chauffage des locaux et ne transfère pas la chaleur aussi bien que l'eau.

En revanche, quel que soit le système, le contact entre les canalisations transportant le fluide et les plaques absorbantes doit être très étanche, que ce soit par emboutissage ou par soudage.

L'absorbeur doit transférer l'énergie captée au fluide caloporteur tout en évitant les pertes de chaleur des différents composants périphériques vers l'extérieur par conduction, convection et rayonnement [15]. Une solution appropriée est la suivante :

1.4.4 Partie avant de l'absorbeur

L'air entre la vitre et l'absorbeur agit comme un isolant pour conduire la chaleur. Cependant, si la lame est trop épaisse, une convection naturelle se produira, entraînant une perte d'énergie. Pour les températures de fonctionnement typiques des capteurs planaires, l'épaisseur de la lame d'air est de 2,5 cm. En plaçant des obstacles transparentes dans la lame d'air, on limite les pertes dues aux réémissions ainsi que les pertes dues à la conduction et à la convection [12].

1.4.5 Parties arrière et latérale

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, si non, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction.

Le choix du matériau à utiliser dépend de [1] :

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....

Tableau 1.3 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants .

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (Kg/m³)	Chaleur massique (J/kg.K)	Diffusivité (10⁻⁶ m²/s)
Air (à 20°C)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de Polyuréthane	0.029	30	1600	6.0
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène Expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier journal Comprimé	0.105	130	1340	6.0
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

1.4.6 Le coffre

Le coffret, généralement en aluminium ou en bois, encapsule l'isolation thermique de l'absorbeur et du capteur, les protégeant ainsi de l'humidité et des dommages mécaniques.

1.5 Les avantages et les inconvénients d'un capteur plan

1.5.1 Avantage

- ✓ Degré d'utilisation élevé en hiver comme en été.
- ✓ Une longue durée de vie.
- ✓ Efficacité énergétique.
- ✓ Prix économique.
- ✓ Fiabilité.
- ✓ Intégration aux toitures.

1.5.2 Inconvénients

- ✓ Cout du capteur plus élevé pour la même quantité d'énergie.
- ✓ La température interne peut monter très rapidement dans l'absence de circulation de fluide caloporteur.
- ✓ Risque de ne pas être étanche (entrée d'air)

1.6 Les paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

L'efficacité thermique d'un capteur solaire dépend en grande partie du matériau, de la forme, de la taille, de la disposition et des conditions environnantes du capteur. Tous ces facteurs peuvent être divisés en deux grandes catégories :

1.6.1 Les paramètres internes

1.6.1.1 La vitre

La plupart des capteurs solaires couverts utilisés sont à simple, double ou triple couverture.

S.Youcef-Ali

a montré dans une étude expérimentale que les bouchons triple couche ont de meilleures performances que les bouchons double couche en raison de la minimisation des pertes externes.

Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une

Améliorer l'efficacité thermique du capteur. Mais son utilisation présente également des inconvénients, à savoir un coût élevé et une fragilité lors du transport et de l'utilisation. C'est pourquoi les couvercles en plastique transparent sont largement utilisés depuis de nombreuses années pour construire des capteurs solaires peu coûteux et légèrement rigides.

1.6.1.2 L'absorbeur

Une augmentation de la surface du capteur augmente le taux d'interception du rayonnement solaire et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (augmentation de la surface d'échange), mais augmente également le coefficient de déperdition thermique entre le couvercle et l'extérieur.

1.6.1.3 Forme et diamètres des pipes

Un autre facteur qui affecte également l'efficacité du capteur est le tuyau, qui est généralement soudé à la partie inférieure de l'absorbeur et fait parfois partie de l'absorbeur, et sa forme varie d'un capteur à l'autre.

1.6.1.4 La circulation du fluide caloporteur

M. N. Bargach et al. (2004), C. D. Ho et al. (2005) ont montré qu'augmenter la circulation du fluide caloporteur peut augmenter la puissance des capteurs solaires.

1.6.1.5 L'isolation

La principale perte de chaleur du capteur provient du couvercle, puisque les côtés et l'arrière peuvent être isolés, tandis que la façade doit être exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante. C'est pourquoi l'air est souvent utilisé comme isolant pour éviter les pertes de chaleur par conduction et par convection de l'absorbeur vers la fenêtre.

1.6.1.6 L'orientation et l'inclinaison du capteur

Effet de l'orientation du capteur et de son inclinaison par rapport à l'horizontale est dû au fait que ces deux dernières modifient le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur.

Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli (2007) ont découvert que la meilleure orientation d'un capteur solaire est de le pointer directement vers le sud. L'angle d'inclinaison optimal convient à divers systèmes tels que les collecteurs plats ou paraboliques installés en position fixe, les panneaux photovoltaïques, les maisons solaires et les serres. Cet angle joue un rôle important dans l'augmentation de la collecte d'énergie du capteur solaire.

1.6.2 Paramètres externes

1.6.2.1 Obstacles

Cela concerne en premier lieu les bâtiments et la végétation, dont la position dans la trajectoire du soleil peut créer des ombres sur la surface de collecte, préjudiciables au bon fonctionnement de l'installation.

1.6.2.2 Rayonnement solaire

Selon F. Moukhtari et D. Semmar (1999), l'efficacité des capteurs solaires est fortement affectée par le rayonnement solaire, et l'augmentation de la température varie de manière presque linéaire avec le rayonnement solaire incident.

1.6.2.3 Température

La température ambiante affecte fortement le fonctionnement des capteurs solaires. Runsheng Tang et al. (2008) ont montré dans une étude expérimentale que les capteurs peuvent être endommagés par le givrage lors des nuits nuageuses.

1.6.2.4 Vitesse du vent

La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la fenêtre et le monde extérieur, ce qui affecte la valeur de la perte, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est importante. La réduction maximale de l'efficacité est au niveau le plus bas lorsque le coefficient de transfert de chaleur du vent est maximum (1 m de longueur pour un absorbeur noir monté horizontalement).

1.7 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement [16],[17], [18]

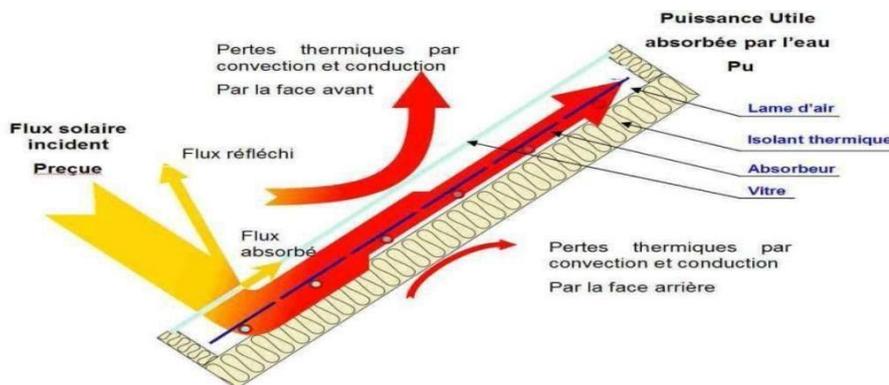


Figure 1.9: Les différents échanges thermiques dans un capteur plan [18].

1.7.1 La conduction

La conduction est le transfert d'énergie des particules les plus énergétiques d'une substance vers les particules adjacentes moins énergétiques, suite à des interactions entre les particules. La conduction peut avoir lieu dans des solides, des liquides ou des gaz.

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier. Donnée par la relation :

$$q_{cd} = -K * A * \text{grad}T \quad (1.1)$$

q_{cd} : flux de chaleur.

K : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

Les faces supérieures et inférieure de la vitre, les faces supérieures et inférieure de l'isolant, l'absorbeur et l'isolant.

1.7.1.1 Pertes par conduction

Lorsque la distance entre l'absorbeur et la fenêtre est courte, des pertes de conduction peuvent se produire entre l'absorbeur et la fenêtre en raison de leur présence au niveau de la couche isolante située à l'arrière et sur les côtés du capteur.

1.7.2 La convection

La convection est le mode de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz en mouvement adjacent. Le taux de transfert de chaleur pour un processus de convection est donné par la loi de refroidissement de Newton :

$$Q_{cv} = h * S * (T_p - T_f) \quad (1.2)$$

q_{cv} : Le flux échangé par convection. h : coefficient de convection.

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide.

T_p : température de la paroi solide.

T_f : température du fluide.

On distingue deux types de convection :

- **Convection forcée** : Mouvement d'un milieu produit par un appareil externe (vent, pompe, ventilateur, etc.).
- **Convection naturelle** : Le mouvement d'un fluide est provoqué par des changements

de densité provoqués par des changements de température au sein du fluide, comme c'est le cas des cycles thermiques (instabilité de Rayleigh-Bénard).

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

1.7.2.1 Pertes par convection

Le processus de transfert a généralement lieu entre la couverture et le milieu environnant, l'absorbeur et la lame d'air, et la lame d'air et la couverture. Le coefficient de perte de chaleur augmente à mesure que l'émissivité, la température et le coefficient d'échange convectif de l'absorbeur avec l'air augmentent, mais diminue à mesure que la distance entre l'absorbeur et la fenêtre augmente. En fixant des obstacles à l'absorbeur, les pertes par l'avant peuvent être minimisées en abaissant la température de l'absorbeur.

1.7.3 Le rayonnement

L'émission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques, appelée rayonnement, se produit lorsqu'il y a des altérations dans les structures électroniques des atomes ou des molécules. Contrairement à la conduction et à la convection, la transmission d'énergie par rayonnement ne nécessite pas l'intervention d'un milieu. La loi de Stefan Boltzmann décrit la vitesse à laquelle la chaleur est échangée par rayonnement.

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * S * (T_s^4 - T_c^4) \quad (1.3)$$

Q_r: Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ε : Émissivité thermique du matériau (ε= 1 pour un corps noir). **σ**: Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$. **S** : la surface (m²).

T_s: La température de la surface,

T_c: La température de ciel

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

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

1.7.3.1 Pertes par rayonnement

La face interne de la couverture absorbe ce rayonnement infrarouge, puis elle subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur et moitié vers l'absorbeur. Donc, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs couvertures.

1.8 Orientation et inclinaison d'un capteur plan

La position et l'angle d'un capteur ont un impact significatif sur son exposition au rayonnement solaire [18]. Pour garantir une collecte d'énergie optimale, les capteurs sont généralement orientés vers le sud afin de recevoir le plein soleil tout au long de la journée, notamment dans l'hémisphère nord.

Le positionnement optimal des capteurs pour une efficacité maximale dépend de la saison. En hiver, une inclinaison verticale des capteurs est plus avantageuse, tandis qu'en été, une inclinaison horizontale donne de meilleurs résultats. Pour obtenir les meilleurs résultats tout au long de l'année, il est recommandé d'ajuster l'inclinaison des capteurs en fonction de la période spécifique de l'année. Les capteurs ne pouvant pas être déplacés, une inclinaison horizontale fixe égale à la latitude du lieu est la solution idéale.

1.9 Performances d'un capteur solaire plan

La performance thermique d'un capteur plan consiste à déterminer son efficacité instantanée ; ceci est décrit par l'équation suivante [19]:

$$\eta = Q_v * C_p * (T_s - T_e) / I * A \quad (1.4)$$

Ou :

- η : le rendement instantané du capteur plan.
- ρ : la masse volumique (Kg/m^3)
- Q_v : le débit volumique (m^3/s).
- C_p : la chaleur spécifique (kJ/Kg).

- **A**: Surface du capteur
- **I** : Intensité du rayonnement solaire.
- **T_s et T_e**: Température de sortie et d'entrée de l'eau (K).

1.10 Analyse Bibliographie

L'intérêt pour l'énergie solaire a augmenté ces dernières années et est considéré comme l'une des principales sources d'énergie alternatives prometteuses pour remplacer les ressources énergétiques fossiles [20-21].

Les systèmes de chauffage solaire de l'eau sont l'une des principales applications de l'énergie solaire et peuvent être utilisés à diverses fins, telles que le chauffage dans les appartements, les maisons familiales, les écoles, les fermes agricoles, les hôpitaux, les restaurants et différentes industries. Dans certains cas, les systèmes de chauffage solaire de l'eau peuvent réduire les coûts de chauffage de l'eau intérieure de 70 % [22].

Dans un capteur solaire, l'énergie solaire est transférée à un fluide. Le type de capteur solaire le plus courant et le plus populaire est le capteur à plaque plane. Les capteurs solaires à plaque plane sont plus simples, plus fiables et relativement moins chers que les autres types de capteurs [23].

Gunnewiek et al. [24-25]. ont étudié la distribution du flux dans les capteurs à plaques non vitrées en utilisant le code TASC FlowCFD, montrant que le flux d'air à travers la surface du capteur est non uniforme en raison des effets de flottabilité.

Gadi [26]. a présenté des modèles numériques basés sur des modèles CFD, vérifiant les prévisions transitoires CFD avec des tests en intérieur utilisant un simulateur solaire.

Gertzos et al. [27]. ont réalisé des études expérimentales et numériques sur le transfert de chaleur dans un chauffe-eau solaire à stockage intégré (ICSSWH), définissant et validant un modèle 3D (CFD) avec des résultats expérimentaux obtenus par vélocimétrie laser Doppler (LDV).

Fan et al. [28]. ont étudié la distribution du flux et le profil de température à travers un capteur solaire sous différentes conditions de fonctionnement, analysant les effets de paramètres importants tels que les propriétés du fluide de travail, le débit, la température d'entrée et l'angle d'inclinaison du capteur.

Selmi et al. [22]. ont mené une étude numérique sur un capteur solaire à plaque plane en utilisant le logiciel CFD-ACE, montrant que le profil de température prédit suit la même tendance que celui expérimental.

Martinopoulos et al. [29] ont examiné un nouveau capteur solaire en polymère, utilisant l'analyse CFD pour étudier les effets des paramètres de fonctionnement sur les profils de vitesse et de température, l'irradiation solaire et le transfert de chaleur dans le fluide circulant.

Al-Ansary et Zeitoun [30] ont utilisé la simulation CFD pour étudier les capteurs paraboliques, modélisant les pertes de chaleur par conduction et convection depuis le récepteur du capteur et examinant l'effet de l'isolation sur les pertes de chaleur.

Sultana et al. [31] ont étudié les performances thermiques d'un micro-capteur solaire en optimisant la conception pour maximiser l'efficacité thermique, en utilisant le logiciel CFD commercial ANSYS-CFX.

Akhtar et Mullick [32] ont développé des méthodes numériques pour étudier les performances thermiques des capteurs solaires à simple et double vitrage, analysant les effets de l'absorption du rayonnement solaire sur les coefficients de transfert de chaleur convectif et radiatif.

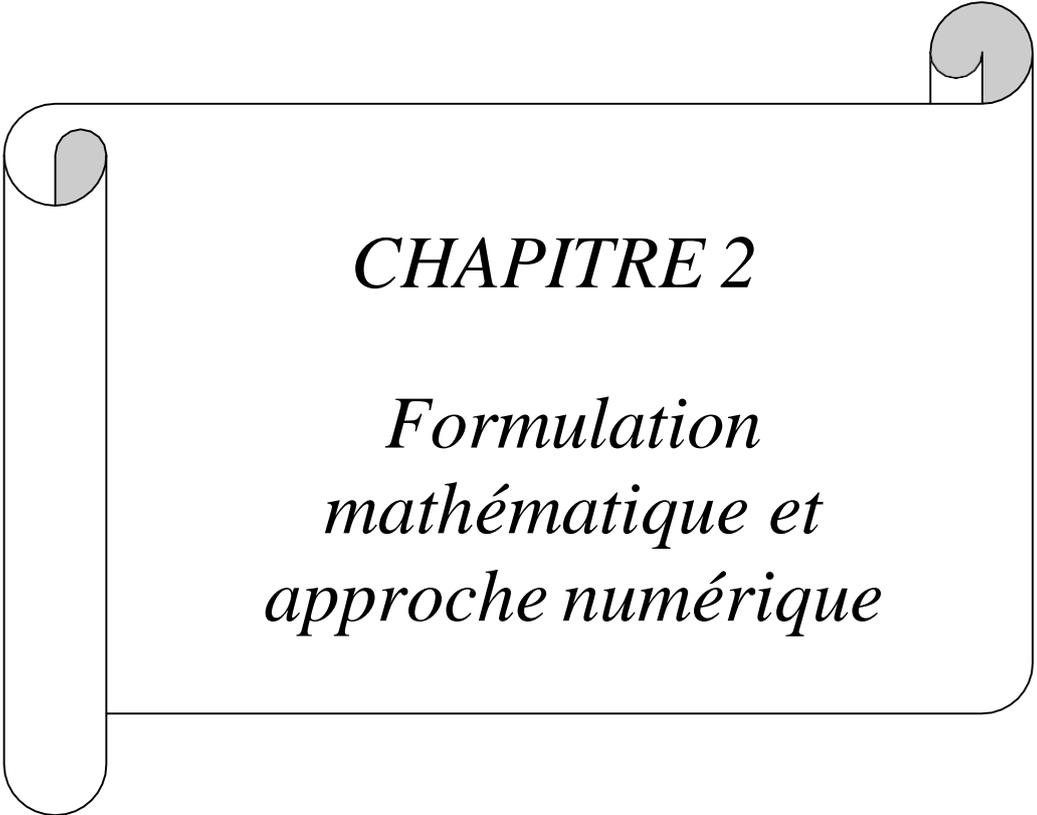
Dovic et Andrassy [33] ont mené des études expérimentales et numériques pour améliorer l'efficacité thermique des capteurs solaires à plaque, étudiant les effets des paramètres géométriques et de fonctionnement sur l'efficacité thermique.

bien que de nombreuses études aient été réalisées sur les capteurs solaires, il existe un manque d'informations sur l'effet des différents paramètres de fonctionnement et géométriques sur les performances globales des capteurs solaires. Cette revue bibliographique met en évidence la nécessité de réaliser une étude numérique complète sur un capteur solaire à plaque plane pour améliorer l'efficacité thermique en utilisant le logiciel ANSYS FLUENT.

1.11 Conclusion

Se chapitre , nous avons discuté du capteur solaire plan. Nous l'avons défini et avons mentionné ses types et ses composants principaux. Nous avons également abordé les échanges thermiques qui se produisent dans le capteur solaire plan et l'influence des facteurs internes et externes sur celui-ci. Enfin, nous avons évoqué les raisons principales qui permettent au capteur solaire plan de fonctionner efficacement.

Nous avons ensuite présenté une revue bibliographique sur les différents travaux pour l'amélioration des capteurs solaires thermiques plans



CHAPITRE 2

*Formulation
mathématique et
approche numérique*

2.1 Introduction

La modélisation des échanges thermiques d'un capteur solaire dans un plan thermique fait l'objet de ce chapitre adresses. Dévoilons la géométrie de notre problème d'étude, les équations de conservation régissant le problème considéré dans cette thèse, les hypothèses faites lors de son élaboration ainsi que les méthodes utilisées pour simplifier et enfin les conditions initiales et limites appropriées à notre configuration. Un aperçu des étapes numériques - pour simuler notre modèle à l'aide d'un logiciel CFD - sera présenté ainsi que des considérations pratiques. La présentation de "FLUENT 6.3" ainsi que de son modèleur "GAMBIT 2.1" permet de créer la géométrie et maillage.

2.2 Présentation du problème

La géométrie liée à ce problème est représentée dans la figure 2.1 comme indiqué ci-dessous. L'étude Il s'agit d'un capteur solaire thermique plat, composé d'un absorbeur (côté inférieur) et un couvercle en verre (face supérieure), ainsi qu'une cavité d'air appelée « lame d'air » située entre l'absorbeur et le verre ; et comprend également un circuit de récupération qui est constitué par : Quatre tubes circulaires sont soudés à la partie inférieure de l'absorbeur. L'angle d'élévation du capteur solaire est $\gamma = 45^\circ$. Il a une longueur L et une largeur l . L a été fixé à 1 m, tandis que les valeurs de H pour l'épaisseur de la lame d'air est fixé à 1 cm

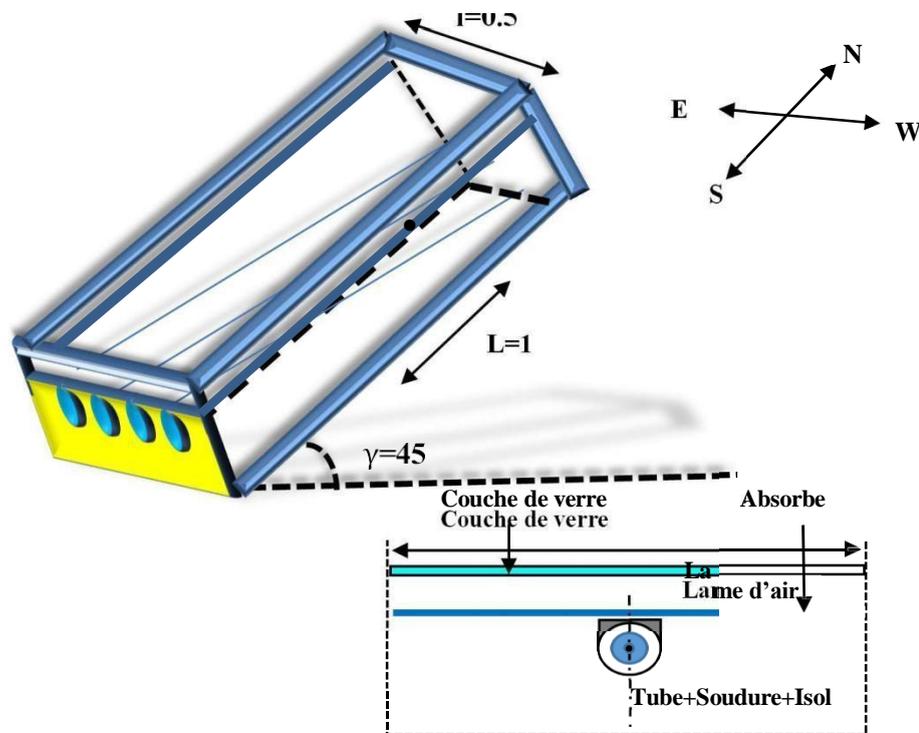


Figure 2. 1 : Configuration géométrique du modèle 3D domaine d'étude.

Les propriétés géométriques de chaque composant du capteur solaire thermique plan sont répertoriés dans le tableau 2.1. Une liste avec les différents composants du capteur et leurs caractéristiques thermophysiques sont présentées dans le tableau 2.2.

Tableau 2. 1 : Les paramètres de la géométrie.

Dimension	Valeurs	Unités
Largeur du capteur	$l= 0.5$	M
Langueur du capteur	$L = 1$	M
Epaisseur de la lame d'air pour trois cas	$H=0.01$	M
Diamètre de la conduite	$D= 0.01$	M
Epaisseur de l'absorbeur	$e_{abs}=0.001$	M
L'inclinaison	$\alpha= 45^\circ$	°Degré

Tableau 2. 2 : Les propriétés physiques des différents composants de la géométrie. 21

L'élément	Matériau	Conductivité Thermique $\lambda(\text{W/m. k})$	Masse volumique $\rho(\text{kg/m}^3)$	Chaleur Spécifique $C_p (\text{j/kg. K})$
Couverture	Verre	0.81	2500	840
Lame d'air	Air	0.2462	1.177	1005
Absorbeur + tube	cuivre	387.6	8978	381
Isolant	Laine de verre	0.04	250	670

2.3 Formulation mathématique du problème

La description du problème mathématique suit : Le modèle analysé peut être résolu en construisant un modèle mathématique, c'est-à-dire que notre étude de cas consiste en un domaine fluide qui est l'air et l'eau contenus dans le tube ; puis un domaine solide (fenêtre, absorbeur, isolant). Les équations qui régissent les domaines fluides (air et eau) sont :

- ✓ Loi de conservation de la masse ou l'équation de continuité.
 - ✓ Deuxième loi de Newton (principe de conservation de la quantité de mouvement) ou équations de Navier-Stokes.
 - ✓ Loi de conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique) ou équation
- L'énergie est impliquée de deux manières. Le domaine solide n'interagit qu'avec l'équation énergétique puisque la conduction n'est pas le seul mode de transfert.

2.3.1 Formulation générale des équations

➤ Dans les parties fluides (air, eau)

2.3.1.1 Equation de continuité

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel.

Il s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{U} = 0 \quad (2.1)$$

Où :

ρ : La masse volumique du fluide.

U : Composante de vitesse suivant les 3 directions (u, v, w).

∇ : est la divergence.

2.3.1.2 Equation de quantité de mouvement (Equation de Navier-stokes)

L'équation de Navier-Stokes, également connue sous le nom d'équation du moment, permet d'établir des liens entre les propriétés du fluide lors de son mouvement et les facteurs qui le génèrent. Cette équation est formulée comme suit :

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{\tau} = -\nabla \cdot \rho + \nabla \cdot \vec{\tau} + \rho \vec{g} \quad (2.2)$$

τ : Tenseur des contraintes de viscosité du fluide défini par :

$$\tau = 2\mu D - \nu \cdot \vec{u} \cdot \vec{u} \cdot I_d \quad (2.3)$$

Où :

I_d : est la tenseur identité ;

μ : est la viscosité dynamique du fluide.

ν : est la viscosité de volume, généralement négligeable (la viscosité de volume ne peut avoir d'effet pour les écoulements incompressibles).

D : est le tenseur des taux de déformation.

2.3.1.3 Equation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie, soit :

$$\rho C_p \frac{dT}{dt} = \nabla(k_f \nabla T) + q + \mu\phi \quad (2.4)$$

Avec :

$\rho C_p \frac{dT}{dt}$: La variation partielle d'énergie.

C_p : La chaleur spécifique.

$\nabla(k_f \nabla T)$: La variation d'énergie par conduction.

$\mu\phi$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

q : La source interne d'énergie.

k_f : La conductivité thermique du fluide.

➤ Dans les parties solide (absorbeur, vitre, isolant)

L'équation d'énergie s'écrit pour chaque composant solide du capteur solaire :

$$(\rho C_p)_s \frac{dT}{dt} = \nabla(k_s \nabla T) + q \quad (2.5)$$

Avec :

k_s : La conductivité thermique du solide.

2.3.2 Hypothèses de simplification

Afin de simplifier le modèle mathématique, nous considérons quelques hypothèses et approximations. On suppose que :

- Fluide Newtonien et incompressible.
- Le milieu est isotrope et continu.
- Les propriétés physiques λ , μ , C_p sont constantes.
- Le terme de pression est négligeable dans l'équation d'énergie.
L'écoulement est stationnaire.
- L'écoulement est laminaire.
- Pas de dissipation d'énergie qui est due aux contraintes.

- La densité du fluide en termes des forces de volume varie linéairement avec la température. Cette variation est donnée par l'approximation de Boussinesq :

$$\rho \vec{g} = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \vec{g} \quad (2.6)$$

➤ Approximation de Boussinesq

Pour simplifier le problème, nous avons examiné l'approximation de Boussinesq. Cette hypothèse maintient que le fluide est incompressible tout en tenant compte d'autres facteurs. Le concept de poussée d'Archimède, communément appelé « moteur de convection », est directement associé à la dilatation ou à la contraction du fluide due aux changements de température. Dans le contexte plus large de la convection naturelle, il est important de considérer l'impact des variations de densité, qui est représenté par le terme $\rho \vec{g}$ dans l'équation de Navier Stokes pour le fluide.

Ainsi $\rho = \rho_0$ sauf pour $\rho \vec{g} = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)] \vec{g}$ La masse volumique varie linéairement avec la température et ceci reste valable tant que $(T - T_0) \ll T_0$.

Où :

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p : \text{est le coefficient de dilatation à pression constante.}$$

ρ_0 : La masse volumique à la température de référence T_0 .

2.3.3 Equations simplifiées

En se plaçant dans le cadre de ces hypothèses et vu que l'écoulement est stationnaire et tridimensionnel, les équations représentatives du problème étudié s'écrivent :

➤ Dans la lame d'air (fluide : air)

➤ **Équation de continuité**

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2.7)$$

➤ **Équation de quantité de mouvement**

✓ Equation de la quantité de mouvement suivant x :

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - g\beta(T - T_0) \cos \gamma \quad (2.8)$$

✓ Equation de la quantité de mouvement suivant y :

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - g\beta(T - T_0) \sin \gamma \quad (2.9)$$

✓ Equation de la quantité de mouvement suivant z :

$$u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) \quad (2.10)$$

Où : ν est la viscosité cinématique du fluide : $\nu = \frac{\mu}{\rho} \left[\text{m}^2/\text{s} \right]$

➤ **Equation de la conservation de l'énergie**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

Ou :

α : est la diffusivité thermique du fluide : $\alpha = \frac{k_f}{\rho c_p}$

➤ Dans les parties solide (absorbeur, vitre, isolant)

✓ **Equation de la conservation de l'énergie**

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2.12)$$

α : Est la diffusivité thermique du solide : $\alpha = \frac{K_s}{\rho c_p}$

➤ Dans le tube (fluide : eau)

Lorsque l'eau s'écoule dans des tubes cylindriques, il est essentiel d'utiliser des coordonnées cylindriques. Ces nouveaux paramètres sont constitués de (r, θ, z) . Dans le cas d'un écoulement incliné, les équations fondamentales de conservation sont modifiées pour s'adapter aux coordonnées cylindriques

➤ **Équation de continuité**

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(rv_r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \quad (2.13)$$

➤ **Équation de quantité de mouvement**

✓ **Selon r**

$$v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{v_\theta}{r} \frac{\partial v_r}{\partial \theta} - \frac{v_z}{r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} + \nu \left[\frac{1}{r} \left(\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rv_r) \right) \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 v_r}{\partial \theta^2} - \frac{v_r}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial v_\theta}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} \right] - \rho g \cos \theta \quad (2.14)$$

✓ Selon θ

$$V_r \frac{\partial V_\theta}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_\theta}{\partial \theta} + \frac{V_r V_\theta}{r} + V_z \frac{\partial V_\theta}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_1}{\partial \theta} + \nu \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (r V_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial \theta^2} - \frac{V_z}{r^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\partial V_r}{\partial \theta} + \frac{\partial^2 V_\theta}{\partial z^2} \right] - \rho g \sin \theta \quad (2.15)$$

✓ Selon z

$$V_r \frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{V_\theta}{r} \frac{\partial V_z}{\partial \theta} + V_z \frac{\partial V_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P_3}{\partial z} + \nu \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial V_z}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 V_z}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 V_z}{\partial z^2} \right] \quad (2.16)$$

➤ Equation de la conservation de l'énergie

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r V_r T) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta T) + \frac{\partial}{\partial z} (V_z T) = \frac{K}{\rho C_p} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \quad (2.17)$$

2.4 Conditions initiales et aux limites

Pour approximer au mieux les conditions de fonctionnement des capteurs solaires thermiques plans, nous imposons les conditions suivantes aux contraintes de domaine :

❖ Conditions initiales

Initialement, l'air est supposé au repos à la température ambiante.

$$T_i = T_a$$

La température du ciel : 268.5(k).

Le coefficient de convection : 2.8 (W.m⁻².K).

La gravité : 9.81 (m.s⁻²).

❖ Conditions aux limites

• Conditions sur la vitesse

La vitesse sur les parois doit respecter les conditions d'adhérence : $U=V=W=0$

• Conditions thermiques

- Sur les parois latérales et coté bas du capteur, la condition adiabatique est appliquée (flux nul) :

$$Q=0.$$

- Sur la face supérieure du vitrage, une Condition de limite mixte est considérée :

$$q = \epsilon \sigma (T_v^4 - T_c^4) + h_{v-a} (T_v - T_a) \quad (2.18)$$

ε : L'émissivité externe de la vitre ($\varepsilon = 0,99$) ;

T_v : température à la surface du verre ;

σ : Constante de Boltzmann ($5.67.10^{-8} \text{W} / \text{m}^2 \text{K}^4$).

h_{v-a} : Coefficient d'échange convectif entre la vitre et l'air ambiant, il est donné par la formule de

$$h_{v-a} = 2.8 + 3w = 2.8 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right]$$

Wattmuf :

T_c : Température du ciel donnée par la formule de Swinbank : $T_c = 0.0522 \cdot T_a^{1.5}$.

Dans la figure ci-dessous, nous résumons les différentes conditions aux limites appliquées à notre problème physique.

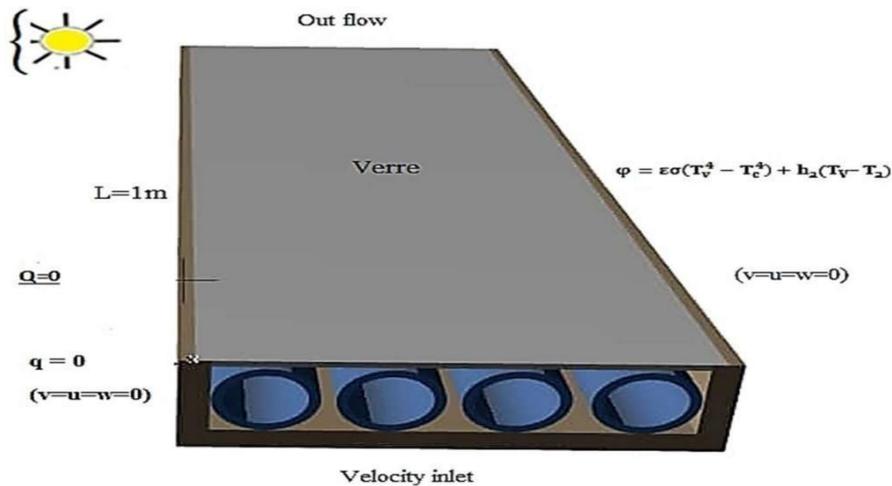


Figure 2.2 : Présentation des conditions aux limites.

- ❖ Afin de reproduire avec précision le rayonnement solaire, nous avons utilisé le modèle Load Solar, qui intègre les coordonnées géographiques spécifiques de la zone étudiée. Pour notre étude, nous nous sommes concentrés sur la région de Blida, située dans le terrain élevé de l'Algérie à 2.8°E de longitude est et 36°.47N de latitude nord, avec une altitude de 260 m.

2.5 Bilan thermique d'un capteur solaire plan

Sur la **Figure 2.3**, nous schématisons le bilan thermique d'un capteur solaire.

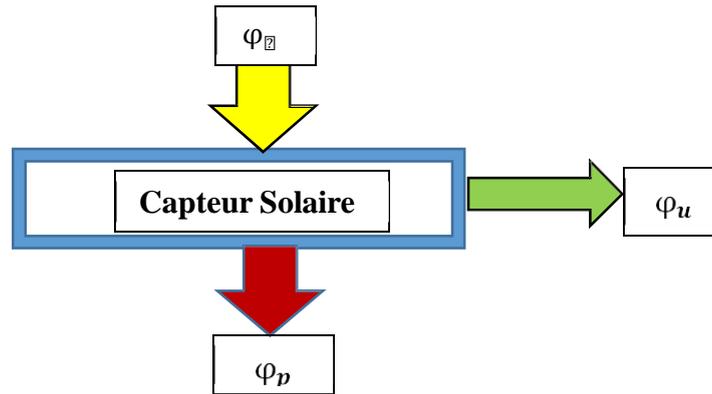


Figure 2.3 : Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire.

Pour un élément absorbant, le bilan thermique s'écrit :

$$\varphi_{sa} = \varphi_u + \varphi_p + \varphi_{st} \quad (2.19)$$

Dans le cas du régime thermique permanent et pour les capteurs thermique plan, la quantité d'énergie stockée dans les différentes parties du capteur solaire est négligeable, ce qui conduit à :

$$\varphi_{sa} = \varphi_u + \varphi_p \quad (2.20)$$

Avec :

$\varphi_{sa} = G \tau_v \alpha_{ab}$: est le flux solaire absorbé en $[w/m^2]$.

$(\varphi_{sa}, G, \tau_v, \alpha_{ab})$: Représentent respectivement la densité de flux au niveau du capteur, le Coefficient de transmission solaire de la vitre et le Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

$\varphi_u = n m' c_p (T_s - T_e)$: est le flux utile transmis au fluide caloporteur en $[w/m^2]$.

$(\varphi_u, n, m', c_p, T_s, T_e)$: Désignent respectivement le nombre de tubes, le débit de fluide caloporteur, la Chaleur spécifique du fluide caloporteur (J/kg K), la température de sortie et d'entrée du fluide (K).

$\varphi_p = k_{c-cv} (T_{pm} - T_a)$: est le flux perdu par un élément absorbant en $[w/m^2]$.

(k_{c-cv}, T_{pm}, T_a) : Représentent respectivement le Coefficient global de déperditions thermiques du capteur, la température moyenne de la paroi absorbante et la température ambiante (K).

φ_{st} : Flux stocké dans le capteur $[w/m^2]$.

2.5.1 Bilan thermique des composants du capteur solaire plan

2.5.1.1 Bilan énergétique de la couverture transparente (vitre)

Flux de chaleur incident et absorbé par la vitre[34].

$$Q_v = \alpha_1 S_1 I_C \quad (2.21)$$

Où

α_1 : Le coefficient d'absorption de la vitre.

S_1 : Surface de la vitre [m²] .

I_C : L'éclairement global incident sur le capteur plan [W/m²] .

Flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant

$$Q_{c1am} = h_{c1am} S_1 (T_1 - T_{am})$$

Où :

T_1 : La température de la vitre[K].

T_{am} : La température ambiante[K] .

h_{c1am} : Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant[w/m²K] .

h_{c1am} : est donné par la corrélation de wattmuf.

Flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel

$$Q_{r1ciel} = h_{r1ciel} S_1 (T_1 - T_{ciel})$$

Avec :

$h_{r1ciel} = \varepsilon_1 \sigma (T_1^2 - T_{ciel}^2) (T_1 + T_{ciel})$: Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel [w/m²K] ; ε_1 l'émissivité du vitrage et σ constante de Boltzman.

La température du ciel (T_{ciel}) est estimée par la corrélation de Swinbank (Duffie et William.)

$$T_2 = 0,0522 \cdot T_{ciel}^{1.5} \quad (2.22)$$

Flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'absorbeur

$$Q_{C12} = h_{c12} S_2 (T_2 - T_1) \quad (2.23)$$

Avec :

$$h_{c12} = N_U \lambda_{air} \quad (2.24)$$

Où L_c

S_2 : La surface de l'absorbeur [m^2].

T_2 : La température de l'absorbeur [K].

L_c : La distance entre la vitre et l'absorbeur [m].

λ_{air} : La conductivité thermique de l'air [W/m. K].

h_{c12} : Le coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur [W/m^2K]. Le nombre de Nusselt Nu pour deux surfaces parallèles inclinées d'un angle entre 0° et 75° , est donné par la corrélation de Hollands .

▪ **Par convection**

$$Nu = 1 + \frac{1.1441 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right] + \left[\frac{1708 (\sin 1.8 \theta)^{1/4}}{Ra \cos \theta} \right] + \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/4} - 1 \right]}{\left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/4} - 1 \right]} \quad (2.25)$$

▪ **Par rayonnement**

Flux de chaleur échangé par rayonnement entre Le vitrage et l'absorbeur.

$$Q_{r12} = h_{r12} S_2 (T_2 - T_1) \quad (2.26)$$

Où :

$$h_{r12} = \sigma \frac{(T_2 + T_1)(T_2^2 + T_1^2)}{\frac{1}{\varepsilon_2} + \frac{1}{\varepsilon_1} - 1} \quad (2.27)$$

ε_2 : Émissivité de l'absorbeur.

h_{r12} : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur [W/m^2K].

2.5.1.2 Bilan énergétique de la plaque absorbante

Flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur[34].

α_2 : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

r_1 : Coefficient de transmission de la vitre.

Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau).

$$Q_{C23} = h_{C23}S_{23}(T_2 - T_3) \quad (2.28)$$

Avec :

$$h_{C23} = N \frac{\lambda_{23}}{u d_{23}} \quad (2.29)$$

Et le fluide caloporteur [w/m^2K].

T_3 : Température du fluide caloporteur[K].

S_{23} : Surface de contact absorbeur fluide caloporteur [m^2] .

d_{23} : Diamètre intérieur du tube [m]

λ_{23} : Conductivité thermique du fluide caloporteur[$w/m. K$] .

2.5.1.3 Bilan énergétique de l'isolation

Flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'isolant et le sol[34].

$$Q_{isls} = h_{ris}S_{is}(T_{isl} - T_{sol}) \quad (2.30)$$

Avec :

$$h_{ris} = \sigma \varepsilon_{isl} (T_{isl}^2 + T_{sol}^2) \quad (2.31)$$

T_{sol} , h_{ris} , ε_{isl} , S_{is} sont respectivement la température du sol [K] , le coefficient d'échange par rayonnement entre l'isolant et le So [w/m^2K] , l'émissivité de l'isolant, la surface de l'isolant [m^2], Flux de chaleur échangé par convection entre l'isolant et l'air ambiant.

$$Q_{ci a} = h_{cis}S_{is}(T_{isl} - T_{am}) \quad (2.32)$$

Avec :

$$h_{cis} = h_{clam} = 5,67 + 3,86V_{vent} \quad (2.33)$$

V_{vent} : Vitesse du vent

h_{cis} : Coefficient d'échange par convection entre l'isolant et l'air ambiant [$\text{W/m}^2\text{K}$]

2.5.1.4 Bilan énergétique du fluide caloporteur

Flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur[34].

$$C_3 = \left(m_3 \frac{dT_3}{dt} + m^o \frac{dT_3}{dx} \right) = h_{c23} S_{23} (T_2 - T_3) \quad (2.34)$$

m^o : Débit massique du fluide caloporteur [Kg/S].

2.6 Présentation de l'outil de simulation

Nous avons tenté de simuler le comportement dynamique et thermique de capteurs solaires plans. Pour cela nous utiliserons les logiciels « Fluent » et « ANSYS-Fluent » pour la modélisation numérique du fluide, et pour la géométrie et le maillage du modèle nous utiliserons le logiciel Gambit.

2.7 Définition de la CFD

(CFD) signifie Computational Fluid Dynamics, ou en français, il est connu sous le nom de Mécanique des fluides numériques (MFN). Il s'agit d'un ensemble de techniques numériques utilisées pour dériver une réponse approximative à un problème lié à la dynamique des fluides et/ou au transfert de chaleur. Le CFD utilise des outils logiciels bien connus, notamment Fluent et ANSYS-Fluent, pour ses calculs.

L'architecture logicielle ressemble à tous les autres logiciels CFD (Computational Fluid Dynamics) et se compose de trois composants : le préprocesseur, le solveur et la station de traitement [35].

2.7.1 Préprocesseur Gambit

Le logiciel Gambit est un préprocesseur 2D/3D supérieur qui permet le maillage de domaines géométriques dans les applications de dynamique des fluides computationnelle (CFD). Il produit des fichiers "msh" spécialement conçus pour être utilisés avec le solveur Fluent. Gambit intègre de manière transparente trois fonctions essentielles dans sa plateforme.

- ✓ Définition de la géométrie du problème étudié.
- ✓ Le maillage et sa vérification.

-
- ✓ La définition des frontières et des conditions aux limites.

2.7.1.1 Création de la géométrie et son maillage

Sur le logiciel « Gambit », la géométrie et le maillage sont générés simultanément. La géométrie est construite dans un format tridimensionnel, composé de divers composants tels que la lame d'air, une cavité rectangulaire avec vitrage sur la partie supérieure et un absorbeur sur la partie inférieure. À l'intérieur de l'absorbeur, un tuyau circulaire est stratégiquement placé. Afin de garantir un maillage de haute qualité, nous avons mis en œuvre des améliorations dans les zones présentant des gradients importants et minimisé les transitions brusques entre les régions à maillage fin et grossier (comme le montre la figure 3.4). La taille de la grille varie de 2 959 200 à 3 849 600 cellules, en fonction de l'épaisseur de la section de la pale d'air.

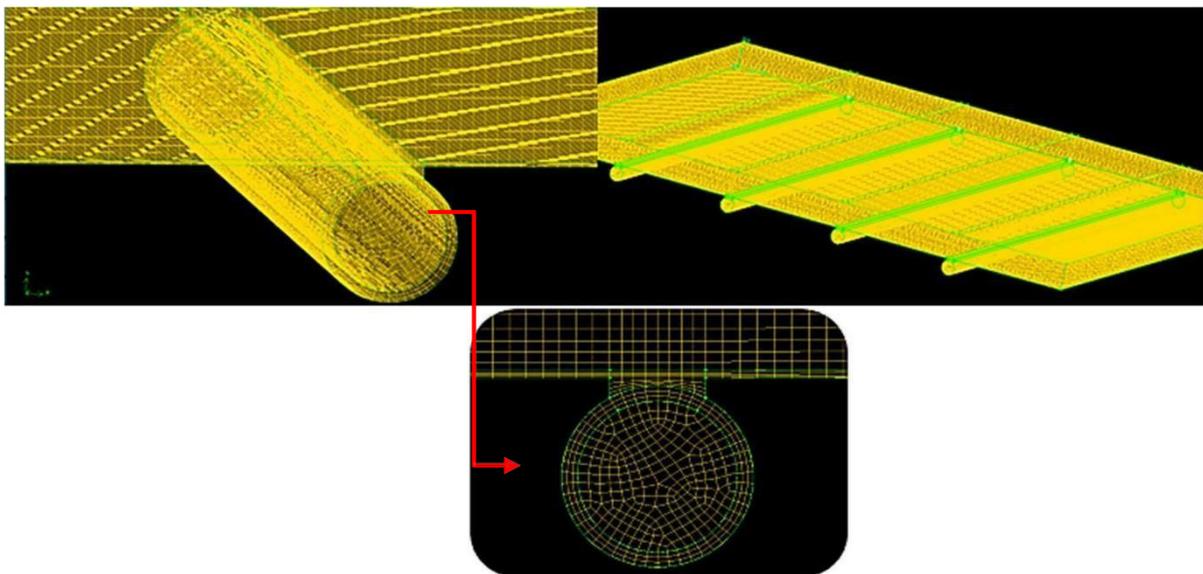


Figure 2.4 : Quelques vues du maillage généré avec Gambit.

2.7.2 Solveur (Fluent, ANSYS-Fluent)

À des fins de modélisation, de visualisation, de prédiction et d'analyse des écoulements de fluides et des transferts de chaleur en dynamique des fluides, la simulation numérique est réalisée à l'aide des logiciels Fluent et ANSYS-Fluent CFD. Le package Fluent, qui s'appuie sur la méthode des volumes finis, est utilisé pour résoudre les équations gouvernantes du système étudié[36].

2.7.2.1 Choix des paramètres sur FLUENT

Dans toutes les simulations qu'on a exécutées, nous avons choisi :

- Le schéma d'interpolation PRESTO ! Pour l'interpolation de la pression.
- L'algorithme SIMPLE, pour le couplage entre la pression et la vitesse.

-
- Le schéma Upwind du Second Ordre pour la discrétisation spatiale.

2.8 Les différentes étapes de l'approche numérique

Les étapes pour le déroulement des simulations sur les deux logiciels Gambit et FLUENT sont résumées sur la **Figure 3.5**.

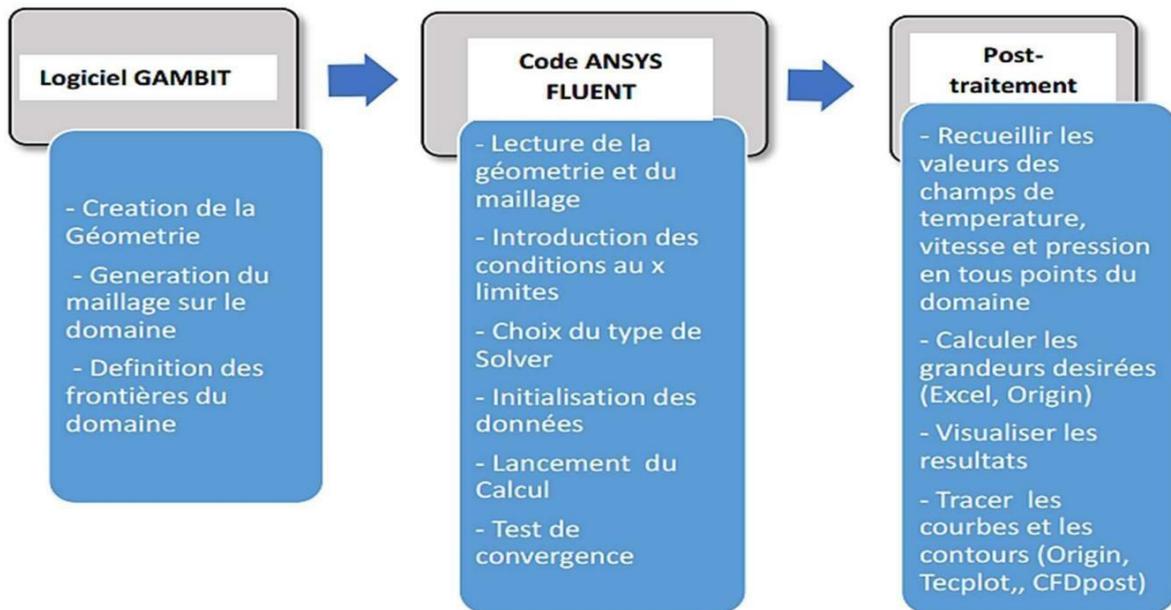


Figure 2.5 : Etapes de résolution suivies par Gambit et Fluent[23].

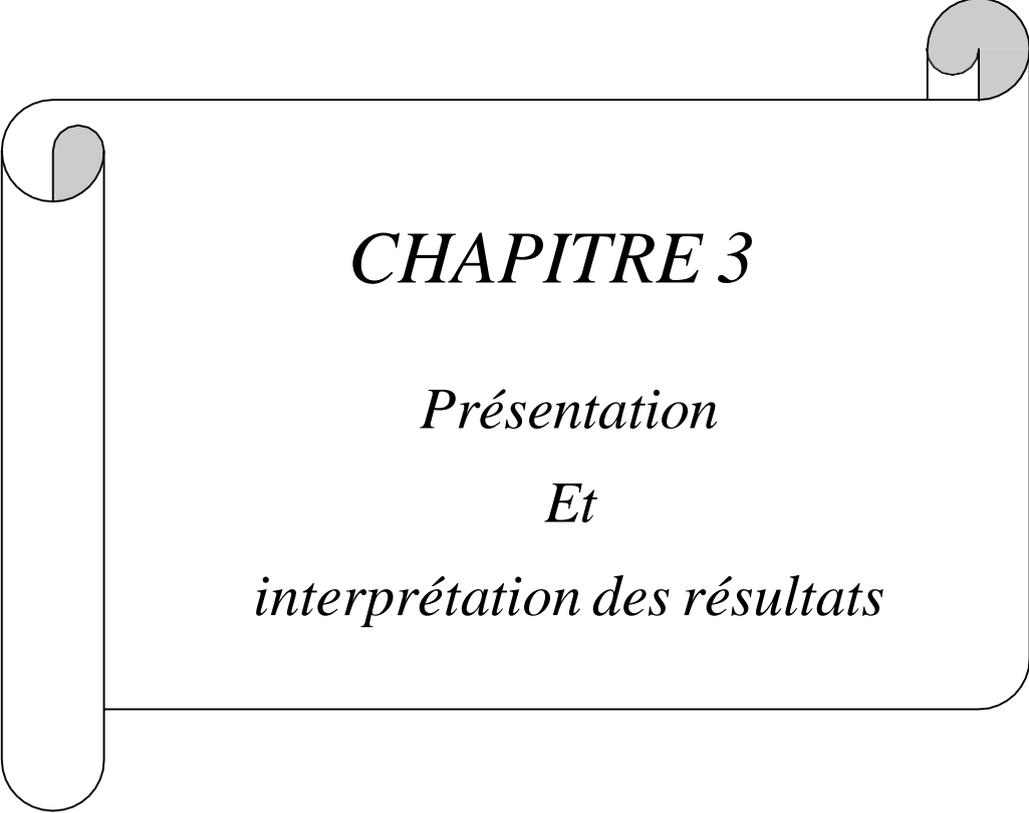
2.9 Choix du modèle de rayonnement (Load Solar Model)

Le modèle FLUENT Solar Load offre un outil complet pour évaluer l'impact du rayonnement solaire sur un domaine de calcul. Ce modèle comprend un utilitaire de calcul solaire, qui permet aux utilisateurs de déterminer la position précise du soleil dans le ciel en fonction de paramètres spécifiques tels que l'heure de la journée, la date et le lieu. Grâce à ces informations, le modèle peut simuler avec précision les flux stables et instables Il permet de :

- Simuler des effets de charge solaire et à déterminer la transmission de l'énergie solaire à travers toutes les surfaces vitrées, au cours d'une journée.
- Faire rentrer la position globale (latitude, longitude et fuseau horaire), la date de départ et le temps.
 - Positionner l'orientation de la grille.
 - Donner l'irradiation solaire et le facteur d'ensoleillement[38].

2.10 Conclusion

Dans cette section particulière, nous avons fourni un aperçu de la géométrie qui a été examinée ainsi que des différents scénarios qui ont été abordés. Par la suite, nous avons exposé les équations mathématiques qui régissent le problème, les conditions aux limites et les hypothèses simplificatrices. De plus, nous avons présenté l'équilibre thermique par rapport à un capteur solaire plat et l'équilibre thermique de ses composants individuels. Pour conclure, nous avons détaillé le code spécifique utilisé aux fins des calculs de résolution numérique. À l'avenir, le chapitre suivant se concentrera sur les résultats dérivés de la simulation numérique et les interprétations correspondantes



CHAPITRE 3

Présentation

Et

interprétation des résultats

3.1 Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les résultats de nos travaux numériques 3D sur un capteur solaire plan à eau. La recherche a été menée à l'aide de logiciel de calcul Ansys Fluent. Le capteur solaire est exposé à un flux introduit par Solar-Load Model. Les calculs sont effectués dans la région de Blida en tenant compte de ses coordonnées géographiques (latitude $36^{\circ}.47N$. longitude $2.8^{\circ}E$).

Dans le cadre de cette étude nous avons adapté les hypothèses suivantes :

- Le capteur solaire thermique plan est incliné d'un angle $\alpha = 45^{\circ}$.
- Les résultats obtenus sont présentés en fonction des paramètres météorologiques de la ville de Blida
- Épaisseur de la lame d'air : 1 cm.

Les calculs sont effectués pour une journée type en période d'été en prend le mois de juin (21 Juin)

3.2 Irradiation solaire pour la journée 21 juin (La ville de Blida) :

En examinant les données fournies par logiciel fluent 6.3 sous forme de la courbe de la figure 3.1 sur l'irradiance solaire directe, diffuse et globale au cours de la journée 21 juin, on note les observations suivantes:

Irradiance Globale :

- L'irradiance globale (somme de l'irradiance directe et diffuse) montre une augmentation progressive à partir de 9h du matin ($931,011 \text{ W/m}^2$) jusqu'à atteindre son maximum à 13h ($1071,716 \text{ W/m}^2$).
- Après 13h, l'irradiance globale commence à diminuer légèrement jusqu'à 15h ($1031,917 \text{ W/m}^2$), ce qui correspond à la fin de la période de mesure à 15h.

Irradiance Directe :

- L'irradiance directe montre également une augmentation significative tout au long de la matinée, atteignant son pic à 12h avec $189,3 \text{ W/m}^2$.
- Après 12h, bien que l'irradiance directe diminue légèrement, elle reste relativement stable jusqu'à 14h avant de diminuer plus notablement après 14h.

Irradiance Diffuse :

- L'irradiance diffuse montre une tendance généralement stable au cours de la journée, avec des valeurs autour de 146 W/m² à 176,2 W/m².
- Cette composante de l'irradiance solaire est moins affectée par les fluctuations horaires par rapport à l'irradiance directe.

En conclusion, ces données indiquent une variation typique de l'irradiance solaire au cours de la journée, avec un pic d'irradiance globale et directe autour de midi, correspondant au moment où le soleil est au plus haut dans le ciel. Les variations observées peuvent être influencées par des facteurs tels que l'angle d'incidence du soleil, les conditions météorologiques locales et la présence éventuelle de nuages.

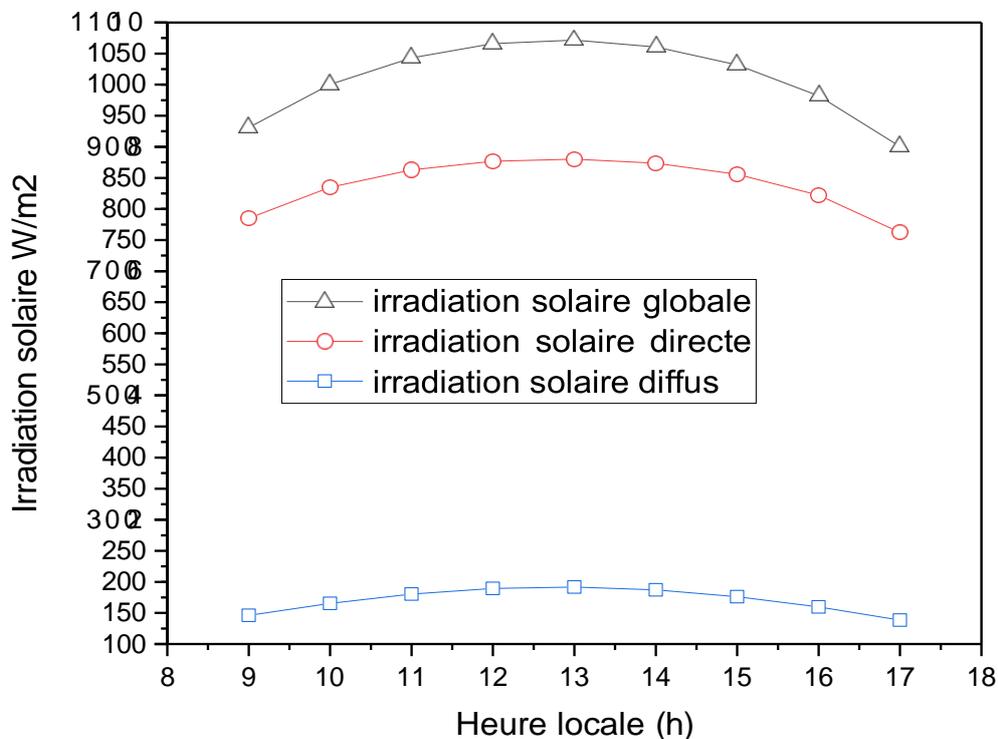


Figure 3.1 : Variation d'irradiation solaire du la journé 21 juin pour différents instants

3.3 Le modèle physique étudié

Le dispositif étudié en géométrie est un capteur solaire thermique plan. Il se compose d'un absorbeur (face inférieure), d'une couverture en verre (face supérieure) afin de réduire les pertes par convection et rayonnement, d'une cavité représentant l'espace entre l'absorbeur et le verre rempli d'air,

ainsi que d'un circuit de récupération constitué de quatre tubes circulaires soudés à la partie inférieure de l'absorbeur.

3.4 Les résultats obtenus de la simulation numérique d'un capteur solaire thermique à eau :

3.4.1 Evolution de la température de l'eau à la sortie de capteur ,l'énergie utile récupérée et le rendement du capteur au cours de la journée:

D'après la figure 3.2, on remarque que la température de l'eau à la sortie du capteur augmente progressivement de 9h à 14h, passant d'environ 313 K à un maximum de près de 367 K à 14h. Puis elle commence à diminuer légèrement jusqu'à 17h. Le flux utile (énergie récupérée) suit une évolution similaire, augmentant de 9h à 14h où il atteint un maximum d'environ 322.02W, avant de redescendre.

- L'augmentation progressive de 9h à 14h s'explique par le rayonnement solaire croissant qui chauffe le capteur et l'eau qui y circule.
 - Le pic de température à 14h correspond au maximum d'ensoleillement en milieu de journée.
 - La légère baisse après 14h est due à la diminution du rayonnement solaire en fin d'après-midi.
- On constate que pendant les heures de pointe d'ensoleillement, la température de l'eau peut augmenter considérablement

Le flux utile (énergie récupérée) suit une évolution similaire, augmentation significative jusqu'à midi, où il atteint 322.02W. Ensuite, il diminue à mesure que la température de l'eau baisse.

Il est clair que le flux utile est fortement influencé par la température de l'eau à la sortie du capteur. Plus la température est élevée, plus le flux utile est important, ce qui est cohérent avec les principes de transfert thermique.

Ces données sont cruciales pour évaluer l'efficacité et les performances du système de capteur thermique. Elles permettent de déterminer les heures de la journée où la production de chaleur est maximale et où elle peut être optimisée

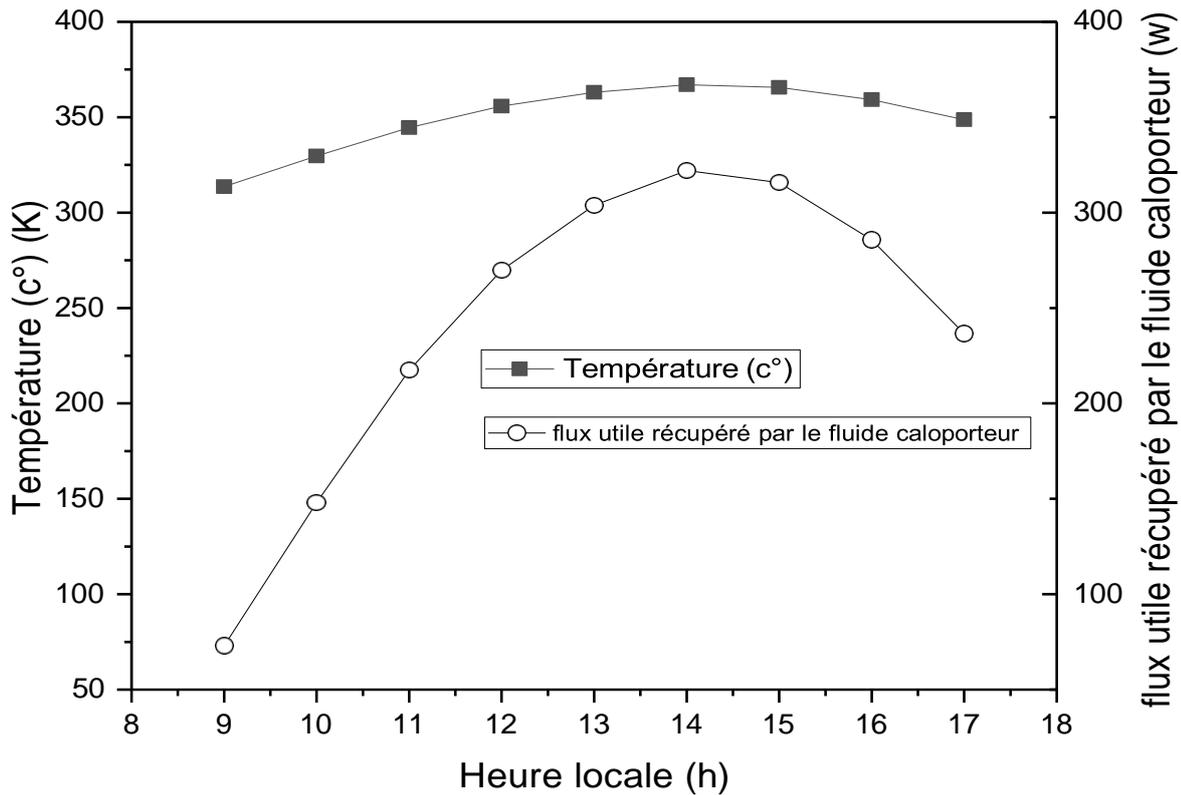


Figure 3.2 : Variation de la température de l'eau à la sortie de capteur et l'énergie utile reçue pour la journée 21 juin à différents instants

Le rendement du capteur, exprimé en pourcentage et pour un débit de 5L/h , montre comment efficacement le capteur convertit l'énergie solaire en chaleur utilisable. Nous remarquons d'après la figure 3.3 :

- Le rendement commence relativement bas à 15,67% à 9h du matin et augmente progressivement pour atteindre 61,19% à 15h.
- Il atteint son maximum à 61,19% à 15h, ce qui indique que c'est le moment où le capteur est le plus efficace dans la conversion de l'énergie solaire en chaleur.

Le capteur montre une augmentation significative de l'efficacité tout au long de la matinée jusqu'à l'après-midi, en parallèle avec l'augmentation de la température de l'eau et de la radiation solaire globale. Cela indique une bonne conception et une bonne performance du système pour exploiter l'énergie solaire disponible.

La période entre 12h et 15h semble être la plage horaire où le capteur atteint son pic de performance, avec des températures d'eau élevées et un rendement maximal du capteur.

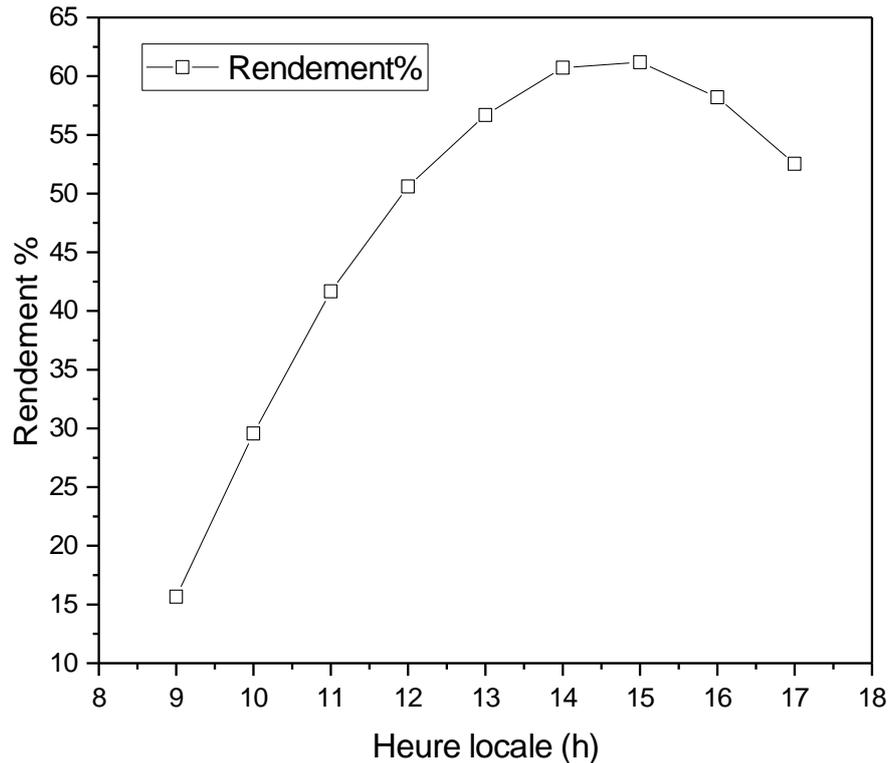


Figure 3.3 : La variation du rendement de capteur pour la journée 21 juin à différents instants

3.4.2 Effet du débit massique sur le rendement thermique et la température de l'eau à la sortie des tubes :

D'après la figure 3.4 , on remarque que :

- Le rendement (%) augmente initialement avec le débit, atteignant un pic à 40 L/h, puis diminue légèrement à 50 L/h.
- À mesure que le débit augmente de 10 L/h à 50 L/h, la température diminue continuellement, passant de 329,94°C à 304,51°C.

Lorsque le débit augmente, l'eau passe plus rapidement à travers le système de capture thermique. Le temps de résidence, c'est-à-dire le temps que l'eau passe dans le système, diminue. Moins de temps de résidence signifie moins de temps pour que l'eau absorbe de la chaleur, entraînant une température de sortie plus basse.

Le rendement maximum est atteint à un débit de 40 L/h. À ce débit, l'équilibre entre le temps de résidence et l'efficacité du transfert de chaleur est optimal.

En résumé, la diminution de la température de l'eau à la sortie avec l'augmentation du débit doit être gérée de manière à optimiser le rendement. Le débit optimal de 40 L/h trouvé dans notre cas

représente cet équilibre, offrant le meilleur compromis entre un transfert de chaleur efficace et un rendement maximal.

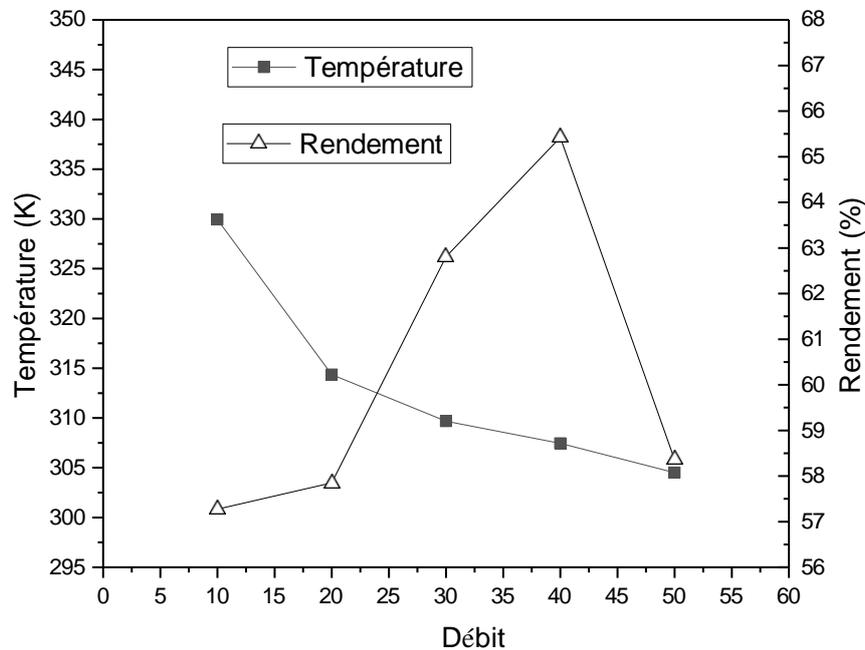


Figure 3.4 : Evolution de la température et le rendement de capteur en fonction du débit

3.4.3 Influence de la nature du matériau de l'absorbeur sur la température du fluide caloporteur et le rendement.

Le cuivre a une conductivité thermique d'environ $400 \text{ W/m}\cdot\text{K}$, ce qui est très élevé comparé à des matériaux comme l'aluminium ($237 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) et l'acier ($50 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). La chaleur absorbée est rapidement transférée du cuivre vers le fluide caloporteur circulant dans le capteur. Cette efficacité dans le transfert de chaleur réduit les pertes thermiques et maximise la quantité de chaleur utilisable transférée au fluide. D'après la figure 3.5 :

- L'amélioration du rendement en utilisant le cuivre au lieu de l'aluminium est d'environ **4,10 %**.
- L'amélioration du rendement en utilisant le cuivre au lieu de l'acier est d'environ **21,91 %**.

Ces calculs montrent que le cuivre offre un rendement significativement supérieur par rapport à l'aluminium et à l'acier, avec une amélioration particulièrement marquée par rapport à l'acier.

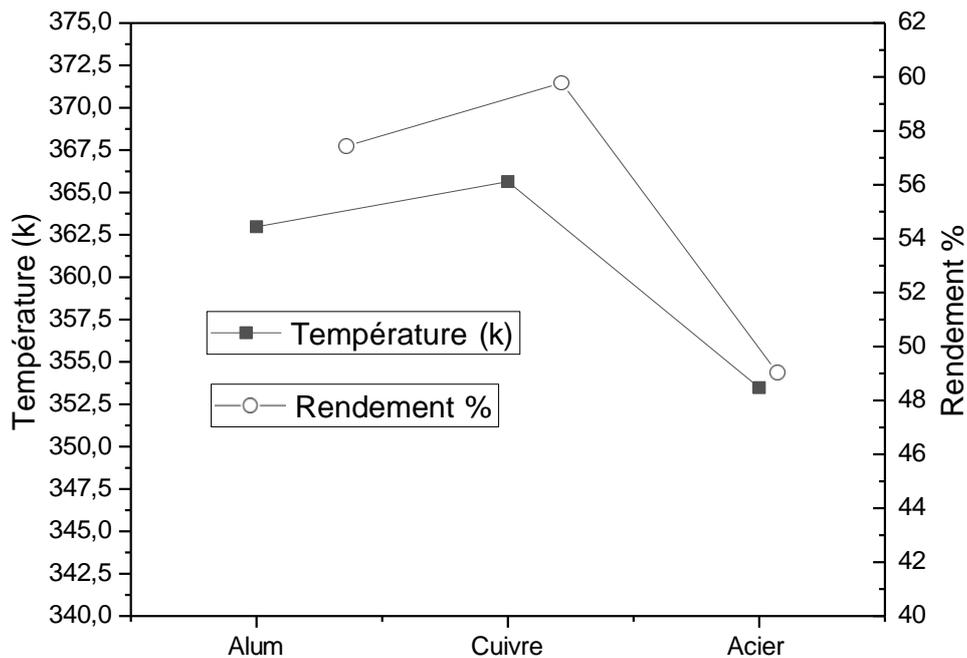


Figure 3.5 : Rendement du capteur de différents matériaux absorbants

3.4.4 Effet de l'absorptivité de l'absorbeur et de la transmissivité de la couverture en verre sur l'efficacité thermique :

D'après la figure 3.5 , à mesure que l'absorptivité augmente, la température de l'eau à la sortie du capteur augmente également. Cela s'explique par le fait qu'un absorbeur avec une absorptivité plus élevée capture une plus grande quantité d'énergie solaire. Cette énergie supplémentaire augmente la température de l'absorbeur, qui est ensuite transférée au fluide caloporteur (dans ce cas, l'eau). Par conséquent, l'eau sort du capteur à une température plus élevée.

Une absorptivité plus élevée signifie que plus d'énergie solaire est captée et convertie en chaleur utile. Cela réduit les pertes énergétiques relatives et augmente l'efficacité globale du capteur. L'augmentation de l'absorptivité de l'absorbeur dans un capteur solaire thermique a un effet positif sur la température de l'eau à la sortie et le rendement du capteur.

Ces résultats soulignent l'importance de choisir des matériaux et des revêtements d'absorbeurs avec une haute absorptivité pour maximiser la performance des capteurs solaires thermiques.

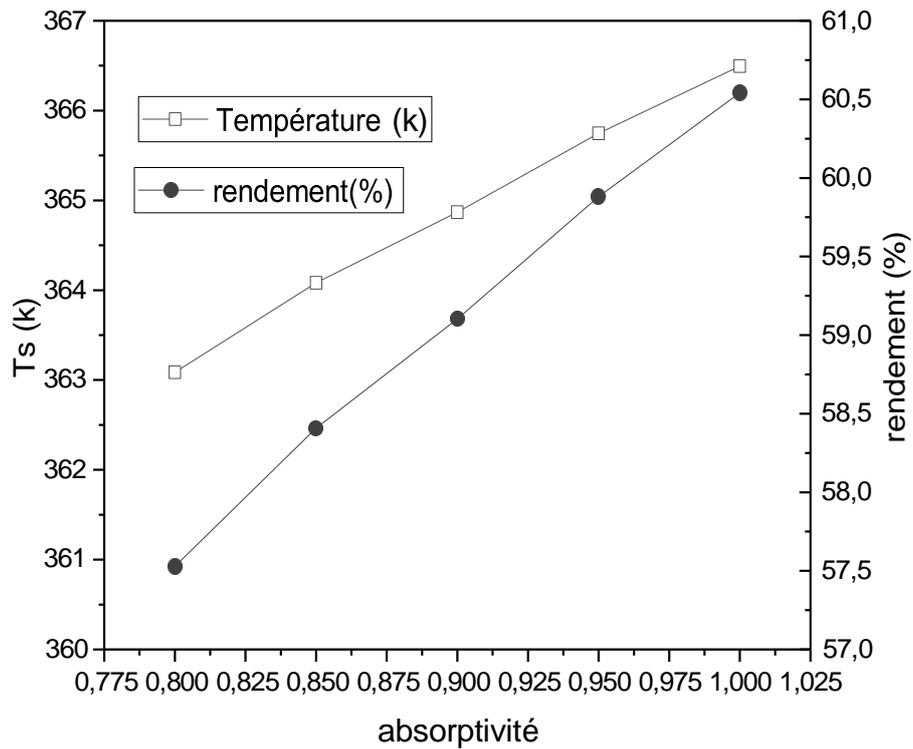


Figure 3.6 : La variation du rendement et la température de sortie d'un capteur solaire en fonction de l'absorptivité de l'absorbeur

D'après la figure 3.7, on constate que, pour des valeurs de transmissivité de la vitre plus élevées, la température de sortie de l'eau et le rendement du capteur solaire augmentent. Cela est cohérent car une plus grande transmissivité permet à davantage d'énergie solaire d'atteindre l'absorbeur et donc d'être transférée à l'eau circulant à l'intérieur du capteur.

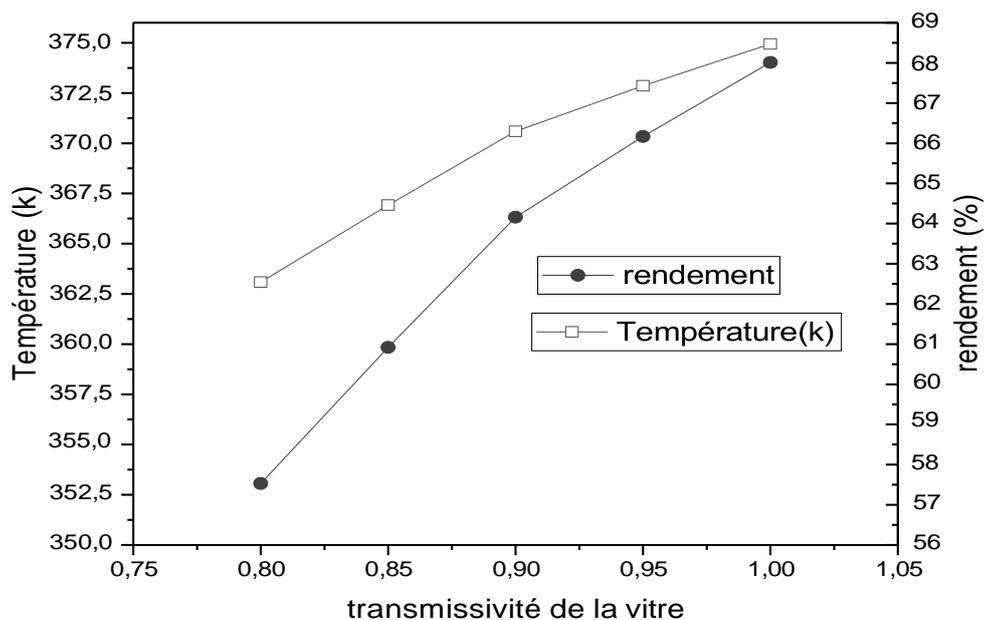


Figure 3.7 : La variation du rendement et la température de sortie d'un capteur solaire en fonction de la transmissivité de la vitre

3.4.5 Effet de la température de l'environnement (T_a) :

L'effet de la température de l'environnement sur les performances thermiques du collecteur est présenté dans la figure 3.8. L'analyse du graphique montre clairement que l'augmentation de la température ambiante a un effet bénéfique sur les performances du capteur solaire. Plus précisément :

- Température de sortie : Lorsque la température ambiante augmente, la température de sortie du fluide caloporteur (eau) augmente. Cela signifie que le capteur solaire est capable de transférer plus de chaleur à l'eau lorsqu'il fonctionne dans des conditions de température ambiante plus élevées.
- Rendement thermique : Le rendement du capteur solaire augmente également avec la température ambiante. Cela peut être attribué à la réduction des pertes thermiques par convection et rayonnement lorsque la différence de température entre le capteur et l'environnement est moindre.

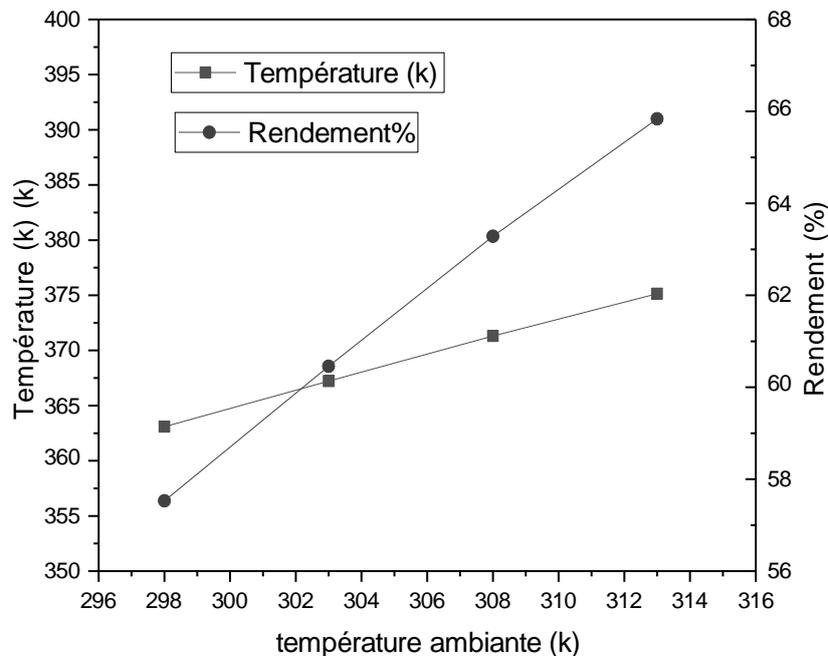
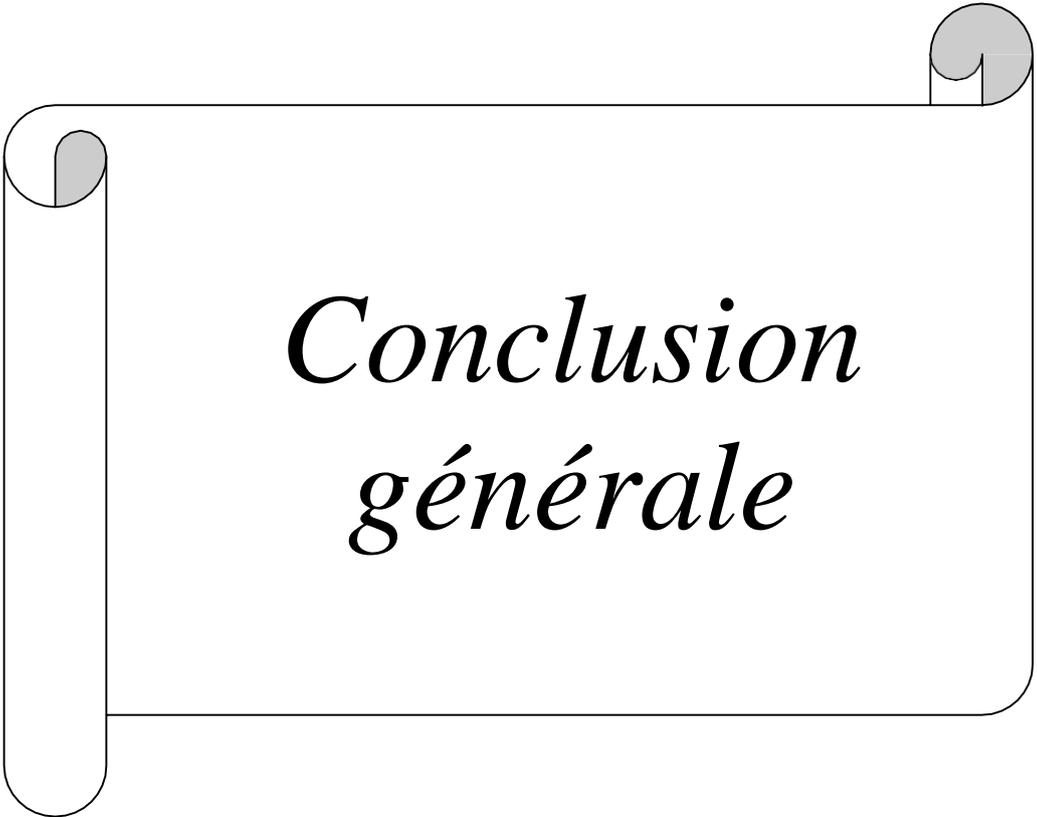


Figure 3.8 : La variation du rendement et la température de sortie en fonction de la température ambiante

Les données montrent que les capteurs solaires fonctionnent de manière plus efficace et produisent une température de sortie plus élevée dans des environnements plus chauds, ce qui améliore leur rendement thermique global. Les résultats obtenus concordent avec les études antérieures [1,2].

Conclusion

Les résultats de cette étude montrent que les capteurs solaires thermiques plans peuvent offrir des performances élevées lorsque leurs paramètres de conception sont optimisés en fonction des conditions environnementales locales. La compréhension de l'influence de l'irradiance solaire, du débit massique, des matériaux utilisés et de la température ambiante est essentielle pour maximiser le rendement et l'efficacité des systèmes de capteurs solaires. Ces insights sont cruciaux pour le développement de technologies solaires plus efficaces et pour l'adaptation des installations solaires aux spécificités climatiques locales, contribuant ainsi à une utilisation plus large et plus efficace des énergies renouvelables.



*Conclusion
générale*

Conclusion générale :

Cette étude a présenté une analyse détaillée des performances thermiques d'un capteur solaire plan à eau, basée sur des simulations numériques 3D réalisées avec Ansys Fluent. Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre l'impact des conditions environnementales et des paramètres de conception sur l'efficacité et le rendement de ce type de capteur solaire. Voici les conclusions principales :

1. Influence de l'Irradiance Solaire :

- L'irradiance solaire globale, qui inclut les composantes directe et diffuse, atteint son maximum aux alentours de midi, ce qui correspond à la période où le capteur solaire reçoit le plus d'énergie.
- La performance du capteur suit cette tendance, avec des températures de sortie et des rendements maximaux aux heures de fort ensoleillement.

2. Température de l'Eau à la Sortie :

- La température de l'eau à la sortie du capteur augmente progressivement au cours de la matinée pour atteindre un pic vers 14h. Après cette heure, la température diminue en raison de la baisse de l'irradiance solaire.
- Les températures maximales observées montrent que le capteur est capable de chauffer l'eau de manière significative, surtout pendant les périodes de fort ensoleillement.

3. Rendement du Capteur :

- Le rendement du capteur augmente avec l'irradiance solaire et atteint son maximum en début d'après-midi. Ceci souligne l'importance de maximiser l'exposition solaire pour améliorer l'efficacité du capteur.
- Le rendement est également influencé par le débit massique de l'eau circulant dans le capteur. Un débit optimal permet de trouver un équilibre entre le temps de résidence de l'eau dans le capteur et l'efficacité du transfert thermique.

4. Effet des Paramètres de Conception :

- La nature du matériau de l'absorbeur a un impact significatif sur les performances thermiques. Le cuivre, en raison de sa haute conductivité thermique, offre les meilleurs résultats en termes de température de sortie et de rendement.
- L'absorptivité de l'absorbeur et la transmissivité de la couverture en verre jouent également des rôles cruciaux. Une haute absorptivité et transmissivité améliorent la capture de l'énergie solaire et, par conséquent, l'efficacité globale du capteur.

5. Influence de la Température Ambiante :

- Une augmentation de la température ambiante réduit les pertes thermiques par convection et rayonnement, améliorant ainsi le rendement du capteur.
- Les capteurs solaires fonctionnent de manière plus efficace dans des environnements plus chauds, ce qui permet une meilleure conversion de l'énergie solaire en chaleur utilisable.

- [01] **K. Salima**. "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009) 03-15.
- [02] Renouvelables-ACCUEIL.(n.d.).Récupéré de http://mohamad.fahmi.free.fr/accueil_renouvelables.html
- [03] **A. Dalila**. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives". Thèse de magister (2010) 17-3
- [04] **D. Ababsa**, "Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives." Batna, Université El-Hadj Lakhdar. Faculté des Sciences, 2010.
- [05] énergie solaire thermique –usages Résidentiels et collectif », [https://www.landes.fr >files>Guide.ST](https://www.landes.fr>files>Guide.ST) .
- [06] **D. Abbaz**, "Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD)," 2013.
- [07] **-J. C. Sabonnadière**. Nouvelles technologies de l'énergie, tome1 : Les énergies renouvelables. Lavoisier (2006
- [08] **RomaineGuillo**, écosource,Les Centrales Solaires à Miroirde Fresnel.
- [09] P Amet, Installer un chauffage et un chauffe-eau solaire. Paris: Eyrolles, 2010.
- [10] **A.Khedim**, Energie solaire: utilisation thermique et photovoltaïque. 2005, ANEP.
- [11] Institut National Polytechnique de Toulouse ENSAT – ENSEEIHT – ENSIACET Année 2007-2008Tszira 12
- [12] **S. Souad**. "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan". Thèse de magister (2010) 05-1
- [13] **S. Karroute**, "Etude théorique et numérique des systèmes couples, distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur," Mémoire magister, Univ. Mentouri Constantine, vol. 2010, 2009.
- [14] **C. Schittich, G. Staib, and D. Balkow**, "Construire en verre," 2001.
- [15] **A. M. Amine**, "Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité," mémoire magister en génie mécanique, vol. 2012, pp. 45–46, 2011.
- [16] **K. Haghverdi**, "CFD Investigation Inside Solar Flat Plate Collectors," 2021.
- [17] **S. Souad**, "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan," Univ. **Mentouri** Constantine, vol. 2, no. 51, p. 3, 2010.
- [18] **M. Sandali and A. N. Korti**, "Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux," Mémoire de magister-Université de Tlemcen, vol. 7, 2014.
- [19] **V. R. Ravipudi and H. S. Keesari**, "Introduction to Renewable Energy Systems," in Design Optimization of Renewable Energy Systems Using Advanced Optimization Algorithms, Springer, 2022, pp. 1–9.
- [20] **Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gomez, J.** (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 15, 1753–1766.
- [21] **Ssen, Z. (2004).**[12] Solar energy in progress and future research trends. Progress in Energy and Combustion Science, 30, 367–416.
- [22] **Selmi, M., Al-Khawaja, M. J., & Marafia, A. (2008)** Validation of CFD simulation for flat plate solar energy collector. Renewable Energy, 33, 383–387.
- [23] **Subiantoro, A., & Ooi, K. T. (2013).** Analytical models for the computation and optimization of single and double glazing flat plate solar collectors with normal and small air gap spacing. Applied Energy, 104, 392–399.
- [24] **Gunnawiek, L. H., Brundrett, E., & Hollands, G. T. (1996).** Flow distribution in unglazed transpired plate solar air heaters of large area. Solar Energy, 58, 227–237

- [25] **Gunnawiek, L. H., Hollands, K. G. T., & Brundrett, E. (2002).** Effect of wind on flow distribution in unglazed transpired plate collectors. *Solar Energy*, 72, 317–325.
- [26] **Gadi, M. B. (2000).** Design and simulation of a new energy-conscious system (CFD and solar simulation). *Applied Energy*, 65, 251–256.
- [27] **Gertzos, K. P., Pnevmatikakis, S. E., & Caouris, Y. G. (2008).** Experimental and numerical study of heat transfer phenomena inside a flat-plate integrated collector storage solar water heater (ICSSWH).
- [28] **Fan, J., Shah, L. J., & Furbo, S. (2007).** Flow distribution in a solar collector panel with horizontally inclined absorber strips. *Solar Energy*, 81, 1501–1511.
- [29] **Martinopoulos, G., Missirlis, D., Tsilingiridis, G., Yakinthos, K., & Kyriakis, N. (2010).** CFD modeling of a polymer solar collector. *Renewable Energy*, 35, 499–1508.
- [30] **Al-Ansary, H., & Zeitoun, O. (2011).** Numerical study of conduction and convection heat losses from a half-insulated air-filled annulus of the receiver of a parabolic trough collector. *Solar Energy*, 85, 3036–3045.
- [31] **Sultana, T., Morrison, G. L., & Rosengarten, G. (2012).** Thermal performance of a novel rooftop solar micro-concentrating collector. *Solar Energy*, 86, 1992–2000.
- [32] **Akhtar, N., & Mullick, S. C. (2012).** Effect of absorption of solar radiation in glass-cover(s) on heat transfer coefficients in upward heat flow in single and double glazed flat-plate collectors. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55, 125–132.
- [33] **Dovic, D., & Andrassy, M. (2012).** Numerically assisted analysis of flat and corrugated plate solar collectors thermal performances. *Solar Energy*, 86, 2416–2431.
- [34] **Y. Kanouté, I. Traoré, S. Sanogo, E. Aroudam, and A. Ba,** “OPTIMISATION DU RENDEMENT ET DE LA TEMPÉRATURE D’UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN À EAU PAR SIMULATION”.
- [35] **L. SOUIADI,** “LA CONVECTION MIXTE DANS UN CANAL HORIZONTAL MUNI DE BLOCS CHAUFFES.” Université de Ouargla-**Kasdi Merbah**, 2013.
- [36] **M. Cherifi** and **H. Ounouh,** “Étude du refroidissement par eau d’un panneau solaire photovoltaïque.” Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2018.
- [37] **U. Des, S. Et, D. E. L. A. Technologie, H. Boumediene, and F. D. E. Physique,** “Titre Etude des mécanismes de transfert de chaleur par convection-rayonnement dans un capteur solaire à air,” 2021.
- [38] **B. Khireddine** and **B. Cherif,** “THERMIQUES DU TUBE ABSORBEUR D ’ UN CAPTEUR SOLAIRE,” pp. 555–560, 2016.
- [39] **Ekramian, E., Etemad, S.Gh., Haghshenasfard, M. (2014).** "Numerical Analysis of Heat Transfer Performance of Flat Plate Solar Collectors." *Journal of Fluid Flow, Heat and Mass Transfer*, Volume 1
- [40] **Kanouté, Y., Traoré, I., Sanogo, S., Aroudam, E., Ba, A. (2020).** "Optimisation du rendement et de la température d’un capteur solaire plan à eau par simulation." *Journal de Physique de la SOAPHYS*, Vo

