



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

# MÉMOIRE DE MASTER

**Domaine : Sciences et Techniques**

**Filière : Génie Mécanique**

**Spécialité : Energétiques**

Réf. : ...

---

Présenté et soutenu par :

**LAMIA CHATTEH**

Le : mardi 8 septembre 2020

## Effet de l'angle d'inclinaison sur les performances thermiques d'un capteur solaire curviligne

---

### Jury :

Mr	BENCHABANE Adel	Pr	Université de Biskra	Président
Mr	ZELLOUF Miloud	Pr	Université de Biskra	Examineur
Mr	MOUMMI Abdelhafid	Pr	Université de Biskra	Rapporteur

# **Dédicace**

*Je dédie ce présent mémoire*

*A mes chers parents qui ont toujours veillés sur moi,*

*A mes frères et mes sœurs.*

*A tous mes collègues chacun avec son nom.*

*A toutes mes amies : khadidja, kheira, zahra,*

*Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour*

*L'achèvement de ce modeste travail.*

# **Remerciement**

*Je remercie ALLAH de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Je voudrais tout d'abord saisir cette occasion pour exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur le professeur **Abdelhafid Moumni** d'avoir accepté diriger mes travaux. Je le remercie infiniment d'être toujours présent par ses conseils, ses encouragements et de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa longue expérience et ses qualités humaines.*

*Je saisis cette occasion pour remercier tous les enseignants de l'université de Biskra et à tous ceux qui ont contribué à notre bonne formation.*

*Je remercie Mr le Professeur **Noureddine Moummiet Mr. Chawki Mahboub** pour leurs collaborations et pour ses aides pour réaliser ce travail.*

*J'adresse mes remerciements à Monsieur le Président de jury et Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.*

*Je remercie tous mes amis et toutes les personnes qui m'ont soutenues durant ces années de mon cursus universitaire, spécialement **Romaissa Hachana, Nour -Elislam Oubiri et Aymen Rafai.***

**Sommaire****Liste des figures****Liste des tableaux****Nomenclature****Chapitre I :  
Etude bibliographique**

I.1. Introduction .....	4
I.2. L'énergie Solaire thermique .....	4
I.3. Utilisation directe de l'énergie solaire .....	4
I. 4. Rayonnement solaire.....	5
I.4.1. La composante directe .....	5
I.4.2. La composante diffuse .....	6
I.4.3. Le rayonnement global .....	6
I.5. Capteur solaire .....	7
I.5.1. Définition .....	7
I.5.2. Principe de fonctionnement .....	7
I.6. Les différents types de capteurs solaires .....	8
I.6.1. Les capteurs plans vitrés .....	8
I.6.2. Les capteurs sous vide .....	8
I.6.3. Les capteurs sans vitrage .....	9
I.6.4. Les capteurs curvilignes.....	9
I.7. Revue bibliographiques .....	10
I.8. Conclusion.....	18

---

## **Chapitre II : Etude analytique et thermique**

II.1. Introduction .....	20
II.2. Principaux paramètres influant sur le rendement thermique d'un capteur solaire plan à air .....	20
II.2.1. Les paramètres externes .....	20
II.2.2. Les paramètres internes.....	20
II.3. Le bilan thermique d'un capteur en régime permanent .....	21
II.4. Bilan énergétique du capteur solaire.....	22
II.4.1. Bilan thermique au niveau de l'absorbeur.....	22
II.4.1.1. Entre l'absorbeur et le vitrage .....	22
II.4.1.2. Entre l'absorbeur et l'isolant .....	23
II.4.1.3. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur .....	24
II.4.2. Bilan thermique au niveau du vitrage.....	26
II.4.2.1. Entre le vitrage et l'absorbeur .....	26
II.4.2.2. Entre le vitrage et l'air ambiant.....	26
II.4.2.3. Entre le vitrage et le ciel.....	26
II.5. Eclairement solaire reçu par un capteur solaire plan .....	29
II.5.1. L'azimut ( $\alpha$ ) .....	29
II.5.2. La hauteur du soleil (h) .....	29
II.5.3. L'angle horaire ( $\omega$ ).....	29
II.5.4. La déclinaison ( $\delta$ ).....	30
II.5.5. Angle d'incidence ( $\theta$ ).....	30
II.5.6. Angle d'inclinaison ( $\beta$ ).....	31
II.6. Mesure et calcul des rayonnements solaire sur un capteur incliné.....	32
II.6.1. Rayonnement direct .....	32

II.6.2. Le rayonnement diffus.....	32
II.6.3. Le rayonnement réfléchi par le sol (L'albédo).....	33
II.7. Rayonnement Global sur une surface inclinée.....	33
II.8. Rendement thermique d'un capteur solaire plan incliné.....	34
Conclusion.....	35

### **Chapitre III :**

#### **Etude expérimentale; Description du banc d'essai**

III.1. Introduction.....	37
III.2. Dispositif expérimental.....	37
III.2.1. Description du banc d'essai .....	37
III.3. Paramètres mesurés et instrument de mesure .....	38
III.3.1 Mesures du débit et vitesse d'air .....	39
III.3.2. Mesure des températures .....	41
III.3.3. Mesure du rayonnement solaire global.....	41
III.3.5. Mesure de l'angle d'inclinaisons .....	42
III.3.6. Contrôle de la vitesse et du débit d'air en circulation .....	42
III.4. Conclusion.....	44

### **Chapitre IV :**

#### **Résultats et discussion**

IV.1. Introduction.....	46
IV.2. Variation de l'écart de température $\Delta T$ fonction du temps.....	46
IV.3. Calculs du rendement thermique.....	48
IV.4. Variation du rendement en fonction du temps.....	50
IV.5. Conclusion.....	51
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>53</b>
<b>Références .....</b>	<b>54</b>

# Liste des figures

---

## Chapitre I :

**Figure .1.1.** Organigramme d'utilisation de l'énergie solaire.

**Figure .1.2.** Utilisation du rayonnement solaire dans le capteur.

**Figure .1.3.** Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

**Figure .1.4.** Capteur plan vitré.

**Figure .1.5 .** Capteur sous vide.

**Figure .1.6.** Capteurs plans sans vitrage.

**Figure .1.7.** Variation de température de sortie en fonction du débit d'air Expérience faite le 12/04/2017 ciel clair.

**Figure .1.9.** Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané.

**Figure .1.10.** Influence de l'épaisseur de la vitre sur le rendement instantané.

**Figure .1.11.** La génération d'entropie totale sans dimension par rapport au nombre de Reynolds pour les canaux C1eC4.

**Figure .1.12.** Variations du facteur de friction ( $C_f$ ) par rapport à la direction circonférentielle ( $\Phi$ ) dans différents sections.

**Figure .1.13 .** Variations du facteur de friction moyen en coupe ( $C_f; m$ ) le long de l'axe direction ( $\theta$ ) du tuyau incurvé dans la zone d'entrée.

**Figure .1.14.** Structure de l'organigramme de l'interface.

**Figure .1.15.** Les capsules au-dessus de la plaque absorbante.

**Figure .1.16.** Les capsules au-dessous de la plaque absorbante.

**Figure .1.17.** Les capsules au-dessus de l'isolant.

**Figure .1.18.** Evolution du rendement thermique en fonction de l'intensité du rayonnement solaire pour un débit massique d'air  $m = 0,0253$  kg/s.

**Figure .1.19.** Schéma d'un capteur solaire à double vitrage.

**Figure .1.20.** Profile des températures dans le double vitrage du collecteur.

## CHAPITRE II :

**Figure. 2.1.** Bilan énergétique dans le capteur.

## Liste des figures

---

**Figure.2.2.** Principe d'orientation d'un capteur solaire plan ( $\alpha_c$  azimuth capteur,  $\alpha_s$  azimuth solaire,  $\theta$  angle d'incidence,  $h$  hauteur solaire,  $\beta$  angle d'inclinaison).

**Figure .2.3.** Orientation et inclinaison d'une surface réceptrice.

**Figure .2.4.** Rayonnement direct sur une surface inclinée.

**Figure. .2.5.** Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

### **CHAPITRE III :**

**Figure .3.1.** Photographie du dispositif expérimental « capteur solaire curviligne ».

**Figure .3.2 .**Thermo-anémomètre à hélice de type KIMO LV 110 pour mesurer le débit et la vitesse de l'air au niveau du conduit de récupération de la pompe à air.

**Figure .3.3.** Thermomètres digital JDP-200 avec panneau afficheur.

**Figure .3.4.** Pyranomètre manuel.

**Figure .3.5.** Ajustement de l'angle d'inclinaison du capteur solaire.

**Figure .3.6.** Extracteur d'air.

### **CHAPITRE IV :**

**Figure. 4.1.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 12/03/2020, Angle=15°.

**Figure. 4.2.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 11/03/2020, Angle = 25°.

**Figure. 4.3.** Variation  $\Delta T$  en fonction du temps, le 08/03/2020, Angle=35°.

**Figure. 4.4.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 05/03/2020, Angle = 45°.

**Figure. 4.5.** Variation de l'écart des températures  $\Delta T$  en fonction du temps pour différentes angles d'inclinaison 15° ; 25° ; 35° et 45° respectivement.

**Figure.4.6.** Variation de rendement en fonction du temps, le 12/03/2020, Angle=15°.

**Figure. 4.7.** Variation de rendement en fonction du temps, le 11/03/2020, Angle =25°.

**Figure.4.8.** Variation de rendement en fonction du temps, le 08/03/2020, Angle=35°.

**Figure. 4.9.** Variation de rendement en fonction du temps, le 05/03/2020, Angle =45°.

**Figure.4.10.** Variation de rendement en fonction du temps, pour différentes angles d'inclinaison 15° ; 25° ; 35° et 45° respectivement.

# Liste des tableaux

---

## **CHAPITRE II**

**Tableau .2.1.** Valeurs typiques de l'albédo selon la nature du sol.

## **CHAPITRE III**

**Tableau .3.1 :** Paramètres mesurés et instruments de mesure.

## Nomenclature

Symbole	Désignation	Unités
$Q$	flux de chaleur	[w]
Cs	constante solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
T	Température	[K°]
S	surface	[m <sup>2</sup> ]
h	coefficient d'échange	[W/m <sup>2</sup> .K <sup>1</sup> ]
Nu	nombre de Nusselt	[-]
e	Épaisseur	[m]
$\lambda$	conductibilité thermique du milieu	[W/m°K]
x, y	variables d'espace	[m]
Gr	nombre de Grashof	[-]
Pr	nombre de Prandtl	[degré]
$\beta$	Angle d'inclinaison du capteur	[degré]
$\sigma$	constante de STEFAN-BOLTZMANN	[-]
$\varepsilon$	Emissivité hémisphérique	[-]
$\Psi_1$	Echanges aux niveaux des surfaces horizontales	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\Psi_2$	Echanges aux niveaux des surfaces latérales	[W/m <sup>2</sup> .K]
d	diamètre	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
v	Vitesse	[m.s <sup>-1</sup> ]
$\nu$	Viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> .s <sup>-1</sup> ]
$G_z$	Nombre de Graetz	[-]
L	Longueur du capteur plan à air	[m]
$\alpha$	Coefficient d'absorption	[-]

## Nomenclature

$\tau$	Coefficient de transmission	[-]
G	Rayonnement global reçu sur le plan incliné du capteur solaire	[W.m <sup>-2</sup> ].
$\dot{m}$	Débit massique	[Kg.s <sup>-1</sup> ]
C	Chaleur spécifique du fluide	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
dt	variation de temps	[s]
dT	Variation de température du fluide	[K°]
$\alpha$	Angle azimut	[degré]
$\delta$	Angle de la déclinaison	[degré]
$\omega$	Angle horaire	[degré]
h	Hauteur du soleil	[degré]
$\varphi$	Angle de la latitude	[degré]
TSV	Temps solaire vrai	heure
H	Heure	[GMT]
Lg	Longitude du lieu	[degré]
Et	Equation de temps	[-]
N	Numéro du jour	[-]
$\theta$	Angle d'incidence	[degré]
I	Rayonnement solaire	[W.m <sup>-2</sup> ]
R	Facteur d'inclinaison du rayonnement	[-]
$\rho_g$	Réflexion du sol	[-]
$\eta$	Rendement énergétique	%
$Q_u$	Puissance thermique utile	[W.m <sup>-1</sup> ]
$C_p$	Chaleur spécifique	[J.Kg <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]
$Q_v$	Débit volumique	[m <sup>3</sup> /s]

## Nomenclature

---

Z	Altitude	km
P(z)	Pression atmosphérique de l'air à l'altitude du site	Pa
$\frac{p(z)}{p_0}$	Correction de l'altitude	[-]
$\rho$	Masse volumique	[Kg/m <sup>3</sup> ]
T <sub>m</sub>	Température de mesure	°C

<i>Indice</i>	<i>désignation</i>
1	absorbeur
2	vitre
3	fluide caloporteur
c	convection
air	air
r	rayonnement
cd	conduction
isol	isolant
abs	absorbeur
hyd	hydraulique
am	ambient
vent	vent
ciel	ciel
dir	direct
dif	diffus
réf	réfléchi
g	global
e	entrée
s	sortie

# **Introduction**

# **générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'énergie solaire peut être transformée en chaleur à basse température, par des capteurs plans et curvilignes utilisant conjointement le principe d'absorption du rayonnement solaire par une surface noire sélective, d'autre part sous l'effet de serre créée par un système de couvertures transparentes vitrage généralement permis de réduire les pertes thermiques par convection et rayonnement vers l'extérieur et de sauvegarder l'énergie thermique convertie servant habituellement à la production d'eau ou d'air chaud.

Dans notre cas, nous nous intéressons aux capteurs solaires curvilignes à air qui sont destinés à transformer l'énergie solaire radiante en énergie thermique, qui est extraite par un fluide caloporteur en écoulement dans le conduit utile du capteur, destiné pour des applications diverses où en emplois comme fluide caloporteur l'air ou l'eau.

L'objectif de ce présent travail est d'étudier l'effet de l'angle d'inclinaison sur les performances thermiques d'un capteur solaire à air dont le plan récepteur est de forme curviligne.

Pour atteindre cet objectif, on a structuré le manuscrit en quatre chapitres essentiels comme suit :

Le premier chapitre, consiste à l'étude des capteurs solaires plans, avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques, les principaux types et leurs principes de fonctionnement, ainsi que quelques travaux réalisés qui portent sur l'amélioration et l'optimisation des capteurs solaires plans à air en général.

Le deuxième chapitre est consacré aux bilans thermiques au niveau des différents éléments constituant, principalement ; l'absorbeur, le vitrage, l'isolant et le fluide caloporteur, différentes équations concernant le fonctionnement du système en régimes permanent ont été présentés.

Le troisième chapitre est dédié à l'aspect pratique qui a fait objet de notre thème, consacré à la description du banc d'essai expérimental utilisé, ainsi que les différents instruments et appareils de mesures employés dans cette étude théorique et expérimentale.

Le dernier chapitre est consacré à la présentation des résultats et à l'interprétation et discussions des courbes obtenues, qui montrent l'évolution des paramètres de performances, tels que le rendement et la différence des températures en fonction du temps, entre l'entrée et la sortie du capteur pour différentes inclinaisons par rapport à l'horizontale.

# Chapitre

# I

# Chapitre I : Etude bibliographique

---

## **I.1. Introduction :**

L'exploitation de l'énergie solaire par des capteurs solaires est subdivisée en deux grandes technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est la conversion de l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité, dite l'énergie photovoltaïque.

Dans ce chapitre, on s'intéresse à la conversion thermique de l'énergie solaire ainsi que quelques notions sur le rayonnement reçu au niveau de la terre. D'autre part on essayera de définir les capteurs solaires plans, les principaux types et leurs principes de fonctionnement, à la fin de chapitre citera quelques travaux réalisés qui portent sur l'amélioration et l'optimisation des capteurs solaires plans à air.

## **I.2. L'énergie Solaire thermique :**

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur convertie à partir du rayonnement solaire. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique, dit aussi collecteur ou isolateur héliothermique ou panneaux solaires thermiques. C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide ou gaz (eau ou air). Le capteur thermique est désigné comme un capteur photo-thermique, où le rayonnement solaire convertis est utilisé suivant différentes façons [1]:

- A usage direct où la conversion est à basse température : chauffe-eau, chauffage solaire, cuisson solaire, séchage solaire.
- A usage indirect, la chaleur produite est utilisé pour un autre usage : climatisation solaire, centrales solaires thermodynamiques.
- A usage direct où la conversion est à haute température : concentration du rayonnement solaire réalisée par des capteurs concentrateurs, fours solaires.

## **I.3. Utilisation directe de l'énergie solaire :**

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie des animaux (y compris l'être humain) et d'animer les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Cette énergie solaire peut être également utilisée directement pour produire de la chaleur telle que le chauffage et la climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude sanitaire et de la vapeur, production d'électricité par le

# Chapitre I : Etude bibliographique

biais de cycles thermodynamiques. Pour toutes les applications directes de l'énergie solaire, le gisement solaire local doit être caractérisé soigneusement puisqu'il présente des variations géographiques et saisonnières importantes [1].

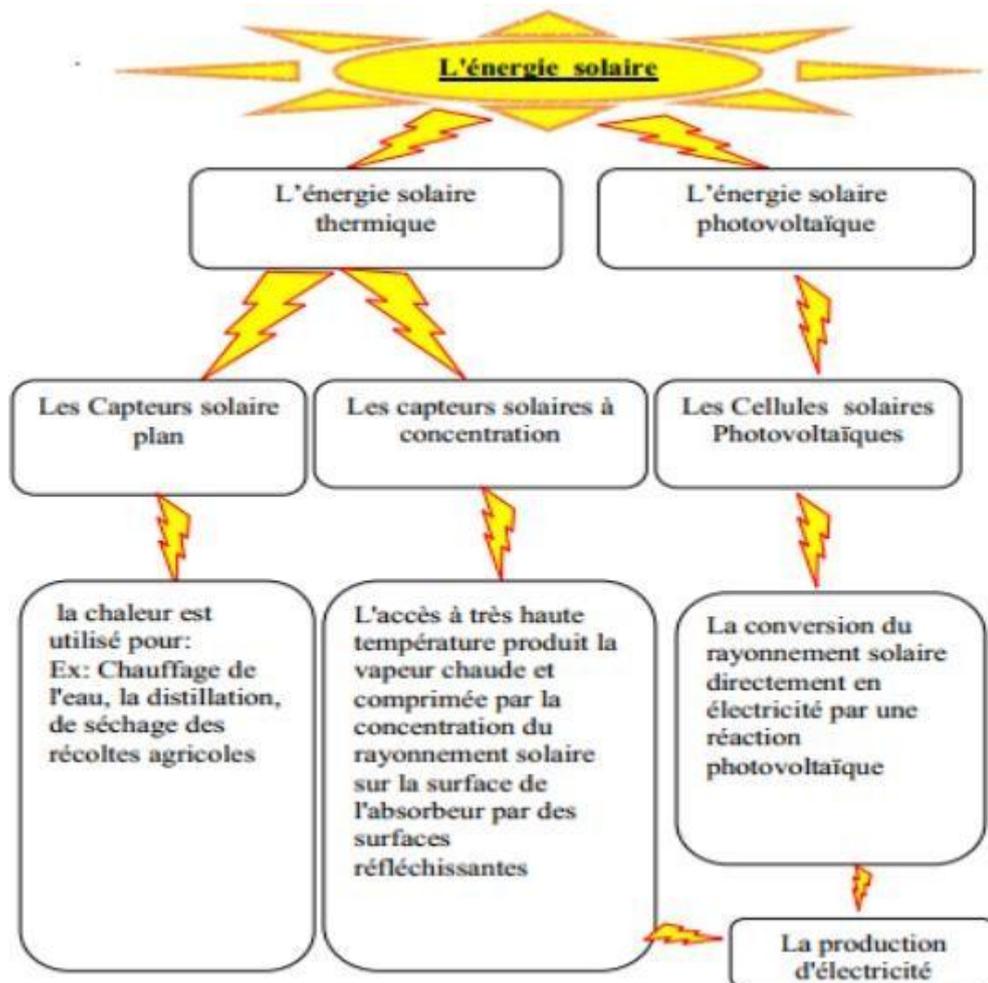


Figure.1.1. Organigramme d'utilisation de l'énergie solaire. [2]

## I.4. Rayonnement solaire:

L'énergie solaire reçue au niveau du sol représentée par la constante solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère ( $C_s \approx 1367 \text{ W/m}^2$ ) subit une dégradation à sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie arrive au sol sous différentes formes. Ainsi, on définit [3] :

### I.4.1. La composante directe :

# Chapitre I : Etude bibliographique

Le rayonnement direct ou la composante directe du rayonnement solaire est celui incident sur un plan quelconque en provenant d'un angle solide autour du disque solaire. Il parvient en ligne droit et par temps clair.

## I.4.2. La composante diffuse :

C'est la composante du rayonnement solaire incidente sur un plan récepteur après avoir été diffusée par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol et subissant le phénomène de multi-réflexions. Elle parvient ainsi de toute la voute céleste.

## I.4.3. Le rayonnement global :

Le rayonnement global correspond à la somme des deux composantes du rayonnement solaire définies précédemment à savoir la composante directe et diffuse. [2]

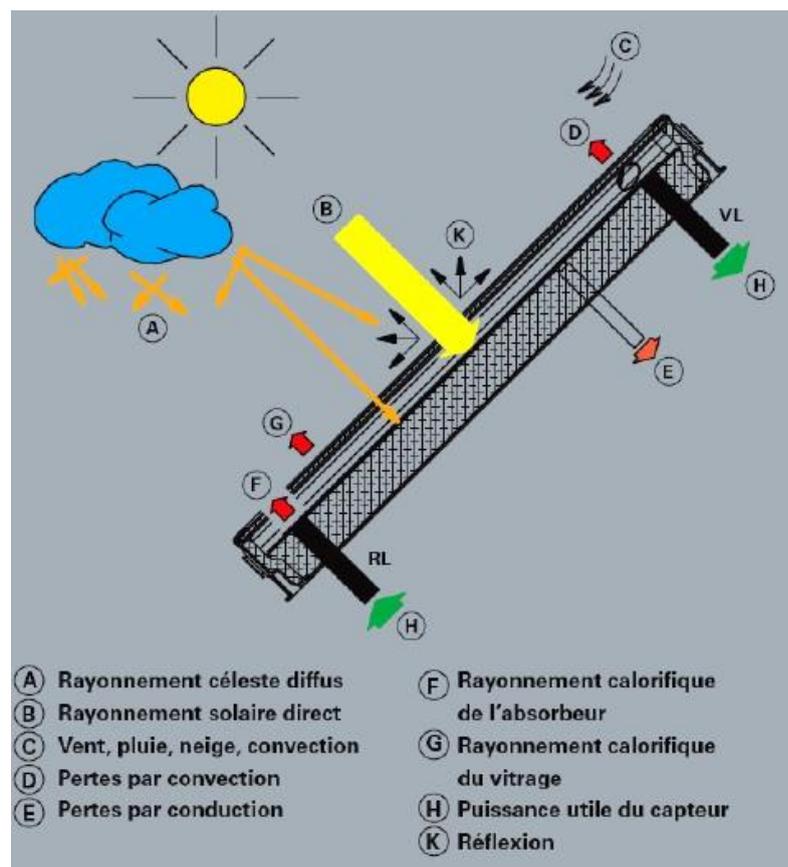


Figure .1.2. Utilisation du rayonnement solaire dans le capteur. [4]

## I.5. Capteur solaire :

### I.5.1. Définition :

Un capteur solaire est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide caloporteur liquide ou gazeux. Ce système de captation est basé sur l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3  $\mu\text{m}$ ), il traverse la vitre ensuite se trouve piégé à l'intérieur où il est capté par une surface absorbante généralement de couleur sombre ou noir. [5]

### I.5.2. Principe de fonctionnement :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,). Le schéma de Principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure (I.3). La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température durant la traversée du capteur depuis l'entrée jusqu'à la sortie. Les capteurs solaires plans sont constitués essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre

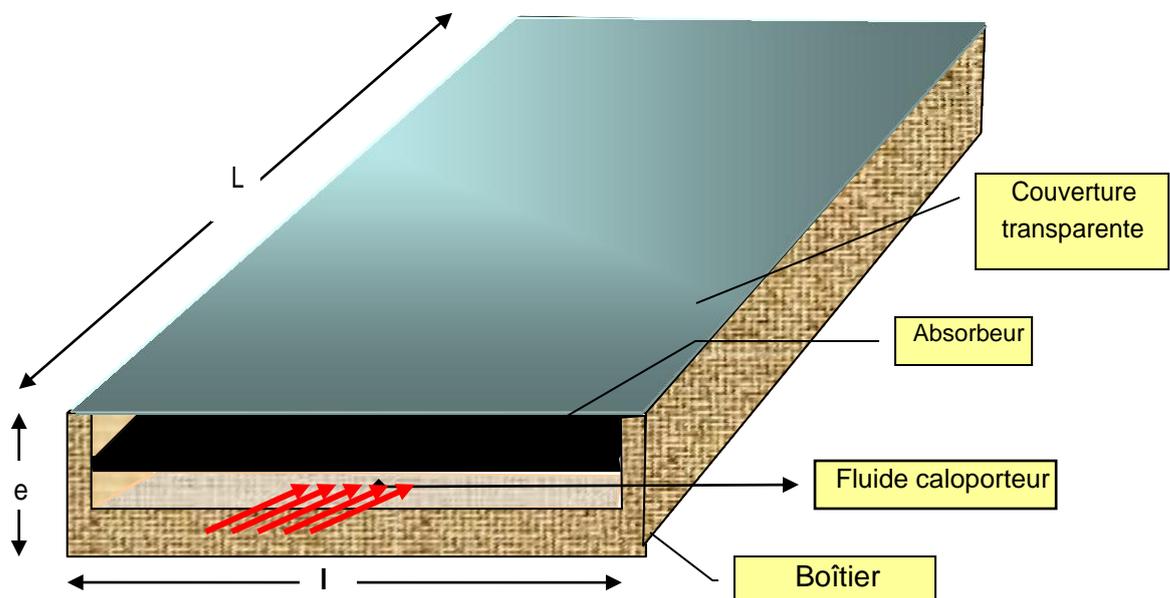


Figure .1.3. Schéma de principe d'un capteur solaire plan. [6]

## I.6. Les différents types de capteurs solaires :

### I.6.1. Les capteurs plans vitrés :

Les capteurs solaires plans vitrés sont les plus répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, le chauffage des locaux et le stockage de la chaleur.



Figure .1.4. Capteur plan vitré. [3]

### I.6.2. Les capteurs sous vide :

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



Figure .1.5: capteur sous vide. [3]

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, cette dernière

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement solaire à se dissipé sous forme de grande longueur d'onde. [3]

### I.6.3. Les capteurs sans vitrage :

Egalement appelé « capteur moquette », il est constitué d'un réseau de tubes noirs, généralement en matière plastique souple de type élastomère, il est utilisé pour des eaux ne nécessitant pas une température supérieure à 30 °C (l'eau de piscine par exemple). ce type de capteur est facile à intégrer, on peut le posé sur le sol (à proximité de la piscine) ou sur la toiture.

Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant. [7]



**Figure .1.6.** Capteurs plans sans vitrage. [3]

### I.6.4. Les capteurs curvilignes :

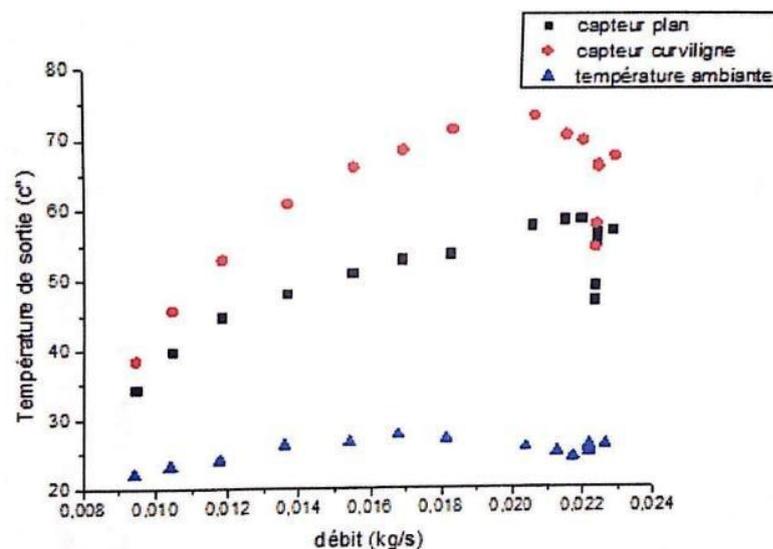
Les capteurs solaires curvilignes existent sous forme de capteurs à air. Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée ou les températures souhaitées se situent entre 30° C et 70°C. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage. Pour le chauffage des locaux aussi que pour l'air de ventilation. [8]

## I.7.Revue bibliographiques :

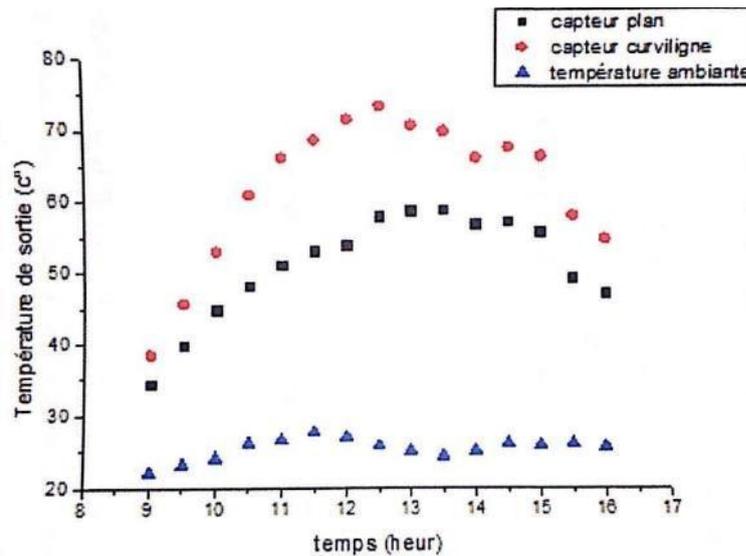
**H. Benfifi [8]** a présenté une étude expérimentale de deux types de capteurs solaires plan et curviligne. Il a fait son expérience dans le hall technologique de l'université de Biskra, où il a essayé de mesurer les principaux paramètres essentiels avec débit d'air variable et débit constant. La variation du débit d'air est assurée par un potentiomètre électrique qui permet d'ajuster le nombre de tour de la pompe à air utilisée pour aspirer le fluide caloporteur.

A partir des relevées expérimentales il a pu déterminer l'efficacité thermique respectivement en fonction du temps et du débit massique de l'air véhiculé ainsi que la variation des températures de sorties des deux types des capteurs étudiés en fonction du temps et en fonction du débit. Le but de son travail était de réaliser une étude comparative des performances thermiques à partir des expériences.

Il s'avère à travers les résultats expérimentaux de son analyse que des courbes qui traduisent la variation des performances des deux capteurs solaires en fonction de divers paramètres climatiques et conceptuels montrent que le capteur solaire curviligne est le plus performant.



**Figure .1.7.** Variation de température de sortie en fonction du débit d'air Expérience faite le 12/04/2017 ciel clair. [8]



**Figure .1.8.** Variation de température de sortie en fonction du temps.

Expérience faite le 12/04/2017 ciel clair. [8]

**A. BRAHIMI [3]** s'est intéressé à l'étude des performances d'un capteur solaire plan à eau dans des conditions de fonctionnement stables. Il a commencé par une présentation détaillée des données astronomiques indispensables pour toutes les études des systèmes solaires telle que les chauffe-eau solaires.

Par la suite, il s'est concentré sur les différents échanges thermiques ayant lieu à l'intérieur du capteur afin de mettre en évidence les équations qui régissent le comportement thermique à l'état stationnaire, à partir d'un programme de calcul effectué sur Matlab, l'auteur a entamé une étude comparative des trois modèles du rayonnement solaire, à savoir celui de Capderou, Perrin de Brichambaut et de Bird et Hulstrom. Il a ensuite développé un modèle pour simuler le comportement thermique d'un capteur et pour estimer ses performances thermiques, ce modèle a été validé par des travaux expérimentaux réalisés au CDER centre de développement des énergies renouvelables (CDER) à Bouzareah en Algérie.

En conclusion, les résultats obtenus montrent l'influence des paramètres internes sur le rendement instantané du capteur étudié, en l'occurrence les propriétés optiques et thermo-physiques des différents éléments constituant le capteur. Il a noté ainsi que :

- La vitre doit avoir un facteur de transmission élevé du rayonnement visible ainsi qu'une faible épaisseur afin de diminuer son inertie thermique.
- L'emploi d'une plaque absorbante avec un facteur d'absorption et une conductivité thermique élevés améliore le rendement du capteur.

## Chapitre I : Etude bibliographique

- Le fluide de travail doit avoir d'une part, une densité et une viscosité dynamique faibles et d'une autre part, une conductivité thermique élevée.
- L'isolant doit posséder une conductivité thermique très faible ainsi qu'une grande épaisseur afin de réduire les pertes thermiques du capteur.

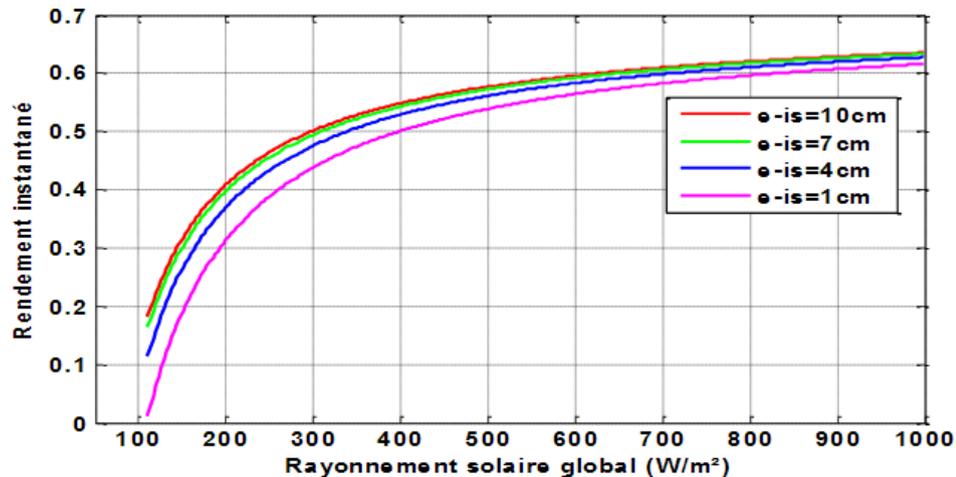


Figure .1.9. Influence de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané. [4]

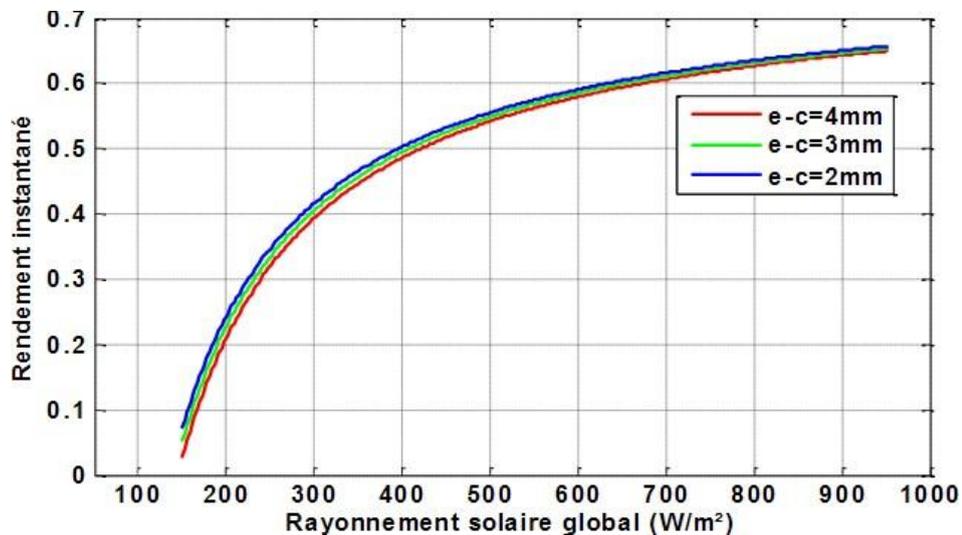


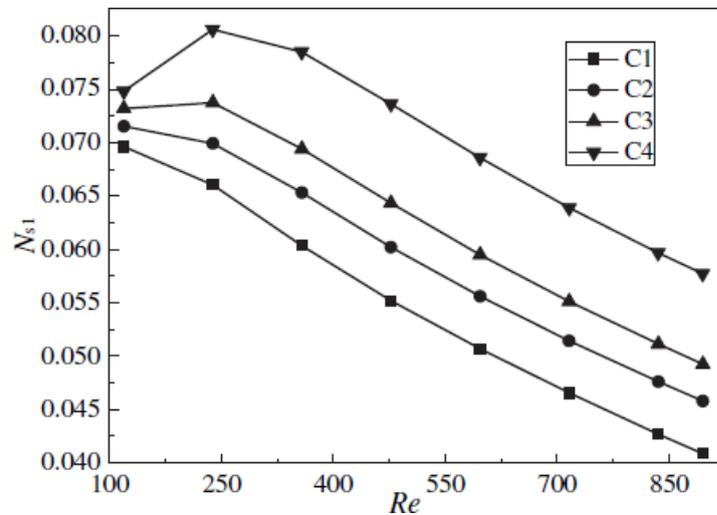
Figure .1.10. Influence de l'épaisseur de la vitre sur le rendement instantané. [4]

Jiangfeng Guo et al [9] ont étudié et analyse les conduites rectangulaires incurvés tout en constatant que les performances thermodynamiques de ces conduites rectangulaires incurvés en régime d'écoulement laminaire sont étudiées numériquement en termes de génération d'entropie, puisqu'ils se sont appuyés sur les équations classiques de Navier et de Stokes, ils ont choisi l'eau comme fluide de travail.

Ils ont conclu que les paramètres de conception sont d'une grande importance et ont des effets sensibles sur les performances de transfert de chaleur dans le conduit dynamique,

## Chapitre I : Etude bibliographique

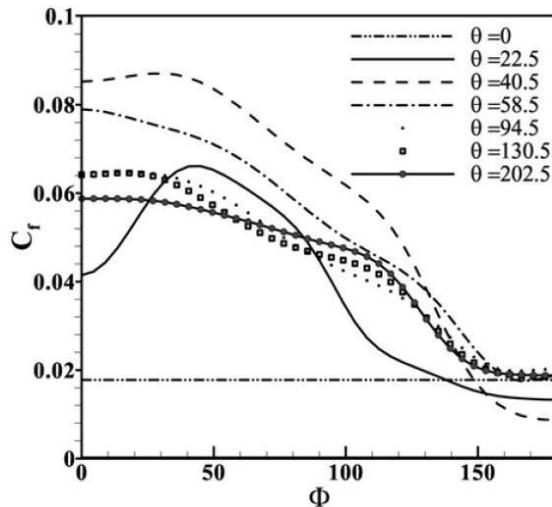
d'autre part, pour les canaux de même section, le nombre de Nusselt augmente considérablement au détriment de la légère augmentation de la chute de pression, car le nombre de Reynolds augmente et diminue lorsque le rapport de courbure augmente au même nombre que Reynolds Figure (1.11).



**Figure .1.11.** La génération d'entropie totale sans dimension par rapport au nombre de Reynolds pour les canaux C1eC4. [9]

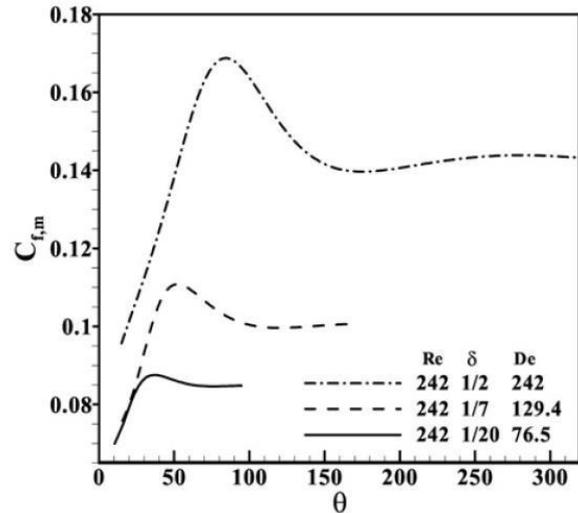
**Ishigaki. Nobari et al [10]** ont entamé une étude numérique sur le développement de l'écoulement et de transfert de chaleur dans un conduit incurvé, leur travail vise à étudier les écoulements incompressibles en résolvant les équations de Navier-Stokes et d'énergie en utilisant la méthode de projection basée sur la discrétisation par la méthode des différences finies du second ordre, les résultats obtenus montrent que :

- L'intensité du flux secondaire augmente près de l'entrée puis diminue, en particulier dans le cas des nombres élevés de Reynolds dus à la formation des tourbillons, ce qui engendre la diminution du facteur de friction à partir d'une valeur maximale dans la région d'entrée jusqu'à l'approche de la région pleinement développée. Par conséquent, quels que soient les profils d'entrée, le facteur de frottement maximal et le taux de transfert de chaleur maximal est situé à l'entrée du conduit.
- Les résultats prédisent des valeurs plus grandes pour le facteur de friction moyen normalisé dans la région complètement développée par rapport aux valeurs prédites par des courbes semi-empiriques obtenues pour des tuyaux en forme de courbes libres (Ishigaki, 1994, 1996).



**Figure .1.12:** Variations du facteur de friction ( $C_f$ ) par rapport à la direction circonférentielle ( $\Phi$ ) dans différentes sections.

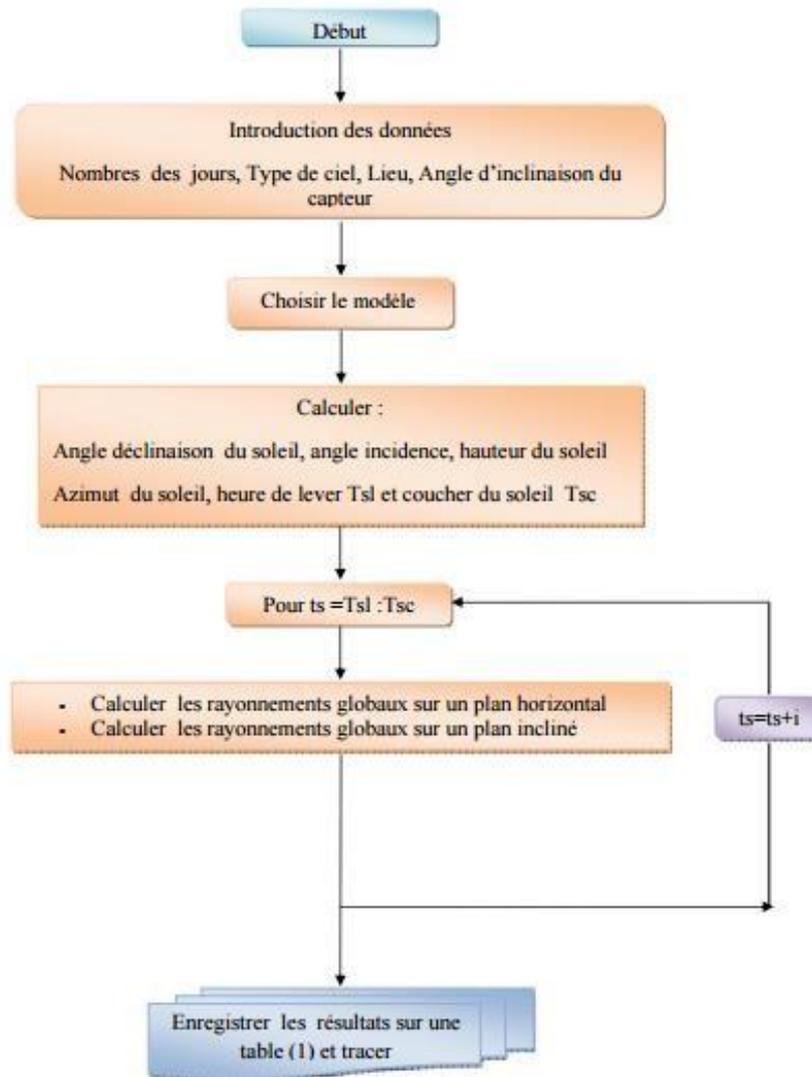
[10]



**Figure .1.13 :** Variations du facteur de friction moyen en coupe ( $C_{f,m}$ ) le long de l'axe direction ( $\theta$ ) du tuyau incurvé dans la zone d'entrée. [10]

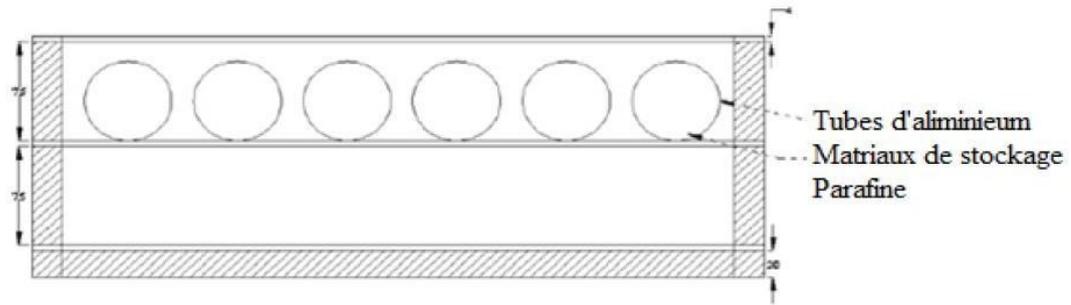
**A.T. Ferdjani [11]** a développé un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans à air. Il s'agit d'une application exécutable constitué d'une base de données lui permettant d'estimer le rapport coût et efficacité des collecteurs de l'énergie solaire à l'aide du langage de programmation BOURLAND DELPHI 7 et d'un développement rapide d'applications basé sur Pascal.

Le travail est basé sur un algorithme qui en premier lieu à partir deux modèles semi-empiriques du rayonnement solaire de PERRIN DE BRICHAMBAUT et LIU JORDAN, évalue en second lieu les performances thermiques des capteurs solaires plans à air en adoptant l'approche globale de Hottel. D'autre part, l'auteur a également choisi deux types de capteurs, à surface lisse sans ailettes et à surface rugueuse avec les ailettes. L'algorithme de calcul travail en mode de convection forcée dans la veine de l'air mobile exprimée en fonction du nombre NUSSELT, qui après un calcul itérative estime les températures des divers composants constituant le collecteur solaire plan de manière interactive. L'organigramme principal qui décrit toutes les étapes de calcul est présenté d'après la Figure (1.14) :

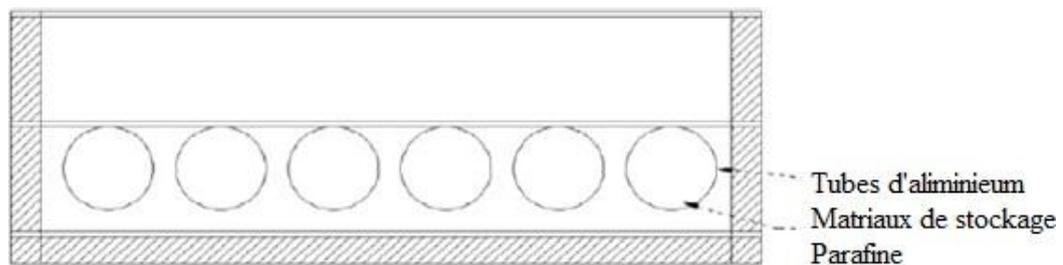


**Figure .1.14.** Structure de l'organigramme de l'interface. [11]

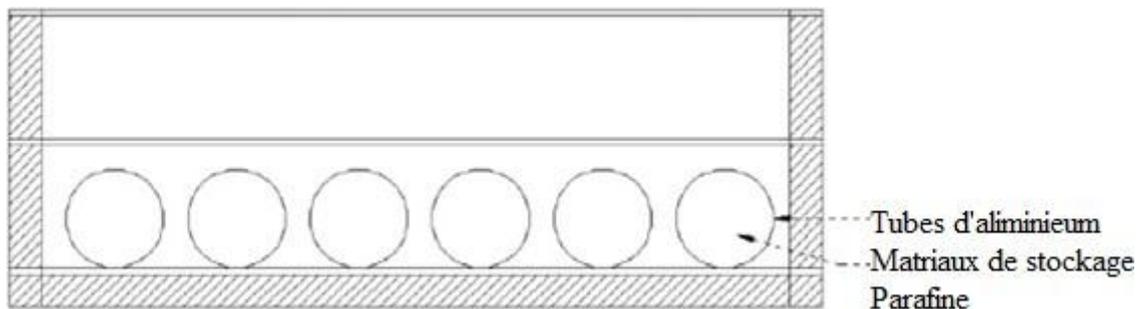
**S.S. Krishnananth, et al [12]** ont fait une étude expérimentale sur un capteur solaire à air à double passes avec intégration d'un système de stockage d'énergie thermique, ils ont utilisé le cire de paraffine comme un milieu de stockage thermique, le capteur solaire est intégré avec un système de stockage thermique a une grande efficacité que le capteur solaire sans système de stockage thermique. Ensuite, ils ont fait une comparaison entre trois positions d'emplacement du matériel du stockage thermique, pour conclure que la présence du milieu de stockage thermique dans la plaque absorbante est la meilleure configuration.



**Figure .1.15.** Les capsules au-dessus de la plaque absorbante. [12]



**Figure .1.16.** Les capsules au-dessous de la plaque absorbante. [12]



**Figure .1.17.** Les capsules au-dessus de l'isolant. [12]

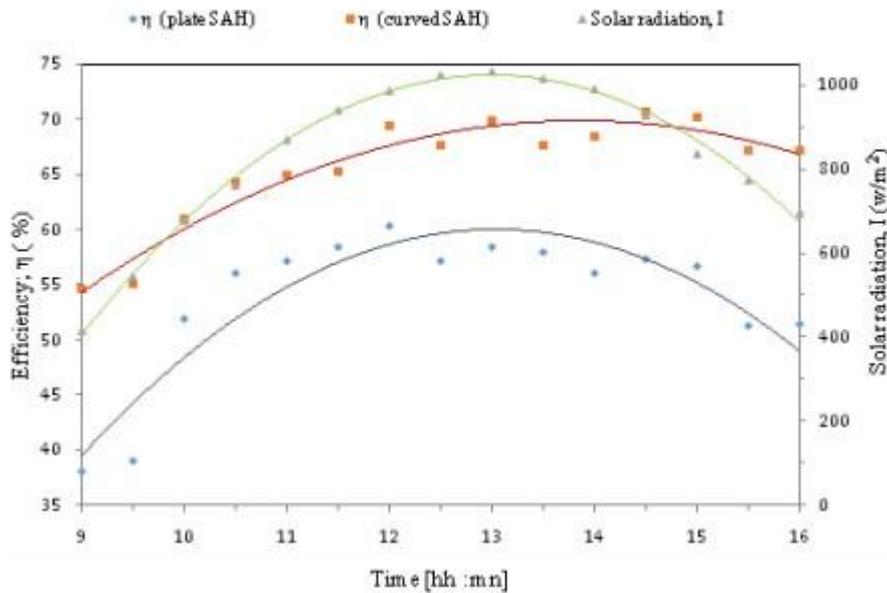
A partir de résultats expérimentaux obtenus, ils ont trouvé que le capteur solaire avec la cire de paraffine dégage une température d'air très élevée dans toute la journée, et que l'efficacité est plus élevée pendant les heures du soir. Le capteur solaire à doubles passes avec des capsules placés au-dessus de la plaque absorbant est le plus efficace.

**F .Guellai et al [13]** ont étudié et analysé les performances thermo-hydrauliques de deux capteurs solaires à air plan et curviligne ; Une étude comparative a été entamé, où ils ont mené les expériences en plein air près du Hall technologique du département de génie mécanique de l'Université de Biskra.

Les auteurs se sont intéressés à l'analyse des performances thermo-hydrauliques de chaque type de collecteur solaire. Afin d'entamer une étude objective et valide, les capteurs

## Chapitre I : Etude bibliographique

étudiés sont identiques géométriquement et comportant les mêmes composants. Les résultats expérimentaux ont montrés que la forme curviligne du plan récepteur donne de bonnes performances thermiques et permet d'obtenir une répartition uniforme des températures dans la lame d'air dynamique.



**Figure 1.18.** Evolution du rendement thermique en fonction de l'intensité du rayonnement solaire pour un débit massique d'air  $m = 0,0253$  kg/s. [13]

**T. F. Abraham et al [14]** ont mené une étude numérique sur l'effet de serre formé par des couvertures transparentes en double vitrage d'un capteur solaire plan à air Figure (1.20). les vitrages sont de dimensions  $01m \times 0,45m$  respectivement, par contre l'absorbeur utilisé est similaire à un corps gris dont les coefficients d'absorption et de réémission sont égaux ( $\epsilon_{ab} = \alpha_{ab} = 0,95$ ) de dimension  $01m \times 0,405m$ . L'absorbeur et les vitrages sont assemblés dans un Boîtier en bois.

La simulation numérique est basée sur l'analyse des bilans énergétiques pour chaque composant du collecteur solaire, notamment les vitrages, l'absorbeur, le fluide caloporteur, et les éléments formant l'isolation thermique.

Ils ont développé un modèle mathématique qui permis de faire apparaître le terme de l'absorption infrarouge nette ainsi que les pertes optiques du rayonnement incident par absorption et réfraction multiples au niveau des parois du double vitrage. L'analyse des différents échanges du rayonnement solaire est effectuée par rapport à un ensoleillement naturel [11]. Finalement ils sont arrivés aux conclusions suivantes :

## Chapitre I : Etude bibliographique

- Lorsque le collecteur est orienté au sud et incliné avec un angle de  $30^\circ$  par rapport à l'horizontal, le midi solaire est atteint à 12H30 et à cette heure; le maximum de la température de l'absorbeur est de  $88^\circ\text{C}$  pour un ensoleillement maximum de  $1032,59\text{ W/m}^2$ .
- L'analyse du profil de rayonnement infrarouge révèle que le rayonnement IR net absorbé est de  $678\text{ W/m}^2$  avec des pertes de rayonnement IR vers l'absorbeur estimées de  $250\text{ W/m}^2$ .

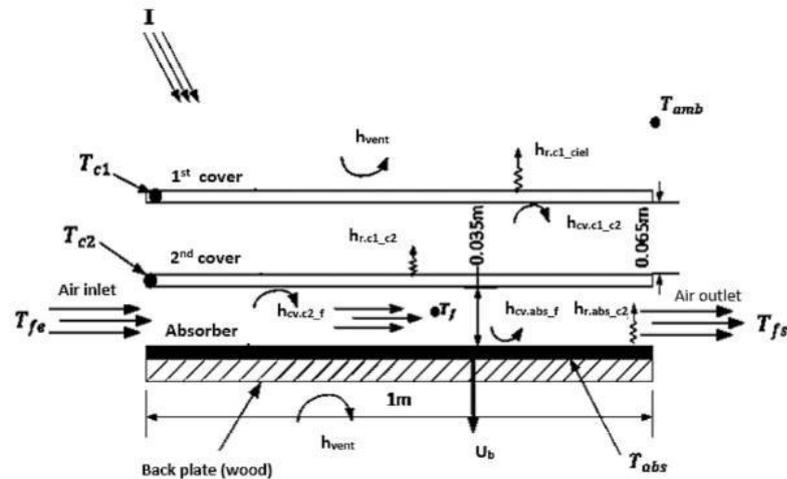


Figure .1.19. Schéma d'un capteur solaire à double vitrage. [14]

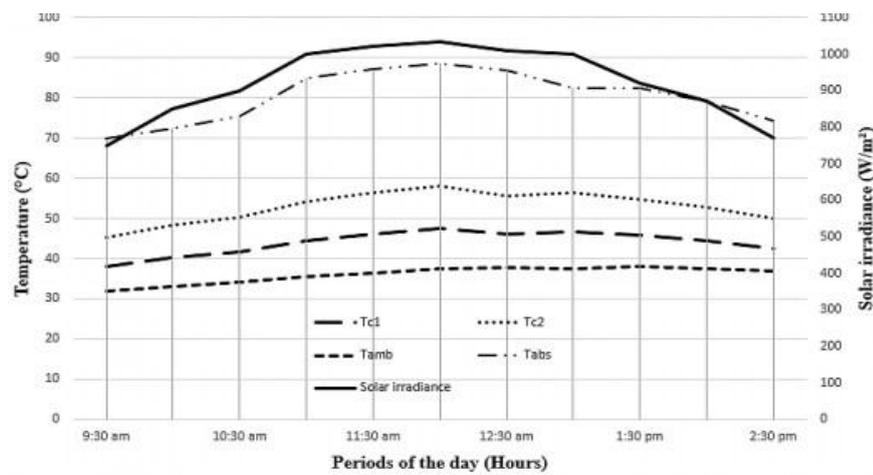


Figure .1.20. Profil des températures dans le double vitrage du collecteur. [14]

### I.8.Conclusion:

L'énergie solaire est respectueuse de l'environnement, gratuit et rentable, à condition que nous disposions d'une installation solaire performante adaptée aux conditions de fonctionnement du site. Pour cela, on a présenté dans ce chapitre une brève description et quantification du rayonnement solaire recueillie par un collecteur solaire plan incliné.

## Chapitre I : Etude bibliographique

---

A travers cette étude bibliographique consacrée aux capteurs solaires, on a pu constater que leurs performances dépendent essentiellement des paramètres thermo-physiques, optiques et géométriques comme géométrie plane curviligne concentrique ou parabolique et aussi la nature des matériaux des différents composants surtout le corps noir responsable des échanges de chaleur. D'autre part, une très brève synthèse bibliographique a été exposée sur quelques travaux réalisés, particulièrement au laboratoire de génie mécanique de l'université de Biskra.

# Chapitre

II

### II.1. Introduction :

Le capteur solaire est un échangeur de chaleur qui fonctionne entre une source radiante le soleil et un fluide. Son rôle est la conversion de l'énergie apportée par le rayonnement solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

Dans cette partie, une étude théorique du capteur curviligne a été avancée en détaillant ses différents composants, son fonctionnement et on établit les bilans thermiques au niveau de chaque partie (l'absorbeur, le vitrage, l'isolant et le fluide caloporteur) en régime permanent et d'évaluer les coefficients des échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur.

### II.1.Principaux paramètres influant sur le rendement thermique d'un capteur solaire plan à air :

Durant le fonctionnement d'un capteur solaire plan à air, son rendement thermique est influencé par différents paramètres, on distingue en particulier [15] :

#### II.2.1. Les paramètres externes :

1. Les paramètres d'ensoleillement
  - Eclairement énergétique dû au rayonnement global.
  - Position du soleil et durée d'insolation.
  - L'heure de la journée et la saison.
  - La position géographique du lieu considéré désignée par la latitude
2. La température ambiante.
3. la vitesse du vent.

#### II.2.2. Les paramètres internes [16] :

4. Les paramètres de position
  - Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
  - Capteur fixe ou suiveur du soleil.
5. Les paramètres de conception : parmi lesquels on cite les plus importants :  
L'absorbeur
  - Les propriétés thermo-physiques et optiques.

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

---

- Dimensions de la plaque absorbante et espacement entre la vitre et le plan découlement inférieur.
- Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
- Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- Géométrie du conduit utile.
- Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.
- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

### 2.2. Couvertures transparentes

- Propriétés optiques et thermo-physiques.
- Epaisseur des couvertures transparentes.
- Le nombre des vitrages et la forme.

### 2.3. L'isolant

- Propriétés thermo-physiques.
- Epaisseur.

### 2.4. Fluide caloporteur

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent).
- Débit massique.
- Température d'entrée.
- Propriétés thermo-physiques.

## **II.3. Le bilan thermique d'un capteur en régime permanent [17]:**

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Le régime de l'écoulement est quasi stationnaire.
- La température du ciel est uniforme.
- Les propriétés thermo-physiques des matériaux constituant du capteur sont supposées constantes par rapport à la température.
- La température du vitrage est uniforme.
- La vitesse d'écoulement et la distribution des températures dans le différent élément sont unidimensionnelles.
- La construction du capteur est uniforme.

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

- L'effet de la température suivant l'axe des z est négligeable car la plaque est supposée très mince.
- Le plan capteur est parfaitement orienté vers le sud où les effets d'ombrage sont négligeables.
- La distribution de la température de l'absorbeur est uniforme.
- La température du sol est supposée égale à la température ambiante.

### II.4. Bilan énergétique du capteur solaire:

Pour l'établissement des bilans thermiques du capteur solaire en régime permanent, il faut analyser les échanges thermiques qui ont lieu dans les différents éléments du capteur solaire figure (2.1) suivante :

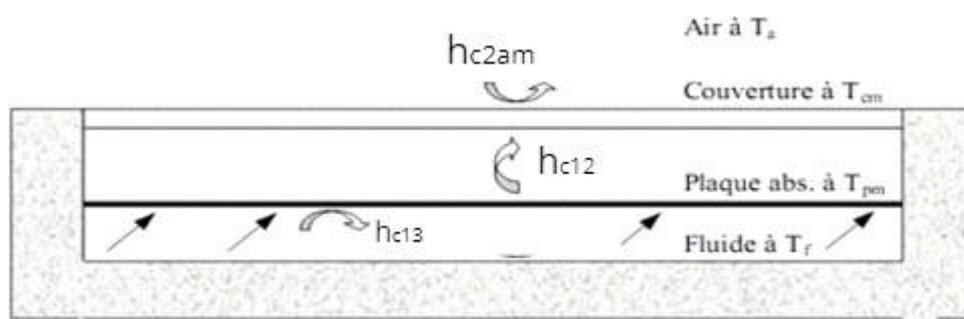


Figure .2.1. Bilan énergétique dans le capteur. [18]

#### II.4. 1. Bilan thermique au niveau de l'absorbeur :

##### II.4. 1.1. Entre l'absorbeur et le vitrage :

Le bilan thermique décrivant les échanges de chaleur par convection et par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage sont donnés par les équations suivantes :

- Bilan thermique par convection :

$$Q_{c12} = S_1 \cdot h_{c12} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-1})$$

Où,

$T_1$  : Température de l'absorbeur [°K]

$T_2$  : Température de la vitre [°K]

$S_1$  : Surface active de l'absorbeur [ $m^2$ ]

$h_{c12}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre absorbeur et le vitrage [ $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ ]

Avec ;

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

---

$$h_{c12} = Nu \frac{\lambda_{air}}{e} \quad (\text{II-2})$$

Dont le nombre de Nusselt est exprimé par la relation suivante [19] :

$$Nu = 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{1708}{G_r P_r \cos \beta} \right) \left( \frac{|x| + x}{2} \right) \left( \frac{|y| + y}{2} \right) \quad (\text{II-3})$$

Avec  $x$  et  $y$  sont donnés par [19]:

$$y = \frac{(G_r p_r \cos \beta)^{\frac{1}{3}}}{5830} \quad (\text{II-4})$$

$$x = 1 - \frac{1708 \sin(1.8\beta)}{G_r p_r \cos \beta} \quad (\text{II-5})$$

Avec,

$P_r$  : Nombre de Prandtl.

$G_r$  : Nombre de Grashof.

$e$  : Épaisseur de la lame d'air [m].

$\lambda_{air}$  : Conductivité thermique de l'air [W/m°K].

$\beta$  : Inclinaison du capteur (en degré).

- Bilan thermique par rayonnement :

$$Q_{r12} = s_1 \cdot h_{r12} (T_1 - T_2) \quad (\text{II-6})$$

Où le coefficient d'échange par rayonnement est donné par [20] :

$$h_{r12} = \frac{\sigma (T_1 + T_2) (T_1^2 + T_2^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (\text{II-7})$$

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

$\sigma$  : Est la constante de Stéphane Boltzman.

### II.4.1.2. Entre l'absorbeur et l'isolant :

Le flux de chaleur échangé par conduction est décrit par l'équation [19]:

$$Q_{cd;isol} = \psi_1 (T_1 - T_{isol}) + \psi_2 (T_1 - T_{isol}) \quad (\text{II-8})$$

$$\psi_1 = \frac{1}{\frac{e_1}{s_2^\alpha \lambda_{isol}} + \frac{e_{isol}}{s_2^\alpha \lambda_{abs}}} \quad \text{Échanges aux niveaux des surfaces horizontales.} \quad (\text{II-9})$$

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

---

$$\psi_2 = \frac{1}{\frac{e_1}{s_2^1 \lambda_{isolat}} + \frac{e_{isol}}{s_2^1 \lambda_{abs}}} \quad \text{Échanges aux niveaux des surfaces latérales.} \quad (\text{II-10})$$

Avec ;

$T_{isol}$  : Température de l'isolant, en considérant que ( $T_{isol} = T_a$ ) [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$S_2^{\alpha}$  : Surface de contact absorbeur – isolant (face avant) [ $\text{m}^2$ ].

$S_2^1$  : Surface de contact absorbeur – isolant (face latérale) [ $\text{m}^2$ ].

$\lambda_{isol}$  : Conductivité de l'isolant coté latérale [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ ].

$\lambda_{abs}$  : Conductivité de l'absorbeur [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ ].

$\lambda_{isol}$  : Conductivité de l'isolant [ $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$ ].

$e_1$  : Épaisseur de l'absorbeur [ $\text{m}$ ].

$e_{isol}$  : Épaisseur de l'isolant [ $\text{m}$ ].

$e_{isolat}$  : Épaisseur de l'isolant coté latérale [ $\text{m}$ ].

### II.4.1.3. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur :

Le flux échangé par convection entre le fluide caloporteur et l'absorbeur est donné par [19] :

$$Q_{c13} = S_{13} h_{c13} (T_1 - T_3) \quad (\text{II-11})$$

Avec ;

$T_3$  : Température du fluide caloporteur [ $^{\circ}\text{K}$ ].

$S_{13}$  : Surface d'échange entre l'absorbeur et le fluide caloporteur [ $\text{m}^2$ ].

$h_{c13}$  : Coefficient d'échange par convection. [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ].

Le coefficient d'échange convectif est calculé par l'expression suivante :

$$h_{c13} = \frac{Nu \lambda_{air}}{d_{hyd}} \quad (\text{II-12})$$

Où le nombre de Nusselt est donné par [11] :

$$Nu = 0.0196 Re^{0.8} P_r^{0.33} \quad (\text{II-13})$$

Avec ;

$Re$  : Nombre de Reynolds est donné par :

$$Re = \frac{V d_{hyd}}{\nu} \quad (\text{II-14})$$

$P_r$  : Nombre de Prandtl.

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

$d_{hyd}$  : diamètre hydraulique du conduit utile ou dynamique[m].

$V$  : vitesse moyen d'air [ $m.s^{-1}$ ].

$\nu$ : viscosité cinématique [ $m^2.s^{-1}$ ].

Les corrélations de Sieder-Tate et Hausen, souvent adoptées; elles dépendent du régime d'écoulement caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds, introduisent le nombre adimensionnel de Graetz, défini par :

$$G_z = R_e P_r \frac{d_{hyd}}{L} \quad (\text{II-15})$$

Tel que :

✓ Pour le régime laminaire :  $Re < 2100$

$$\left\{ \begin{array}{ll} N_u = 3.66 + 0.085 (1 + 0.047.G_z^{3/2}) & \text{pour } G_z < 100 \\ N_u = 1.86.G_z^{1/3} + 0.87 (1 + 0.015.G_z^{1/3}) & \text{pour } G_z > 100 \end{array} \right\} \quad (\text{II-16})$$

✓ Pour le régime transitoire :  $2100 < Re < 10000$

$$N_u = 0.116 \left( R_e^{2/3} - 125 \right) P_r^{2/3} \left[ 1 + \left( \frac{d_{hyd}}{L} \right)^{2/8} \right] \quad (\text{II-17})$$

✓ Pour le régime turbulent :  $Re > 10000$

$$N_u = 0.027 R_e^{0.8} P_r^{0.33} \quad (\text{II-18})$$

Avec,

$G_z$  : nombre de Graetz .

$L$  : longueur du capteur plan à air[m].

Le flux de chaleur reçu par l'absorbeur est donné par [19] :

$$Q_{incidl} = \alpha_1 \tau_2 S_1 G \quad (\text{II-19})$$

$\alpha_1$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

$\tau_2$  : Coefficient de transmission du vitrage.

$G$  : Éclairement global reçu sur le plan incliné du capteur solaire [ $W.m^{-2}$ ].

### II.4.2.Bilan thermique au niveau du vitrage :

#### II.4.2.1.Entre le vitrage et l'absorbeur :

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

Vue sa faible valeur, on peut citer le flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage avec peu d'importance; il est donné par [20]:

$$Q_{incid2} = \alpha_2 s_2 G \quad (\text{II-20})$$

Avec ;

$\alpha_2$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur

$S_2$  : surface de la vitre

### II.4.2.2. Entre le vitrage et l'air ambiant:

Le vitrage échange avec l'air ambiant un flux de chaleur par convection donné par [18] :

$$Q_{a2am} = h_{c2am} S_2 (T_2 - T_{am}) \quad (\text{II-21})$$

Avec ;

$T_{am}$  : Température ambiante [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$h_{c2am}$  : Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant donné par [18]

$$h_{c2am} = 5.6 + 3.8V_{vent} \quad (\text{II-22})$$

$V_{vent}$ : vitesse du vent [ $\text{m.s}^{-1}$ ]

### II.4.2.3. Entre le vitrage et le ciel :

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre la vitre et le ciel est caractérisé par la relation Suivante [19]:

$$Q_{r2ciel} = h_{r2ciel} S_2 (T_2 - T_{ciel}) \quad (\text{II-23})$$

Où,

$h_{r2ciel}$  : étant le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel exprimé par [19]

$$h_{r2ciel} = \varepsilon_2 \sigma (T_{ciel} + T_2) (T_2^2 + T_{ciel}^2) \left( \frac{T_2 - T_{ciel}}{T_2 - T_{am}} \right) \quad (\text{II-24})$$

$T_{am}$  : Etant la température du ciel [ $^{\circ}\text{K}$ ] décrite par la relation [21]

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (\text{II-25})$$

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

Le bilan total qui décrit le comportement thermique du capteur donnant les températures moyennes de l'absorbeur, de la vitre et du fluide caloporteur est donné par le système suivant :

$$\begin{cases} m_1 C_1 \frac{dT_1}{dt} = \alpha_1 s_1 \tau_2 G - s_1 (h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2) \\ \quad - (\psi_1 - \psi_2) - (T_1 - T_{isol}) h_{c13} s_{13} (T_1 - T_3) \\ m_2 C_2 \frac{dT_2}{dt} = \alpha_2 s_2 G - s_1 (h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2) \\ \quad - h_{c2am} s_2 (T_1 - T_{am}) - h_{r2ciel} s_2 (T_2 - T_{ciel}) \\ m_3 C_3 \frac{dT_3}{dt} = h_{c13} s_{13} (T_1 - T_3) \end{cases} \quad (\text{II-26})$$

Avec ;

$m_1$  : débit massique du fluide dans l'absorbeur [Kg.s<sup>-1</sup>].

$m_2$  : débit massique du fluide dans la vitre [Kg.s<sup>-1</sup>].

$m_3$  : débit massique du fluide caloporteur [Kg.s<sup>-1</sup>].

$C_1$  : chaleur spécifique du fluide dans l'absorbeur [J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

$C_2$  : chaleur spécifique du fluide dans la vitre [J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

$C_3$  : chaleur spécifique du fluide caloporteur [J.Kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>].

$dt$  : variation de temps [s].

$dT_1$  : variation de température du fluide dans l'absorbeur [°K].

$dT_2$  : variation de température du fluide dans la vitre [°K].

$dT_3$  : variation de température du fluide caloporteur [°K].

Le système d'équation (II-23) peut être réécrit comme suit

$$: \begin{pmatrix} \frac{dT_1}{dt} \\ \frac{dT_2}{dt} \\ \frac{dT_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\alpha_1 s_1 \tau_2 G}{m_1 C_1} \\ \frac{s_2}{m_2 C_2} [ \alpha_2 G - h_{c2am} (T_2 - T_{am}) - h_{r2ciel} (T_2 - T_{ciel}) ] \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$+ \left( \begin{array}{l} -\frac{1}{m_1 C_1} [s_1 (h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2) - (\psi_1 - \psi_2)] (T_1 - T_a) - h_{c13} s_{13} (T_1 - T_3) \\ \frac{s_1}{m_2 C_2} [(h_{c12} + h_{r12})(T_1 - T_2)] \\ \frac{h_{c13}}{m_3 C_3} h_{c13} s_{13} (T_1 - T_3) \end{array} \right)$$

Après établissement du bilan thermique du capteur solaire plan en régime permanent, on obtient un système d'équations algébriques à résoudre par la méthode itérative, où il sera transformé en une forme matricielle de la forme suivant [11]:

$$\frac{dT_i}{dt} = M (a_{ij}) T_j \quad (i \text{ et } j \text{ varie de } 1 \text{ à } 3) \quad \text{(II-27)}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} : \text{Matrice des constantes.} \quad T = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{bmatrix}$$

Les inconnues de ce système sont les températures  $T_1$ ,  $T_2$  et  $T_3$

Avec ;

$T_1$  : Température du fluide dans l'absorbeur [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$T_2$  : Température du fluide dans la vitre [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$T_3$  : Température du fluide caloporteur [ $^{\circ}\text{K}$ ]

### II.5. Eclairage solaire reçu par un capteur solaire plan :

**II.5.1.L'azimut ( $\alpha$ ):** est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil . L'azimut est compté négativement vers l'est et positivement vers l'ouest, est donnée par l'équation [22] :

$$\sin \alpha = \frac{\cos \delta \cos \omega}{\cosh} \quad \text{(II-28)}$$

Avec,

$\alpha$  : angle azimut [deg]

$\delta$  : angle déclinaison [deg]

$\omega$  : angle horaire [deg]

$h$  : hauteur du soleil [deg]

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

**II.5.2.La hauteur du soleil (h):** est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal, Il est donné par la relation suivante [23] :

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{II-29})$$

Où,

$\varphi$ : angle latitude [deg]

**II.5.3.L'angle horaire ( $\omega$ ) :** est le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire, dans sa course de l'est à ouest, par rapport au méridien céleste. il est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi [24]

$$\omega = 15(12 - TSV) \quad (\text{II-30})$$

Avec ;

$$TSV = H + \left(\frac{Lg}{15}\right) + Et \quad (\text{II-31})$$

TSV : temps solaire vrai

H : heure [GMT]

Lg: longitude du lieu [deg]

Et : L étant l'équation de temps qui s'exprime par relation suivante :

$$Et = (9.87 \times \sin(2B) - 7.5 \times \cos B - 1.5 \times \sin B) \times \frac{1}{60} \quad (\text{II-32})$$

Où,

$\beta$ : Angle d'inclinaison [deg] et donné par la formule suivant :

$$\beta = \frac{2\pi(N - 81)}{364} \quad (\text{II-33})$$

Où,

N : représente le numéro du jour

**II.5.4.La déclinaison ( $\delta$ ) :** C'est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil, elle varie suivant l'équation de Cooper [25]:

$$\delta = 23.45^\circ \sin \left[ \frac{360}{365} (N - 80) \right] \quad (\text{II-34})$$

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

Avec,

N : numéro du jour

**II.5.5. Angle d'incidence ( $\theta$ ):** il correspond à l'angle formé par la normale du plan avec le vecteur portant la direction du soleil, son expression est décrite comme suit [3] :

$$\begin{aligned} \cos \theta = & \sin \varphi \sin \delta \cos \beta - \sin \delta \cos \varphi \sin \beta \sin \alpha + \cos \delta \cos \varphi \cos \beta \cos \omega \\ & + \cos \delta \sin \alpha \cos \beta \cos \omega + \cos \varphi \sin \alpha \sin \omega \end{aligned} \quad (\text{II-35})$$

Avec,

$\theta$ : Angle d'incidence [deg]

$\beta$  : angle d'inclinaison [deg]

En considérant les cas particuliers :

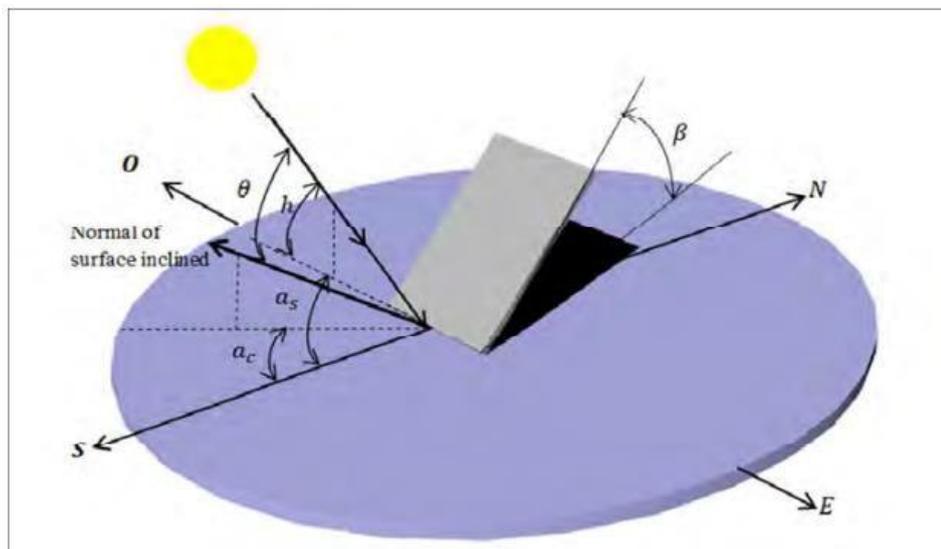
- Capteur orienté plein sud ( $\alpha = 0$ ) :

$$\cos \theta = \sin \delta \sin (\varphi - \beta) + \cos \omega \cos \delta \cos (\varphi - \beta) \quad (\text{II-36})$$

- Pour un captage annuel de type ( $\beta = \varphi$ ) :

$$\cos \theta = \cos \omega \cos \delta \quad (\text{II-37})$$

- Pour une incidence parfaite (cas d'un système de poursuite du soleil)  $\theta = 0$



**Figure .2.2 :** Principe d'orientation d'un capteur solaire plan ( $\alpha_c$  azimut capteur,  $\alpha_s$  azimut solaire,  $\theta$  angle d'incidence,  $h$  hauteur solaire,  $\beta$  angle d'inclinaison). [17]

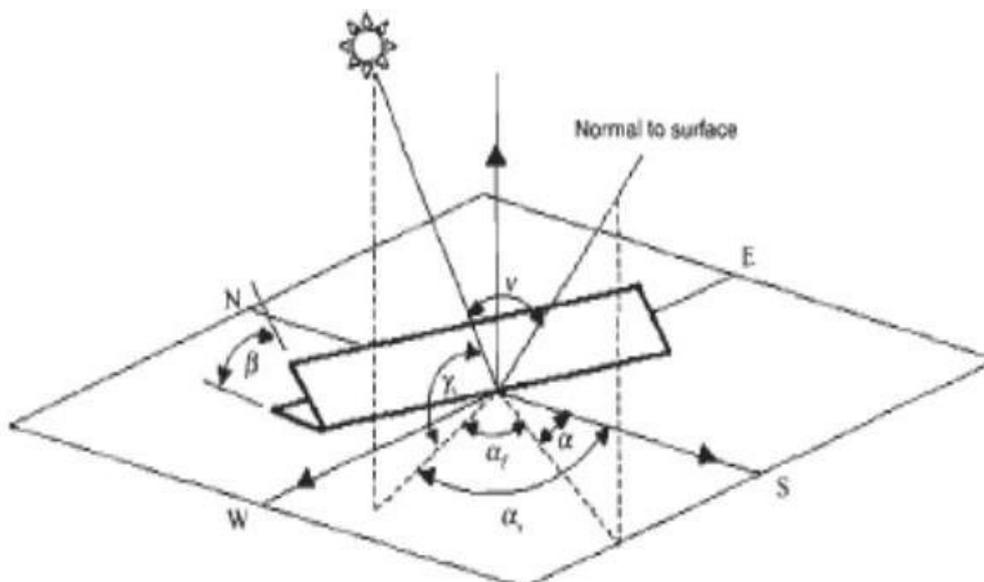
**II.5.6. Angle d'inclinaison ( $\beta$ ) :** C'est l'angle que fait la surface avec le plan horizontal.

L'inclinaison de la surface est désignée par la variable  $b$ , choisie de telle sorte que [26] :

$\beta = 0$  pour une surface horizontale

$\beta = 90^\circ$  pour un plan vertical

$\beta = 180^\circ$  pour un plan horizontal tourné vers le bas



**Figure .2.3:** Orientation et inclinaison d'une surface réceptrice. [26]

### II.6.Mesure et calcul des rayonnements solaire sur un capteur incliné:

**II.6.1.Rayonnement direct :** Le rayonnement direct reçu sur un plan incliné est caractérisé par son inclinaison  $\beta$  (par rapport à l'horizontale), et de son orientation ou azimuth  $\alpha$  par rapport au sud (négatif vers l'est, sens anti trigonométrique). Il est calculé par la relation suivante [27] :

$$I_{dir} = I_b R_b \quad (\text{II-38})$$

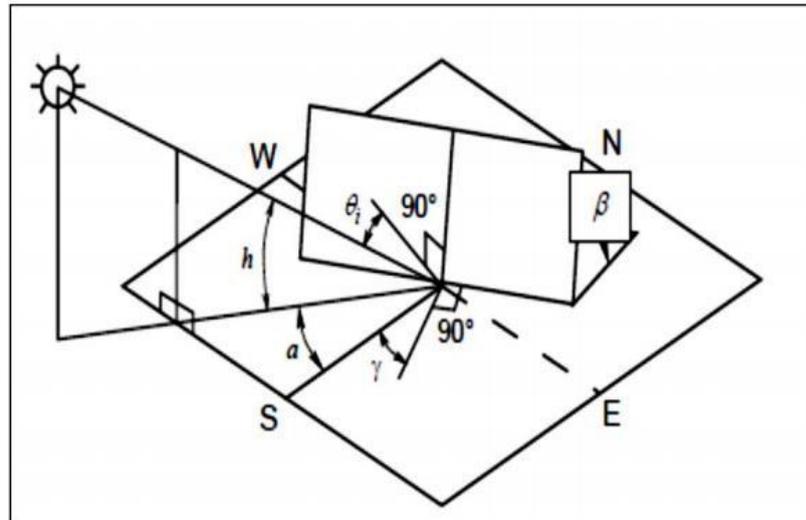
Avec ;

$I_{dir}$  : Le rayonnement directement dans sur un plan incliné [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$I_b$  : le rayonnement direct reçu par un plan horizontal [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$R_b$  : le facteur d'inclinaison du rayonnement direct exprimé par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cosh} \quad (\text{II-39})$$



**Figure .2.4:** Rayonnement direct sur une surface inclinée. [23]

**II.6.2. Le rayonnement diffus :** Il existe plusieurs modèles qui déterminent la composante diffuse du rayonnement solaire incident sur un plan incliné d'orientation arbitraire à un instant quelconque de la journée. Au cours de cette étude, on va adopter le modèle de Liu & Jordan. [28]

$$I_{dif} = I_d R_d \quad (\text{II-40})$$

Où ;

$I_{dif}$ : Le rayonnement diffus dans Un plan incliné [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$I_d$ : Le rayonnement diffus par ciel obtenu sur Un plan incliné horizontale [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{II-41})$$

**II.6.3. Le rayonnement réfléchi par le sol (L'albédo) :** Il s'agit du rayonnement solaire qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol qui peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). [24]

$$L'algédoALB = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie reçue}}$$

$$I_{ref} = (I_b + I_d) R_g \quad (\text{II-42})$$

Où ;

$I_{ref}$ : étant le rayonnement réfléchi sur un plan incliné [ $\text{W.m}^{-2}$ ]

D'autre part, l'expression de  $R_g$  est telle que :

$$R_g = \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{II-43})$$

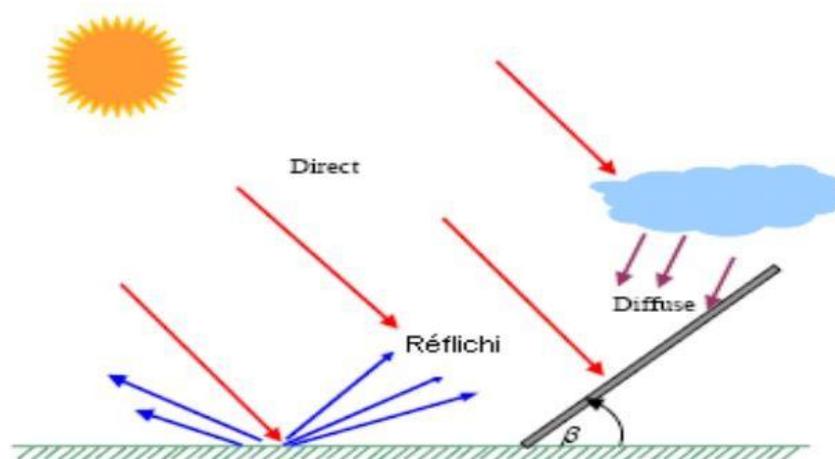
Avec  $\rho_g$  étant la réflexion du sol connu par l'albédo.

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

**Tableau .2.1.** Valeurs typiques de l'albédo selon la nature du sol. [2]

### II.7. Rayonnement Global sur une surface inclinée :

Le rayonnement solaire globale  $I_g(\beta)$  sur une surface arbitraire ayant une inclinaison  $\beta$  par rapport à l'horizontale et un angle azimutal  $\gamma$  est la somme des composantes directe  $I_{dir}(\beta)$ , diffuse  $I_{dif}(\beta)$  et réfléchi par le sol  $I_{réf}(\beta)$ .du rayonnement solaire. [29]



**Figure.2.5:** Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

[26]

$$I_g(\beta) = I_{dir}(\beta) + I_{dif}(\beta) + I_{réf}(\beta) \quad (\text{II-44})$$

## Chapitre II : Étude Analytique et Thermique

---

$$I_g = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_d + I_b) \rho_g \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{II-45})$$

$$I_g = \frac{1}{2} \left[ 2I_b R_b + I_d + I_d \cos \beta + 2\rho_g I_d - 2I_d \rho_g \cos \beta + 2\rho_g I_b - 2\rho_g I_b \cos \beta \right]$$

$$I_g = \frac{1}{2} \left[ (I_d - 2\rho_g (I_d + I_b)) \cos \beta + 2I_b (R_b + \rho_g) + I_d (1 + 2\rho_g) \right]$$

### II.8. Rendement thermique d'un capteur solaire plan incliné:

L'équation unique donnant le rendement instantané d'un capteur solaire plan est définie par le rapport suivant. [13]:

$$\eta = \frac{\text{puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{flux solaire incident sur le plan du capteur}}$$

Qu'on peut l'écrire par la relation :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g \cdot S_{abs}} \quad (\text{II-46})$$

Avec ;

$Q_u$  : Puissance thermique utile [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

$I_g$  : rayonnement globale sur une surface incliné [ $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ]

$S_{abs}$  : surface d'absorbeur [ $\text{m}^2$ ]

$$\eta = \frac{m \cdot C_p (T_s - T_e)}{I_g S_{abs}} \quad (\text{II-47})$$

Autrement l'expression du rendement en tenant compte de tous les paramètres peut être écrite sous la forme :

$$\eta = \frac{2m \cdot C_p (T_s - T_e)}{S_{abs} \left[ (I_d - 2\rho_g (I_d + I_b)) \cos \beta + 2I_b (R_b + \rho_g) + I_d (1 + 2\rho_g) \right]} \quad (\text{II-48})$$

Ou,

$m$  : Débit massique en [ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$C_p$  : Chaleur spécifique en [ $\text{J} \cdot \text{Kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ]

$T_e$  : Température d'entrée de fluide [ $\text{K}^\circ$ ]

$T_s$  : Température de sortie de fluide [ $\text{K}^\circ$ ]

D'autre part la température de sortie qui correspond à des conditions de fonctionnement régité par une valeur précise du rendement est donné par la formule suivante :

$$T_s = \frac{\eta I(\beta) S_{abs}}{m \cdot C_p} + T_e \quad (\text{II.49})$$

$$T_s = \frac{\eta S_{abs} [(I_d - 2 \rho_g (I_d + I_b)) \cos \beta + 2 I_b (R_b + \rho_g) + I_d (1 + 2 \rho_g)]}{m \cdot C_p} + T_e$$

### II.9. Conclusion :

Ce chapitre est consacré à l'identification des paramètres internes et externes influençant le fonction thermique d'un capteur solaire plan à air et aux différents échanges thermiques ayant lieux dans les éléments constitutants ainsi qu'un aperçu sur les notions importantes concernant la quantification de l'éclairement solaire reçu en faisant intervenir coordonnées terrestres et horaires, et la composition du rayonnement solaire, pour avoir les différentes équations qui régissent le comportement thermique de ce dispositif en régime permanent, ainsi que l'expression de son rendement instantané et la température de sortie de fluide caloporteur.

# ***Chapitre***

***III***

### **III.1. Introduction :**

Ce chapitre est consacré à la description du banc d'essai expérimental utilisé ainsi que les différents instruments et appareils de mesures employés dans cette étude théorique et expérimentale. Il s'agit d'un capteur solaire curviligne conçu et réalisé au département de génie mécanique de l'université de Biskra en 2015, par Dr Mehboub chawki dans le cadre de ses travaux de recherche de doctorat.,

Le principal objectif principal de ce travail est de mettre en évidence l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontal du plan capteur curviligne sur les performances thermiques, notamment le rendement global et l'écart de température entre la sortie et l'entrée de l'air en fonction du temps et pour un éclairage solaire naturel, dont les paramètres considérés dans cette étude sont mesurés pour un débit volumique  $Q_v$  maintenu constant, à savoir :

- Température de l'air à la sortie du capteur.
- Température de l'air à l'entrée du capteur.
- Rayonnement solaire moyen reçu sur le plan curviligne du capteur.
- Vitesse du vent.
- Angle d'inclinaison du capteur curviligne par rapport à l'horizontal.

### **III.2. Dispositif expérimental :**

#### **III.1.1. Description du banc d'essai :**

Le banc d'essai expérimental a été réalisé au sein du hall technologique de département de génie mécanique de l'université de Biskra. C'est un capteur solaire à air où le un plan de captation recevant le rayonnement solaire est de forme curviligne Figure (3.1), dont les dimensions sont 160 cm de longueur, 80 cm de largeur.

Les paramètres géométriques et optiques des principaux composants du capteur curviligne sont :

- ❖ Une Couverture transparente en plexiglas d'une épaisseur égale à 03 mm.
- ❖ Un absorbeur en tôle d'acier galvanisé avec un épaisseur de 01 mm d'une longueur et largeur respectivement 1,6x0,8 m, avec une surface peinte en noir mat.
- ❖ L'isolation est en polystyrène extrudé avec un épaisseur de 04 cm.
- ❖ La longueur du conduit utile est égale à 1,6 m.

## Chapitre III : Etude expérimentale; Description du banc d'essai

- ❖ La largeur du conduit utile est égale à 0,8 m.
- ❖ La veine d'air mobile se trouve de l'absorbeur.
- ❖ Le fluide caloporteur est l'air.
- ❖ La distance entre l'absorbeur et la couverture transparente de plexiglas est égal à 02,2 cm.

Le boîtier du capteur solaire est fabriqué en bois, monté sur une structure métallique rigide en acier réglable, ce qui permet d'ajuster l'angle d'inclinaison. Dans ce travail expérimental on a considéré quatre inclinaison égales 15°, 25°, 35°, 45° degrés respectivement par rapport au plan horizontal.



**Figure (a) :** Vue de face du capteur curviligne



**Figure (b) :** Vue de profil du capteur curviligne

**Figure .3.1.** Photographie du dispositif expérimental « capteur solaire curviligne ».

### III.3. Paramètres mesurés et instrument de mesure :

Pour déterminer les performances instantanées du capteur solaire curviligne, notamment le rendement thermique instantané et l'évolution de la température de sortie durant la journée, un certain nombre de paramètres doivent être mesurés. Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont décrits d'après le tableau (3.1) suivant.

Paramètres mesurés	Instruments de mesure utilisés
Débit ou vitesse de l'air	thermo-anémomètre à hélice
Températures	Thermocouple à afficheur électronique
Rayonnement solaire global	Pyranomètre manuel
Vitesse du vent	thermo-anémomètre à hélice
Angle d'inclinaison	Demi-cercle gradué avec règle suspendue

**Tableau.3.1** : Paramètres mesurés et instruments de mesure.

### III.3.1. Mesures du débit et vitesse d'air :

Pour la mesure du débit massique ou volumique de l'air véhiculé à travers le conduit dynamique du capteur solaire curviligne, on a utilisé un thermo-anémomètre à hélice de diamètre 10 cm de type KIMO LV 110 Figure.3.2.



**Figure .3.2** :Thermo-anémomètre à hélice de type KIMO LV 110 pour mesurer le débit et la vitesse de l'air au niveau du conduit de récupération de la pompe à air.

(Plages de mesure : Vitesse de 0 à 35 m/s, résolution 0.1 m/s)

Pour un régime de fonctionnement contrôler par un potentiomètre, qui commande le pompe à air. La vitesse de l'air est directement lu sur le cadran de l'anémomètre, dont

### Chapitre III : Etude expérimentale; Description du banc d'essai

---

L'hélice tournante est reliée à un conduit de récupération de diamètre identique à celle de l'hélice figure (3.2), à travers lequel circule l'air provenant du capteur curviligne qui est aspiré par une pompe à air dont le débit massique est ajusté par un potentiomètre électrique. Durant le protocole expérimental on a maintenu constant le débit d'air de l'ordre de 03 m/s, qui est mesurée et ajustée au niveau du conduit de récupération qui correspond à un régime d'écoulement turbulent dans le conduit utile et de fonctionnement optimal.

$$Q_v = V \cdot S = \text{constant}$$

$$Q_v = V_1 \cdot S_1 = V_2 \cdot S_2$$

Avec ;

$Q_v$  : débit volumique [ $m^3/s$ ].

$V_1$  : la vitesse mesurée dans le conduit de diamètre 10cm.

$S_1$  : la section du conduit de diamètre 10cm.

$V_2$  : la vitesse mesurée dans le conduit du capteur.

$S_2$  : la section du conduit dynamique du capteur.

Application numérique :

$$S_1 = \frac{(10 \times 10^{-2})^2 \cdot \pi}{4}$$

$$S_1 = 7.85 \times 10^{-3} m^2$$

$$S_2 = 0.04 \times 0.8 = 0.032 m^2$$

$$V_1 = 03 \text{ m/s}$$

Donc ;

$$Q_v = 3 \cdot 7.85 \cdot 10^{-3} = 0.02355 m^3/s$$

$$V_2 = Q_v / S_2$$

$$V_2 = 0.02355 / 0.032$$

$$V_2 = 0.735 \text{ m/s}$$

### III.3.2. Mesure des températures :

Pour évaluer et caractériser les paramètres performance du capteur solaire curviligne, deux points de mesures de la température du fluide en circulation sont nécessaires, respectivement à l'entrée et à la sortie du conduit utile Figure (3.3), par deux thermocouples reliés à deux afficheurs électronique de précision , dont la lecture est prise directement sur le cadran à cristaux liquide de Type Thermomètres digital JDP-200 avec panneau afficheur



**Figure .3.3 :** Thermomètres digital JDP-200 avec panneau afficheur.

### III.3.3. Mesure du rayonnement solaire global :

Le rayonnement solaire global reçu par la surface réceptrice du capteur curviligne est mesuré par un pyranomètre manuel à cadran équipé d'un écran pour afficher la lecture directe de l'intensité lumineuse en  $w/m^2$  Figure (3.4).

Vu la forme curviligne de la surface réceptrice, durant les prélèvement on effectue 03 mesures, respectivement aux extrémités amont, aval et au milieu du capteur curviligne, de telle sorte à obtenir une valeur moyenne qui servira pour le calcul des performances thermiques.



Figure .3.4: Pyranomètre manuel.

### III.3.4. Mesure de l'angle d'inclinaison:



Figure.3.5 : Ajustement de l'angle d'inclinaison du capteur solaire.

### III.5. Contrôle de la vitesse et du débit d'air en circulation :

Pour ajuster le débit d'air en circulation dans le conduit dynamique, on a utilisé un aspirateur d'air relié à un potentiomètre pour contrôler la vitesse et le débit d'air véhiculé dans le capteur solaire curviligne. Le potentiomètre électronique permis d'ajuster avec précision le débit d'air voulu Figure. III.6. D'autre part la pompe à air « aspirateur » est reliée à son extrémité par une conduite en PCV de 10 cm de diamètre identique à celui de

### Chapitre III : Etude expérimentale; Description du banc d'essai

---

l'anémomètre à hélice. C'est au niveau de cette conduite de récupération qu'on effectue la mesure de la vitesse et le débit d'air soufflé dans le conduit dynamique du capteur solaire par application de l'équation de continuité entre deux sections différentes.



**Figure.3.6 :** Extracteur d'air.

Les expériences sont effectuées durant le mois de mars en plein air, à proximité du hall technologique du département de génie mécanique. Les relevés sont faites pendant des journées bien ensoleillées avec parfois des passages nuageux.

Pour suivre l'évolution des paramètres mesurables nécessaires pour notre étude expérimentale, telle que les températures de l'air à l'entrée, à la sortie du capteur, l'angle d'inclinaison, le rayonnement solaire sur le capteur incliné, la vitesse du vent, on a dressé des tableaux de mesure, où les relevés sont réalisées chaque 30 mn, à partir de 10H00 matin jusqu'au 15H:30 de l'après midi, à savoir que toutes les relevés expérimentales sont faites avec un débit d'air massique maintenue constant de l'ordre de 0.03 kg/s qui correspond à une vitesse égale à 03 m/s.

### **III.4.Conclusion:**

Dans cette étude on a présenté le dispositif expérimental à savoir : le banc d'essai utilisé et les différentes caractéristiques du capteur étudié .

Le capteur solaire curviligne à air a été réalisé et testé dans le hall technologique de Biskra, où on a essayé de mesurer les principaux paramètres essentiels avec débit maintenu constant et angle d'inclinaison du capteur solaire variable par rapport à l'horizontale.

# ***Chapitre***

## ***IV***

# Chapitre IV : Résultats et discussion

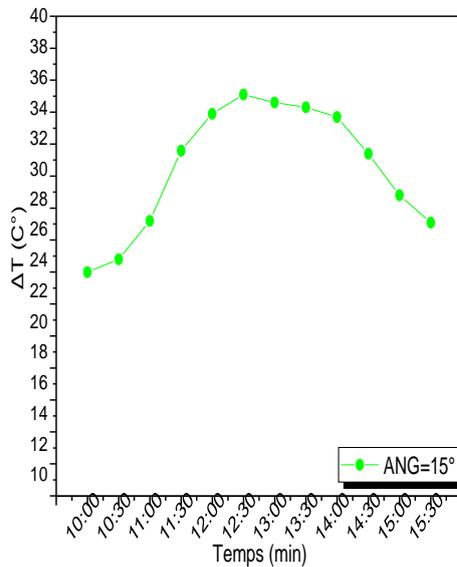
## IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats des tests effectués sur le capteur solaire curviligne. A partir des relevés expérimentaux, on a pu déterminer les performances thermiques, notamment le rendement thermique et la différence des températures entre l'entrée et la sortie du capteur solaire curviligne à air en fonction du temps, respectivement pour différentes inclinaisons par rapport à l'horizontale.

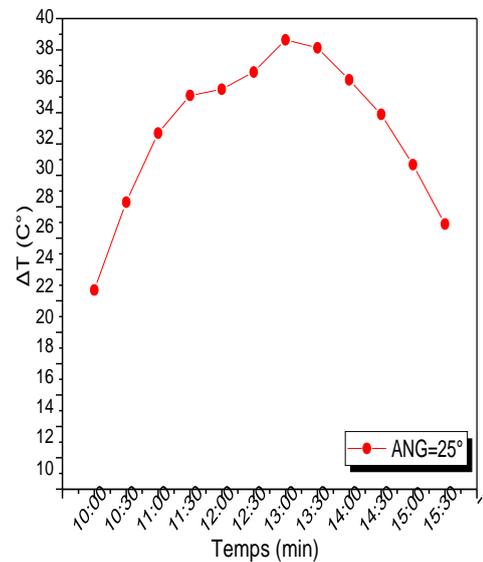
Ces tests ont pour but de mettre en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison du capteur solaire curviligne par rapport au plan horizontal sur les performances thermiques et les principaux paramètres de fonctionnement principalement le rayonnement solaire global reçu par le plan curviligne.

Les tests expérimentaux ont été menés pendant le mois de mars 2020, à proximité du hall technologique du département de génie mécanique de l'université de Biskra.

## IV.2.Variation de l'écart de température $\Delta T$ fonction du temps :

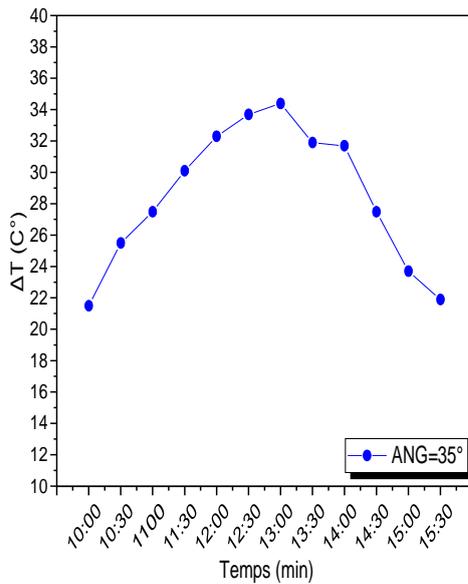


**Figure. 4.1.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 12/03/2020, Angle=15°

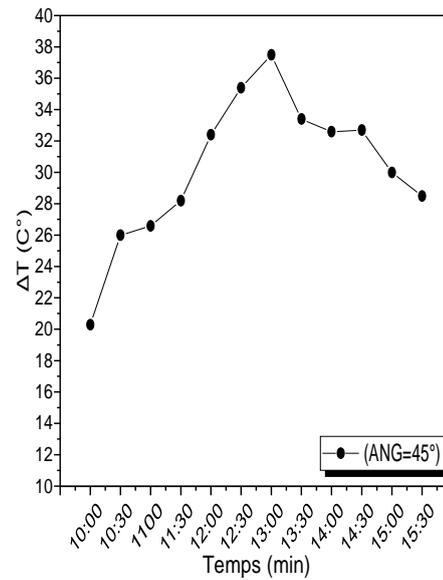


**Figure.4.2.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 11/03/2020, Angle = 25°

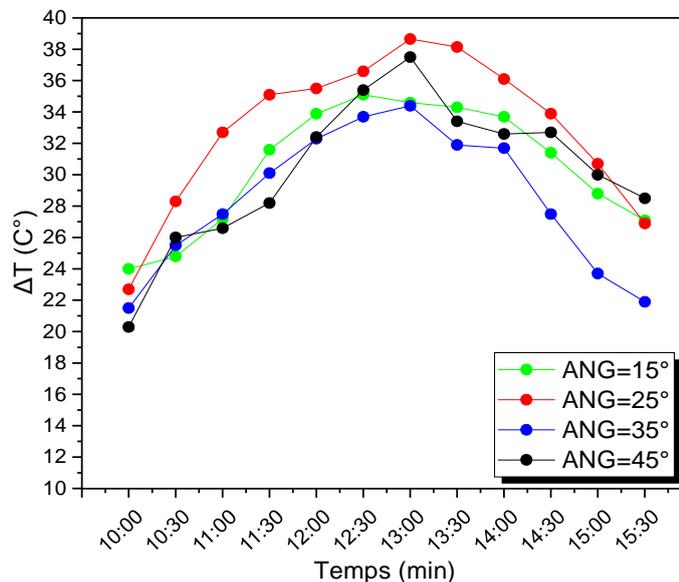
## Chapitre IV : Résultats et discussion



**Figure. 4.3.** Variation  $\Delta T$  en fonction du temps, le 08/03/2020, Angle=35°



**Figure. 4.4.** Variation de  $\Delta T$  en fonction du temps, le 05/03/2020, Angle = 45°



**Figure. 4.5.** Variation de l'écart des températures  $\Delta T$  en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison 15° ; 25° ; 35° et 45° respectivement.

En analysant les résultats présentés d'après les figures (4.1) jusqu'à (4.4) et (4.5), qui montrent la variation de l'écart de température  $\Delta T$  entre l'entrée et la sortie du capteur en fonction du temps, pour des angles d'inclinaison variables qui sont 15°, 25°, 35° et 45° respectivement, on déduit que le  $\Delta T$  a la même allure quelle que soit la façon dont nous

## Chapitre IV : Résultats et discussion

modifions l'angle d'inclinaison de notre capteur curviligne, en commençant par des valeurs de l'ordre de 20.3 C° avec l'angle 45°, à 24C° avec 15° d'inclinaison au début des expériences vers 10 Heure du matin et continue d'augmenter jusqu'à atteindre sa valeur supérieure vers 13 Heure avec une valeur de 38.65 C° avec l'angle 25°, puis elle commence à diminuer pour atteindre une valeur comprise entre 21.9 C° et 28.5C° à 15H 30mn pour les angles 35°et 45° respectivement. Les résultats sont pris pour un ciel clair durant toutes les expériences. D'après les courbes, on remarque que le meilleur écart de température est obtenu avec les inclinaisons de 15 et 25 ° par rapport au plan horizontal.

### IV.3.Calcul du rendement thermique :

Le rendement thermique d'un capteur solaire plan est défini par le rapport de la puissance utile à la puissance incidente, il est par conséquent donné par l'expression :

$$\eta = \frac{\rho \cdot C_p \cdot Q_v \cdot (T_s - T_e)}{G_{moy} \cdot S_{abs}} \quad (IV.1)$$

Où  $\rho$  étant est la masse volumique de l'air donnée par la relation suivante, qui tient compte de la masse volumique de référence par rapport à une altitude nulle, de la température moyenne et de l'altitude du site :

$$\rho = \rho_0 \frac{273}{273 + T_m} \cdot \frac{P(z)}{P_0} \quad (IV.2)$$

Le terme  $(P/P_0)$  représente la correction de l'altitude. La pression standard ( $P_0$ ) au niveau de la mer, à la température de 15°C (soit 288 K) est :  $P_0 = 1.01325 \cdot 10^5$  Pa

Dans ces conditions la masse volumique de l'air est égale à  $\rho = 1.293$  Kg/m<sup>3</sup> :

D'autre part, on décompose verticalement l'atmosphère en couches, la limite de chaque couche est définie d'après le changement de la variation de température en fonction de l'altitude. Dans la troposphère, la température décroît de 6.5°C par Kilomètre, sauf au voisinage du sol où la pression  $P(z)$  suit la relation décrite sous la forme suivante [5] :

$$P(z) = P_0 \left[ 1 - \frac{0,0065 \cdot Z}{288,15} \right]^{5,31} \quad (IV.3)$$

Pour les altitudes inférieures à 03 kilomètres, cette formule peut s'écrire sous la forme :

## Chapitre IV : Résultats et discussion

$$P(z) = P_0 \exp(-0,1198.Z) \quad (\text{IV.4})$$

Avec,  $Z$  : étant l'altitude en kilomètres.

Ou bien sous la forme simplifiée : 
$$\frac{P(z)}{P_0} = (0,89)^z$$

$T_m$  : température de mesure en °C

$C_p$  : capacité calorifique de l'air égale à 1004 en [J/kg.K].

$Q_v$ : débit volumique en [m<sup>3</sup> /s].

$S_{abs}$  : surface utile de l'absorbeur en m<sup>2</sup>.  $S_{abs}=1.6 \times 0.8=1.28$  m<sup>2</sup>

$G_{moy}$ : rayonnement solaire moyen incident reçu par le plan de captation en [W/m<sup>2</sup>].

$T_e$  : température de l'air à l'entrée du capteur en °C

$T_s$  : température de l'air à la sortie du capteur en °C.

Avec ; 
$$G_{moy} = \frac{G_1 + G_2 + G_3}{3}$$

$G_1$  : le rayonnement solaire mesuré juste à l'entrée du capteur [W/m<sup>2</sup>].

$G_2$  : le rayonnement solaire mesuré au milieu du capteur [W/m<sup>2</sup>].

$G_3$  : le rayonnement solaire mesuré à la sortie du capteur [W/m<sup>2</sup>].

Pour le calcul du rendement thermique du capteur curviligne, on a considéré un débit volume constant durant toute la journée de l'ordre de 0.023 m<sup>3</sup>/s, qui correspond à une vitesse moyenne dans le conduit utile égale à 3m/s.

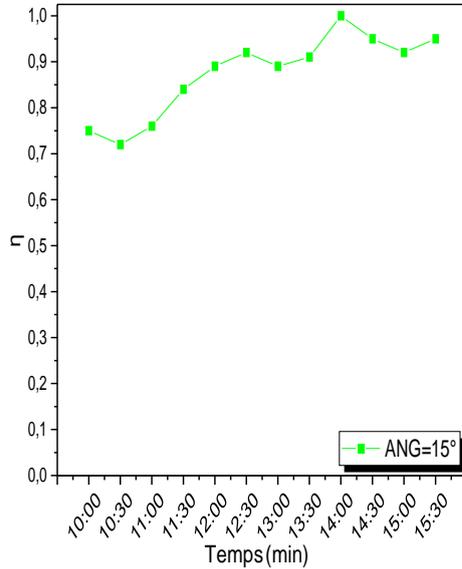
Pour les conditions de fonctionnement considérées, l'expression du rendement thermique donnée par l'équation (VI.1) prend la forme suivante :

$$\eta = \frac{1,29.1004.0.023.\Delta T}{1,28.G_{moy}} \quad (\text{IV.5})$$

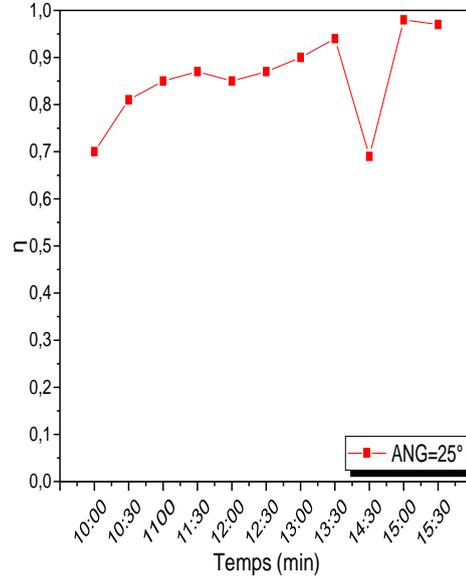
Autrement, cela nous permis d'obtenir la relation simplifiée suivante:

$$\eta = 23.828 \frac{\Delta T}{G_{moy}} \quad (\text{IV.6})$$

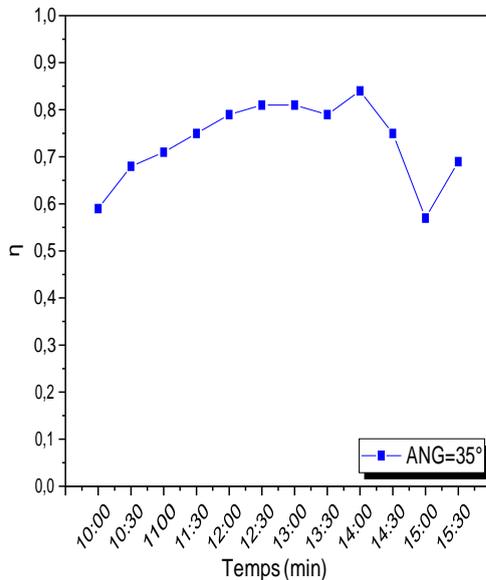
## IV.4. Variation du rendement en fonction du temps:



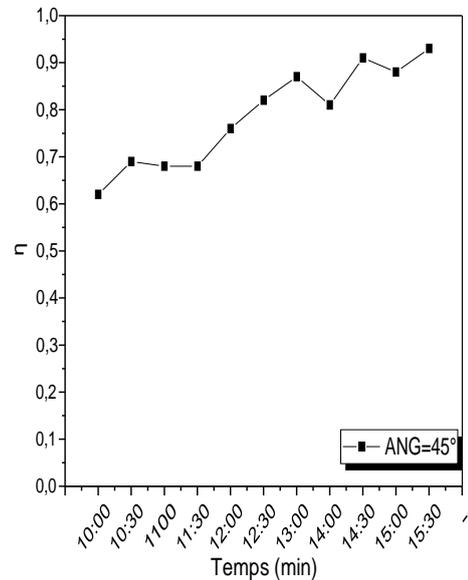
**Figure. 4.6.** Variation de rendement en fonction du temps, le 12/03/2020, Angle=15°



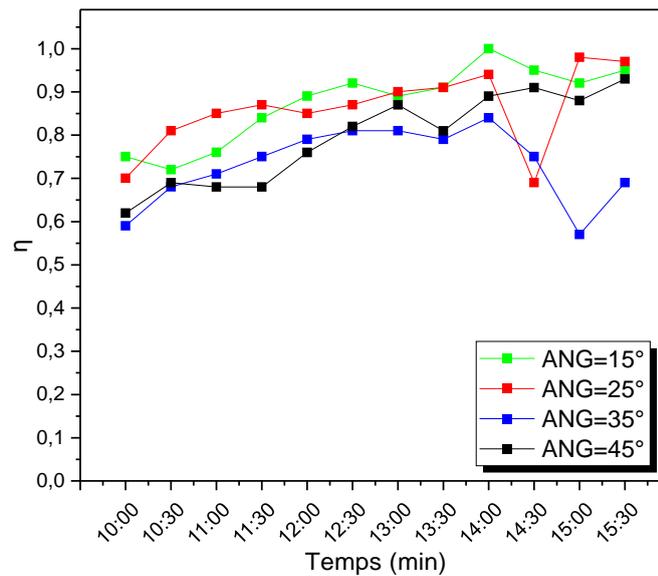
**Figure. 4.7.** Variation de rendement en fonction du temps, le 11/03/2020, Angle =25°



**Figure. 4.8.** Variation de rendement en fonction du temps, le 08/03/2020, Angle=35°



**Figure. 4.9.** Variation de rendement en fonction du temps, le 05/03/2020, Angle =45°



**Figure. 4.10.** Variation de rendement en fonction du temps, pour différents angles d'inclinaison 15° ; 25° ; 35° et 45° respectivement.

L'analyse des courbes des figures (4.6, 4.7, 4.8, IV.9 et 4.10) montre la variation du rendement en fonction de temps pour les quatre angles d'inclinaison 15°, 25°, 35° et 45° respectivement, on remarque que le rendement varie sensiblement avec la variation de l'angle d'inclinaison du plan capteur par rapport à horizontal.

La comparaison entre les différents résultats obtenus à partir des configurations étudiées, les meilleures valeurs des rendements sont réalisés entre 14 Heure et 15 Heure de l'après midi qui correspondent au midi à un éclairage maximum proche du midi solaire de l'ordre de 84 % obtenus pour les angles de 15° et 25° successivement, qui correspondent à un fonctionnement optimal du capteur solaire curviligne pour la région de Biskra.

### IV.5. Conclusion :

D'après les résultats numériques et graphiques obtenus, on constate que les performances du capteur solaire curviligne sont fortement influencées par Les paramètres de position, particulièrement l'inclinaison et l'emplacement du capteur.

En comparant les courbes obtenues, nous concluons, pour chaque variation de rendement et de l'écart de température  $\Delta T$  en fonction du temps la meilleure performance thermique du capteur solaire curviligne se trouve avec une inclinaison située entre 15 et 25° par rapport à l'horizontale.

**Conclusion**

**générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire curviligne à air dans le but de mettre en évidence l'influence de l'intensité de l'éclairement solaire et l'angle d'inclinaison sur la température du fluide caloporteur et sur le rendement thermique de ce capteur.

Après avoir passé en revue quelques données astronomiques nécessaires à toute étude de dispositifs solaires, on a essayé de présenter les modèles mathématiques décrivant le fonctionnement et le comportement thermique d'un collecteur solaire plan à air, ce qui nous a permis d'établir les équations qui montrent les différents échanges thermiques ayant lieu dans ce dispositif en régime permanent, principalement l'expression de son rendement instantané et la température de sortie du fluide.

La partie expérimentale avait pour objectif d'étudier l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport à l'horizontale du plan récepteur et de déterminer par conséquent l'angle optimal pour avoir un rayonnement maximal.

Nous avons été amenés à découvrir des angles spécifiques puis à sélectionner les angles qui donne la meilleure performance thermique ; à savoir le rendement et la différence des températures entre l'entrée et la sortie du capteur solaire curviligne correspondant à notre étude.

Après avoir effectué une analyse et comparaison entre les différents résultats graphiques obtenus qui décrivent l'évolution des paramètres de performances, nous concluons que les meilleures performances thermiques qui décrivent l'évolution en fonction du temps de la variation du rendement et l'écart des températures  $\Delta T$  dans le capteur solaire curviligne se trouvent avec une inclinaison située entre  $15^\circ$  et  $25^\circ$  par rapport à l'horizontale.

# BIBLIOGRAPHIE

---

## REFERENCES

- [1] **Gh.Lazhar**, « Etude et calcul des capteurs solaires plans "Application au chauffe - eau"», mémoire de master Université de Ouargla (2015)
- [2] **B.Amina**, « Etude et simulation du fonctionnement du système suiveur des panneaux solaires», mémoire de master Université d'Annaba (2017)
- [3] **A.BRAHIMI**, « Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau », mémoire de master Université d'Alger (2016)
- [5] **S.Messaoud**, « Etude dynamique et thermique d'un capteur solaire à air à double passe avec milieu poreux », mémoire de magister Université de Tlemcen (2014)
- [6] **N.Nedjemeddine**, « Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique », mémoire de master Université d'Annaba (2018)
- [7] **B.Chaouki**, « Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie – », mémoire de magister Université de Constantine (2014).
- [8] **B.haroun**, « étude expérimentale de deux types de capteurs solaires plan et curviligne », mémoire de master Université de Biskra (2017).
- [9] **Jiangfeng Guo, Mingtian Xu et Lin Cheng**, «Second law analysis of curved rectangular channels », Revue International Journal of Thermal Sciences Vol.50 pp.760-768, (2011)
- [10] **M.R.H. Nobari et E.Amani**, « A numerical investigation of developing flow and heat transfer in a curved pipe», International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow Vol. 19 No. 7, pp. 847-873 (2009).
- [11] **A.T.Ferdjani**, « Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans », mémoire de magister Université de biskra2017
- [12] **S.S. Krishnananth et K.K. Murugavel**, « Experimental study on double pass solar air heater with thermal energy storage», Journal of King Saud University-Engineering Sciences, Vol. 17 No. 5, pp. 247-251 (2012).
- [13] **F.Guellai, A.Labed.A, N.Moummi et Ch.Mahboub**, «Measurement and Analysis of Thermal-Hydraulic Performance of Curved and Plate Flat Solar Air Heaters; A Comparative Study», Vol.18, No.6, December, 2019, pp. 553-558

## BIBLIOGRAPHIE

---

- [14] **T.H.Patrick, T.F.Abraham, E.Marcel et K.Alexis**, «Numerical Study of the Greenhouse Effect in a Flat-plate Double Glazing Solar Heat Collector», *Indian Journal of Science and Technology*, Vol 12(38), DOI: 10.17485/ijst/2019/v12i38/145315, October 2019
- [15] **S.Saadi**, «EFFET DES PARAMETRES OPERATIONNELS SULESPERFORMANCES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN », thèse de magistère Université de Constantine 2010
- [16] **H.Souiadia**, « Etude expérimentale d'un capteur solaire plan à air », thèse de master Université de m'sila 2019
- [17] **A.Benkhelifa**, «Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur», thèse de master Université d'Ouargla 2012
- [18] **M.A.Amraoui**, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité », thèse de magistère 2012
- [19] **A.Mustapha**, «Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR», thèse de magistère Université de Tlemcen
- [20] **M.Moussaoui**, «MODELISATION DE L'ABSORBEUR D'UN CAPTEUR SOLAIRE», thèse de master Université d'Tizi-Ouzou 2012
- [21] **S. Oudjedi, A. Boubghal, W. Braham Chaouch, T. Chergui et A. Belhamri**, « Etude paramétrique d'un capteur solaire plan à air destiné au séchage », *Revue des Energies Renouvelables SMSTS 08 Alger*, 2008, pp 255 – 266
- [22] **M.Nia**, «Etude comparative des méthodes d'estimation du rayonnement solaire», thèse de magister Université de setif 2010
- [23] **A.Charik**, « Détermination de l'angle optimal d'inclinaison de capteur solaire à M'Sila », thèse de master Université de m'sila 2016
- [24] **K.Kerkouche, F.Cherfa, A.Hadj Arab ,S.Bouchakour, K. Abdeladim et K. Bergheu** , «Evaluation de l'irradiation solaire globale sur une surface inclinée selon différents modèles pour le site de Bouzaréah», *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°2 (2013) 269 – 284
- [25] **H.Hassini née belghitri**, « modilisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », thèse de magistère Université de tlemcen 2010

## BIBLIOGRAPHIE

---

[26] **M.Missoum**, « Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie», thèse de magistère Université de chlef2011

[27] **N.Moummi**, «"polycopié de cours, énergies renouvelables" »université de biskra 2019

[28] **S.Mouhous-choauchi**, «Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné», thèse de magistère Université de bouzareah2012

[29] **B.Zitani**, «Etude et Modélisation du Comportement en Régime Transitoire d'un Capteur Solaire Plan », thèse de magistère Université d'Annaba 2007

[4] (23-11-2019), Capteurs solaire thermique. [Online]

<http://www.cogesol.be/usr/documentation/CAPTEURS%20SOLAIRE%20THERMIQUE.pdf>

Le principal objectif de ce travail est l'étude de l'effet de l'angle d'inclinaison par rapport au plan horizontal sur les performances thermiques, notamment le rendement et l'écart de température d'un capteur solaire dans le plan récepteur est de forme curviligne. Une étude expérimentale a été entamée dans le site de Biskra, ce qui nous a permis d'effectuer de nombreuses expériences sous des conditions climatiques différentes, principalement, l'ensoleillement, la vitesse de vent et la température ambiante.

**Mots clés :** capteur solaire curviligne, performances thermiques, angle d'inclinaison.

### ***Abstract:***

The main objective of this work is the study of the effect of the angle of inclination with respect to the horizontal plane on the thermal performances, in particular the efficiency and the temperature difference of a solar collector in the receiving plane is curvilinear in shape. An experimental study was started at the Biskra site, which allowed us to perform many experiments under different climatic conditions, mainly, sunshine, wind speed and ambient temperature.

**Keywords :** Curvilinear solar collector, thermal performances, angle of inclination

### **ملخص:**

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو دراسة تأثير زاوية الميل بالنسبة للمستوى الأفقي على الأداء الحراري ، ولا سيما الكفاءة والفرق في درجة الحرارة للاقط الشمسي في المستوى المستقي منحنى الشكل. قمنا بدراسة تجريبية في منطقة بسكرة تحديدا، مما سمح لنا بإجراء العديد من التجارب في ظل ظروف مناخية مختلفة ، وخاصة أشعة الشمس وسرعة الرياح ودرجة حرارة المحيط.

**الكلمات المفتاحية :** لاقط شمسي منحنى ، الأداء الحراري، زاوية الميل.