



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 : Energétique

Réf. : .....

---

Présenté et soutenu par :  
**GRAINE Oussama**

Le : mardi 9 juillet 2019

## Réalisation et expérimentation d'un capteur solaire à eau couplé à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes

---

### Jury :

Dr.	BENMACHICHE Messaoud	MCB	Université de Biskra	Président
Pr.	MOUMMI Abdelhafid	Pr	Université de Biskra	Rapporteur
Pr.	MOUMMI Nour Eddine	Pr	Université de Biskra	Examineur

# *Dédicaces*

*Je tiens à dédier ce modeste travail à tous ceux qui me  
sont chers : A ceux qui ont fait de moi ce que je suis :  
Mes très chers parents pour qui je n'oublierai jamais  
leur grande affection ; leur soutien et leur  
encouragement ; tout le long de mes études.*

- ❖ A mes très chères sœurs Imane, Asma, Chaima, Amina.*
- ❖ A mon très chère ami et mon frère Abdallah Hamidani*
- ❖ A mes très chers frères et sœurs (Groupe MT).*
- ❖ A tous mes collègues de la promotion 2018-2019.*
- ❖ A tous ceux qui me sont chers et qui sont aujourd'hui absents.*

# *OZISSAMA*

# *Remerciement*

*En premier, à la fin et à l'infini je remercie Dieu tout puissant de m'avoir permis d'arriver à ce stade, de m'avoir octroyer courage, patience et santé pour achever ce modeste travail.*

*Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mon encadreur Monsieur **MOUMMI Abdelhafid**, Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.*

*Un profond remerciement à **Dr. BENMACHICHE Messaoud** et **Madame Dr. BOULTIF Nora** d'avoir accepté d'examiner et évaluer ce modeste travail en leur qualité d'examineur et membre du jury.*

*J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui, par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté à me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches.*

*Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, « Vous avez tout sacrifié pour vos enfants n'épargnant ni santé ni efforts. Vous m'avez donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance. Je suis redevable d'une éducation dont je suis fier ».*

*Le moment est venu d'exprimer toute mes reconnaissances à **Mlle. Farida Aziez**, **Mlle. Amel Geurrouf**, **Mr. Boubidi Med Sadoq**, **Mr. Adouane Fares** et **Khelifi Salah Eddine**, pour leurs aides et leurs efforts pour réaliser ce travail.*

*Enfin, je remercie tous mes Ami(e)s de la promotion 2018/2019 pour leurs sincères amitiés et confiance, et à qui je dois ma reconnaissance et mon attachement.*

*À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.*

## Nomenclature

### Notations latines

$D_x$	Diamètre extérieur d'un tube	[m]
$e_{ail}$	Épaisseur d'une ailette	[m]
$e_{éch}$	Hauteur effective de l'échangeur	[m]
$F$	Facteur de correction	[%]
$h$	Coefficient d'échange par convection	[w/m <sup>2</sup> . C]
$I_g$	Rayonnement solaire	[w/m <sup>2</sup> ]
$K$	Coefficient d'échange global	[w/m <sup>2</sup> . C]
$L$	Longueur effective de l'échangeur	[m]
$l$	Largeur effective de l'échangeur	[m]
$\dot{m}$	Débit massique	[Kg/s]
$NUT$	Nombre d'unité de transfert	
$n_{ail}$	Nombre d'ailettes	
$n_{tub}$	Nombre des tubes	
$q_v$	Débit thermique unitaire	[w]
$Q_u$	Quantité de chaleur utile	[Kj/h]
$Q$	Flux de chaleur	[w]
$R$	Résistance thermique	[m <sup>2</sup> . C/w]
$S_c$	Surface de la paroi absorbante	[m <sup>2</sup> ]
$S_t$	Surface effective totale de l'échangeur	[m <sup>2</sup> ]
$S_{ail}$	Surface effective totale des ailettes de l'échangeur	[m <sup>2</sup> ]
$S_{tub}$	Surface d'échange effective totale des tubes	[m <sup>2</sup> ]
$T_e$	Température d'entrée	[C]

$T_s$	<i>Température de sortie</i>	[C]
$T_{ec}$	<i>Température d'entrée du fluide chaud</i>	[C]
$T_{ef}$	<i>Température d'entrée du fluide froid</i>	[C]
$T_{sc}$	<i>Température de sortie du fluide chaud</i>	[C]
$T_{sf}$	<i>Température de sortie du fluide froid</i>	[C]
$\Delta T$	<i>Différence de température</i>	[C]

*Notations grecques*

$\eta$	<i>Rendement</i>	
$\varepsilon$	<i>Efficacité</i>	
$\lambda$	<i>Conductivité thermique</i>	[w/m.C]
$\alpha_{ps}$	<i>Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire</i>	
$\tau_{cs}$	<i>Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire</i>	
$\emptyset$	<i>La puissance d'un échange thermique</i>	[w]

*Indices*

<i>ail</i>	<i>Ailette</i>
<i>max</i>	<i>Maximale flux de chaleur</i>
<i>mini</i>	<i>Minimum flux de chaleur</i>
<i>tub</i>	<i>Tube</i>
<i>éch</i>	<i>Echangeur</i>
<i>cap</i>	<i>Capteur</i>
<i>inst</i>	<i>Installation</i>
<i>lm</i>	<i>Logarithmique moyen</i>

# Sommaire

<b>Dédicace</b> .....	I
<b>Remercîments</b> .....	II
<b>Nomenclature</b> .....	III
<b>Sommaire</b> .....	V
<b>Liste des figures</b> .....	IX
<b>Liste des tableaux</b> .....	XII
<b>Introduction générale</b> .....	2
<b><i>Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeur de chaleur à tubes et à ailettes</i></b>	
I.1. Introduction.....	4
I.2. Première partie .....	4
I.2.1. Capteurs solaires.....	4
I.2.1.1. Introduction.....	4
I.2.1.2. Technologie des capteurs solaires plans.....	4
I.2.1.3. Les différents types des capteurs solaires.....	5
I.2.1.3.1. Les capteurs plans sans vitrage .....	5
I.2.1.3.2. Les capteurs à tubes sous vide.....	5
I.2.1.3.3. Les capteurs à tubes sous vide.....	6
I.2.2. Constituants d'un capteur solaire plan.....	7
I.2.2.1. Une couverture transparente.....	7
I.2.2.2. Le coffre .....	9
I.2.2.3. L'absorbeur.....	9
I.2.2.4. Le fluide caloporteur.....	11
I.2.2.5. L'isolation thermique.....	12
I.2.3. Domaine d'application d'un capteur solaire à eau.....	13
I.3. Deuxième partie .....	14
I.3.1. Echangeurs de chaleurs.. .....	14
I.3.1.1. Introduction.....	14

I.3.1.2.	Différents types d'échangeurs de chaleur.....	14
I.3.1.3.	Echangeurs à tubes et ailettes.....	16
I.3.1.4.	Caractéristiques de transfert de chaleur et de l'écoulement dans un échangeur à tubes à ailettes circulaires.....	18
I.3.2.	Domaine d'application d'un échangeur de chaleur à tube et à ailettes.....	20
I.4.	Conclusion.....	20

## ***Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur***

II.1.	Introduction.....	22
II.2.	Capteur solaire à eau.....	22
II.2.1.	Introduction.....	22
II.2.2.	Fonctionnement d'un capteur solaire à eau.....	22
II.2.3.	Bilan thermique d'un capteur solaire plan.....	23
II.3.	Echangeur de chaleur.....	24
II.3.1.	Introduction.....	24
II.3.2.	Choix d'un échangeur thermique dans l'industrie.....	24
II.3.3.	Mode de fonctionnement ou géométrie d'écoulement des fluides dans un échangeur de chaleur.....	24
II.3.4.	Technologies des échangeurs de chaleur.....	25
II.3.5.	Bilan thermique d'un échangeur de chaleur.....	25
II.3.6.	Evaluation du coefficient d'échange global .....	26
II.4.	Méthode de dimensionnement d'un échangeur de chaleur.....	28
II.4.1.	Méthode de la Différence de Température Logarithmique Moyenne « DTLM.....	28
II.4.2.	Efficacité d'un échangeur .....	30
II.4.3.	Méthode de l'efficacité .....	31
II.5.	Relation entre NUT et efficacité.....	32
II.6.	Conclusion.....	33

## ***Chapitre III : Etude expérimentale***

III.1.	Introduction .....	35
III.2.	Description du banc d'essai.....	35
III.3.	Eléments constituant du dispositif expérimental.....	35

III.4.	Composants du dispositif expérimental.....	36
III.4.1.	Capteur solaire plan à eau.....	36
III.4.2.	Isolation thermique.....	37
III.4.3.	Couverture transparente en verre.....	38
III.4.4.	Echangeur de chaleur à tubes et à ailettes.....	39
III.4.5.	Pompe à eau.....	40
III.4.6.	Tuyauterie et raccordement.....	41
III.5.	Système de remplissage de circuit .....	42
III.6.	Isolation de la tuyauterie multicouche.....	43
III.7.	Instrumentations de mesure.....	43
III.7.1.	Mesure du rayonnement solaire.....	43
III.7.2.	Mesure de vitesse et les températures de l'échangeur.....	44
III.7.3.	Réglage de la vitesse de ventilation.....	44
III.7.4.	Mesure du débit d'eau.....	45
III.7.5.	Mesure des températures du capteur solaire à eau.....	45
III.7.6.	Mesure la puissance électrique de la pompe à et du ventilateur.....	46
III.8.	Principe de fonctionnement de l'installation.....	46
III.9.	Conclusion .....	47

### ***Chapitre IV: Résultats et discussion***

IV.1.	Introduction.....	49
IV.2.	Calcul de la surface d'échange totale de l'échangeur à tubes et à ailettes.	49
IV.3.	Résultats et discussions.....	50
IV.4.	Conclusion.....	68
	<b>Conclusion générale.....</b>	<b>70</b>
	<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>71</b>
	<b>Annex.....</b>	<b>73</b>
	<b>Résumé.....</b>	

## Liste des figures

Figure I.1	Capteurs solaires sans vitrage.....	5
Figure I.2	Capteur solaire avec vitrage.....	6
Figure I.3	Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.....	6
Figure I.4	Capteurs à tube sous vide.....	7
Figure I.5	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.....	7
Figure I.6	Composants d'un capteur solaire plan à eau.....	8
Figure I.7	Capteur solaire à eau installé sur le toit d'une maison.....	13
Figure I.8	Schéma de principe d'un échangeur tubulaire simple co-axial.....	14
Figure I.9	Critères de classification des échangeurs de chaleur.....	15
Figure I.10	Types d'échangeurs de chaleur à ailettes..	16
Figure I.11	Ailettes continues ou indépendantes.....	17
Figure I.12	Ailettes indépendantes ou spiralées.....	17
Figure I.13	Tubes avec des ailettes longitudinales.....	17
Figure I.14	Tubes avec divers types d'ailette externes.....	18
Figure I.15	Échangeur à tubes et à ailettes.....	19
Figure I.16	Arrangement de faisceaux de tubes.....	19
Figure II.1	Schéma de principe d'un capteur solaire plan thermique à eau.....	22
Figure II.2	Résistance d'encrassement thermique.....	27
Figure II.3	Distribution des températures dans un échangeur en mode contre courant.....	29
Figure II.4	Distribution des températures dans un échangeur en mode Co-courant.	29
Figure II.5	Exemple d'abaque donnant le facteur correcteur F pour un échange à tubes et calandre à deux passes. ....	30
Figure III.1	Hall technologie d'université de Biskra.....	35
Figure III.2	capteur solaire plan à eau exposé au rayonnement solaire Incident en direction plein sud. ....	36
Figure III.3	Coupe verticale du capteur solaire.....	37
Figure III.4	réalisation de l'isolation.....	38
Figure III.5	mousse isolante.....	38
Figure III.6	capteur solaire plan à eau avec couverture transparente en verre.....	38
Figure III.7	Echangeur de chaleur à tubes et à ailettes.....	39
Figure III.8	Support métallique de l'échangeur de chaleur fixé par soudage.....	40
Figure III.9	vue intérieur de l'échangeur de chaleur.....	40
Figure III.10	Pompe à eau.....	41
Figure III.11	Tube multicouche.....	41
Figure III.12	Raccord de tube multicouche.....	42
Figure III.13	Système de remplissage du circuit.....	42
Figure III.14	isolation des conduites de raccordement.....	43
Figure III.15	Pyranomètre.....	43
Figure III.16	Anémomètre à hélice.....	44
Figure III.17	Régulateur de tension.....	44

Figure III.18	Débitmètre à flotteur.....	45
Figure III.19	Thermomètre.....	45
Figure III.20	Watt mètre.....	46
Figure III.21	Dispositif expérimental.....	46
Figure IV.1	Un dessin représentatif d'un échangeur à tubes et à ailettes par Programme de conception mécanique solidworks.....	50
Figure IV.2	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel très claire) .....	51
Figure IV.3	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel clair) .....	51
Figure IV.4	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit de d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel très clair). .....	52
Figure IV.5	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel pollué) .....	52
Figure IV.6	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel nuageux) .....	53
Figure IV.7	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel clair + vent fort) .....	53
Figure IV.8	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel très clair) .....	54
Figure IV.9	Variation des températures de d'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel nuageux) .....	54
Figure IV.10	Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel clair) .....	55
Figure IV.11	Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair) .....	56

Figure IV.12	Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair). .....	57
Figure IV.13	Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair) .....	57
Figure IV.14	Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 kg/h	61
Figure IV.15	Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 kg/h	61
Figure IV.16	Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 kg/h	62
Figure IV.17	Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour des débits d'eau égale à 120 kg/h, 90 kg/h et 60 kg/h. ....	62
Figure IV.18	Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 120 kg/h.....	63
Figure IV.19	Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 90 kg/h.....	63
Figure IV.20	Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 60 kg/h.....	64
Figure IV.21	Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h.....	65
Figure IV.22	Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 120 kg/h. ....	66
Figure IV.23	Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 90 kg/h. ....	66
Figure IV.24	Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 60 kg/h.....	67
Figure IV.25	Variation du rendement de l'installation pour un débit d'eau égal 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h. ....	68

## Liste des tableaux

Tableaux I.1	Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge.....	9
Tableaux I.2	caractéristiques optiques de quelques matériaux utilisés comme surfaces absorbante.....	11
Tableaux I.3	Caractéristiques thermo physiques des certains matériaux métalliques	11
Tableaux I.4	Propriétés thermo physiques de quelques matériaux isolant.....	13
Tableaux II.1	Principe de la méthode DTLM.....	28
Tableaux II.2	Principe de la méthode de l'efficacité.....	31
Tableaux II.3	Relation entre NUT et efficacité.....	33
Tableaux II.4	Relation entre NUT et E dans des cas particuliers.....	33
Tableaux III.1	Exemple de tableau de mesure.....	47
Tableaux IV.1	Performances thermiques de l'échangeur calculé pour un débit d'eau= 60 kg/h.....	58
Tableaux IV.2	Performances thermiques de l'échangeur calculé pour un débit d'eau = 90 kg/h.....	58
Tableaux IV.3	Performances thermiques de l'échangeur calculé pour un débit d'eau = 120 kg/h. ....	59
Tableaux IV.4	Performances thermiques de l'échangeur calculé pour des débits d'eau égal à 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h.....	60

***Introduction***

***Générale***

# Introduction générale

---

## Introduction générale

L'énergie solaire est une source naturelle très utile pour la survie et la protection de l'environnement de l'humanité entière, dont l'énergie des photons est transportée les rayons de soleil qui sont transférés vers un milieu froid, Ce milieu est généralement de l'eau ou de l'air.

Dans ce travail théorique et pratique on utilise cette énergie pour chauffer l'eau qui circulera dans une installation constituée d'un capteur solaire plan à eau couplé à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes, destiné à la production d'air chaud pour le chauffage des locaux des bâtiments, notamment en période d'hiver où les températures extérieures sont très basses dans les régions arides et semi arides, cas de la région de Biskra.

Le dispositif expérimental réalisé comporte une installation qui a pour principal objectif la conception d'un système de chauffage des bâtiments par énergie solaire thermique. Il s'agit d'un collecteur d'eau solaire plan couplé à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes, ou la réalisation a été faite dans le hall technologique de département de génie mécanique de l'université de Biskra.

Plusieurs manipulations ont été effectuées durant différentes journées, de ciel très clair, nuageux et parfois polluées et ventées. Le dispositif expérimental utilise l'eau de robinet comme fluide caloporteur circulant à l'intérieur d'un circuit fermé par le moyen d'une pompe à eau, dans le tube absorbeur en forme de serpentin du collecteur solaire et les tubes de l'échangeur, d'autre part, l'air est le second fluide caloporteur, qui circule entre les ailettes et les tubes de l'échangeur de chaleur.

Durant les expérimentations, on a travaillé avec plusieurs valeurs de débits et dans différentes conditions climatiques, dans le but de déterminer les performances thermiques de l'installation, notamment les températures de sorties des deux fluides de travail, l'efficacité de l'échangeur, la quantité de chaleur produite, le rendement thermique et le coefficient de performance de l'installation.

Le travail réalisé est structuré en quatre chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les captures solaires plans et les échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes.

Le deuxième chapitre est dédié la formulation mathématique liée au capteur solaire à eau et les échangeurs de chaleur.

Le troisième chapitre comporte l'étude expérimentale, à travers lequel une description des éléments constitutifs et les moyens de mesure utilisés dans la partie expérimentale.

Le dernier chapitre est réservé aux résultats numériques, l'interprétation et les discussions des résultats expérimentaux obtenus.

# ***CHAPITRE I:***

***Généralités sur les capteurs  
solaires à eau et échangeurs  
de chaleur à tubes et à  
ailettes***

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

## I.1. Introduction :

Ce chapitre comporte deux parties, une première dédiée aux généralités sur le principe d'exploitation de l'énergie solaire thermique pour la production de la chaleur, notamment de l'eau chaude destinée pour diverses applications comme le chauffage, en utilisant les capteurs solaires plans à eau, une brève présentation sur leur fonctionnement et les principaux éléments constitutifs est présentée.

Cette source de chaleur produite par les capteurs solaires, peut être exploitée directement pour le chauffage des bâtiments en périodes d'hivers, où les températures extérieures sont très basses. Généralement intégrés à un groupe de transfert par le biais d'échangeurs de chaleur à plaques et joints pour produire de l'eau sanitaire, ou bien par échangeurs à tubes et à ailettes pour le chauffage, en utilisant un système de ventilation par pompage de l'air.

La deuxième partie est consacrée à des généralités sur les échangeurs de chaleur, notamment à tubes et à ailettes, aux méthodes de dimensionnement, ainsi que l'évaluation des paramètres de performances, telles que l'efficacité et le nombre d'unité de transfert.

## I.2. Première partie :

### I.2.1. Capteurs solaires :

#### I.2.1.1. Introduction

Les capteurs solaires plans transforment l'énergie solaire incidente en énergie thermique extraite par l'air ou l'eau en écoulement dans le capteur. Cette énergie est ensuite utilisée dans diverses applications, à savoir ; le chauffage, la réfrigération, le séchage, etc. [1]

#### I.2.1.2. Technologie des capteurs solaires plans :

- **Les capteurs solaires à eau :** Tous les systèmes de conversion thermique de l'énergie solaire doivent comprendre les éléments constitutifs suivants :
  - ✓ Une surface de captation du rayonnement solaire.
  - ✓ Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie thermique extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides caloporteurs utilisés généralement dont les capteurs plans sont principalement l'eau et l'air.
  - ✓ Un élément de stockage thermique.
  - ✓ Un réseau de distribution.

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

## I.2.1.3. Les différents types de capteurs solaires :

Afin d'intercepter l'énergie provenant du rayonnement solaire, il existe plusieurs catégories de capteurs solaires à conversion thermique. Dans ce qui suit une brève description de trois types de capteurs solaires plans les plus usuels sont présentés.

### I.2.1.3.1. Les capteurs plans sans vitrage :

Sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (1.1) [2].



Figure I.1 : Capteurs solaires sans vitrage [2].

### I.2.1.3.2. Les capteurs plans avec vitrage :

Ce sont des dispositifs sans concentration dans lesquels la surface de l'absorbeur est une plaque métallique de forme plane peinte en noir pour absorber le maximum de rayonnement. Elle est recouverte d'une vitre sur la face avant et isolée sur les faces latérales et arrière pour réduire les déperditions thermiques (figure I.2).

Le rayonnement solaire traversant la vitre est absorbé par l'absorbeur qui s'échauffe et émet des rayons infrarouges. Ces derniers restent piégés dans le capteur par la présence d'une vitre, ce qui forme un véritable effet de serre et permet d'obtenir une isolation thermique efficace sur les autres parois. Pour transporter l'énergie thermique solaire, un fluide caloporteur liquide est véhiculé dans les tubes jusqu'aux points d'utilisation [3].

Ce type des capteurs peut être intégré dans les bâtiments, dont les températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de l'eau chaude sanitaire, particulièrement lorsque les besoins en chauffage sont plus importants, telle que les hôtels, les

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

hôpitaux et l'industrie agro-alimentaire. La figure (I.2) montre le principe de fonctionnement de ce type de capteur [3].



Figure I.2 : Capteur solaire avec vitrage [3].

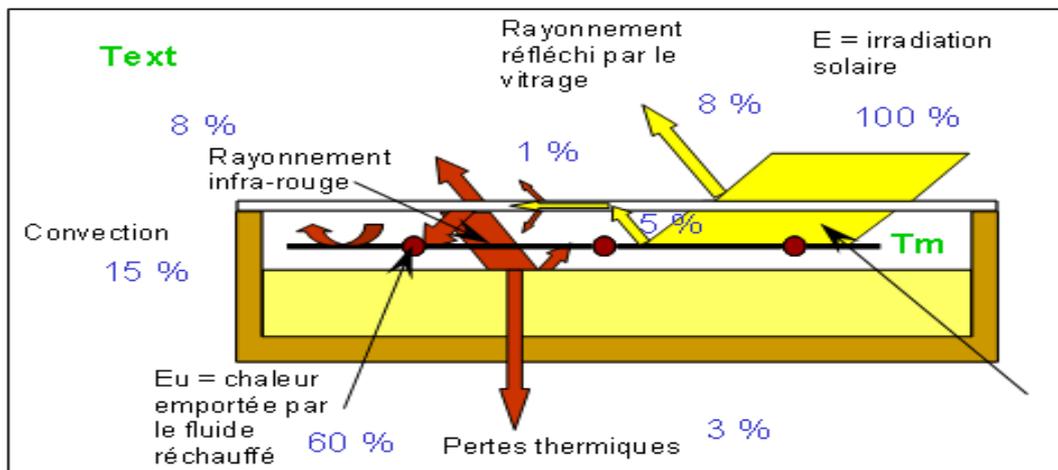


Figure I.3 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [3].

### I.2.1.3.3. Les capteurs à tubes sous vide :

Ces capteurs conviennent pour les applications à température modérée, où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 90°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 [4].

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

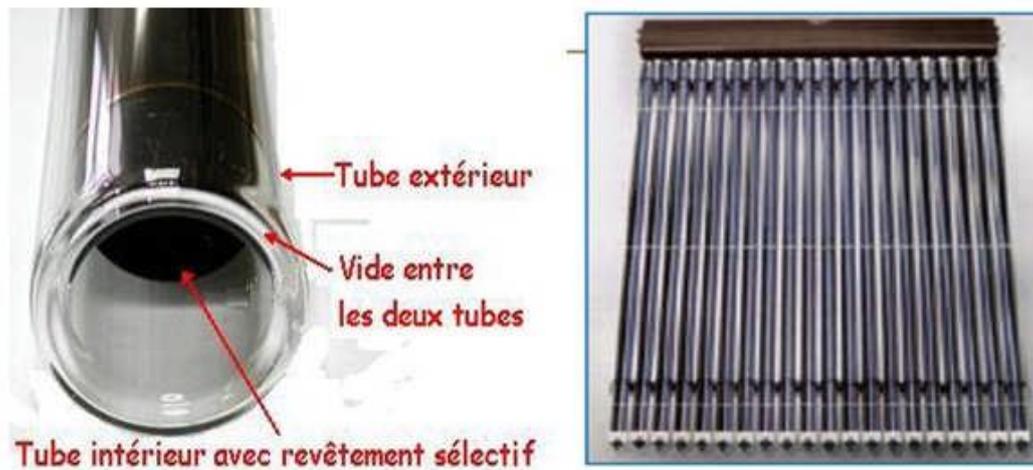


Figure I.4 : Capteurs à tube sous vide [4].

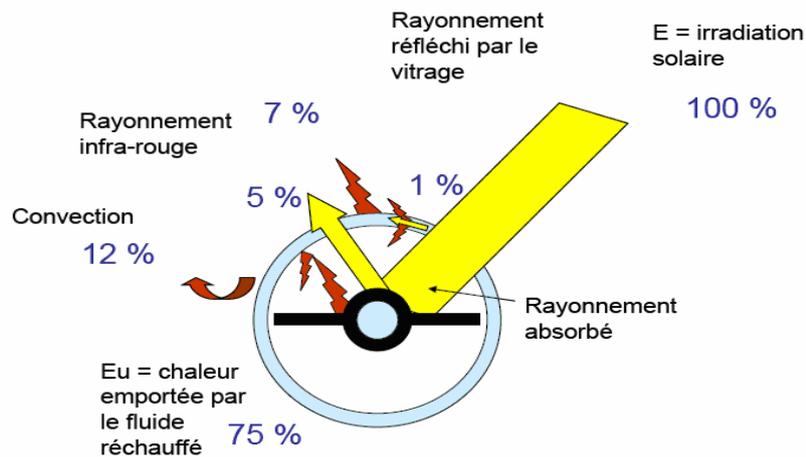


Figure I.5 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [4].

## I.2.2. Constituants d'un capteur solaire plan :

Les matériaux les plus couramment utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. Généralement, un capteur solaire est composé des éléments suivants :

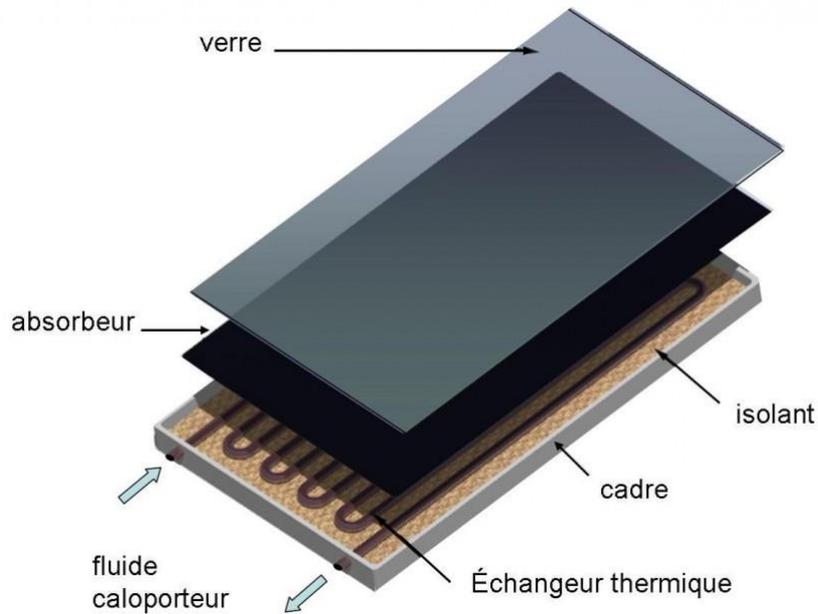
### I.2.2.1. Une couverture transparente :

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est reçu par le plan capteur. L'intérêt d'une couverture transparente est habituelle pour pincer le rayonnement solaire, et de stopper les échanges thermiques par rayonnement dans le domaine de l'infrarouge,

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

notamment avec les températures de fonctionnement élevées. La couverture doit assurer trois fonctions essentielles [5]:



**Figure I.6 :** Composants d'un capteur solaire plan à eau [3].

- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- Transmettre la plus grande part du rayonnement reçu vers la plaque absorbante.
- Réduire les déperditions thermiques par convection et rayonnement.

Cependant les couvertures en verre présentent quelques inconvénients, principalement leur fragilité aux chocs thermique et mécanique, leur poids en fonction de l'épaisseur se traduit par une forte inertie thermique, notamment en présence d'un système de couverture en double vitrage, d'autre part, leur prix est élevé en comparaison avec les autres catégories de couvertures transparentes. Le tableau I.1 fournit quelques indications sur les couvertures transparentes les plus fréquemment employés.

## Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

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

**Tableau I.1** : Propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge [5].

### I.2.2.2. Le coffre :

Le coffre de forme parallélépipédique est fabriqué couramment en aluminium ou en bois, renferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, en les protégeant efficacement contre toute forme d'agression extérieure telle que l'humidité, les vents érosifs, le rayonnement solaire et les effets de détérioration mécanique ou thermique.

### I.2.2.3. L'absorbeur :

L'absorbeur est l'élément principal pour le fonctionnement de tout système de conversion thermique de l'énergie solaire, notamment les capteurs solaires plans, son rôle est d'absorber le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [6].

Pour les capteurs plans à eau, il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être métallique ou en matière plastique en cas de présence d'un milieu agressif qui circule directement dans l'absorbeur, tel que l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques comme absorbeur, entraîne des différences notables comparées aux matériaux métalliques [6]:

- ✓ Les avantages sont :
  - La légèreté.
  - La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.

## Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

- La résistance des matériaux plastiques à la corrosion.
- ✓ Les inconvénients sont :
  - Une mauvaise conductibilité thermique.
  - Un vieillissement dû au rayonnement solaire U.V.
  - Une tenue médiocre aux températures de fonctionnement élevées.

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, l'acier galvanisé et l'aluminium, qui sont en général d'une bonne conductibilité thermique.

Pour un meilleur transfert de chaleur entre le fluide caloporteur et l'absorbeur, ce dernier devrait être mince qui correspond à une faible inertie thermique. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm à 0.4 mm d'épaisseur [7].

D'autre part, Les conduites acheminant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacées; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux, tout en préservant des coûts de fabrication modérés [7].

Le choix adéquat de la nature de l'absorbeur joue un rôle très important pour de bonnes performances thermiques d'un capteur solaire. En effet, l'absorbeur son rôle est de transformer en chaleur le rayonnement solaire incident qu'il reçoit et de le transmettre sous forme de chaleur au fluide caloporteur (air ou eau). Dont les principales qualités sont :

- Facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité,
- Pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible,
- Bonne conductibilité thermique,
- Une faible inertie thermique.
- Une forte résistance chimique vis-à-vis des fluides agressifs.

Les absorbeurs souvent utilisés sont regroupés dans le tableau suivant : On appelle sélectivité le rapport du facteur d'absorption solaire  $\alpha^*$  sur le facteur d'émission infrarouge  $\mathcal{E}$ .

Le tableau (I.2) ci-après donne les propriétés d'absorption vis-à-vis du rayonnement solaire, d'émission thermique et la sélectivité de quelques matériaux utilisés comme état de surface absorbante.

## Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

Etat de surface des différents matériaux	$\alpha^*$	$\varepsilon$	$\alpha^* / \varepsilon$
Cuivre poli	0.25	0.02	12.5
Film plastique recouvert d'or	0.30	0.03	10
Acier poli	0.63	0.09	7
Aluminium anodisé	0.80	0.14	5.71
Nickel brillant	0.34	0.07	4.86
Aluminium poli	0.10	0.04	2.5
Peinture noire (silicate)	0.97	0.88	1.10
Peinture aluminium	0.26	0.26	1
Acier sablé	0.75	0.80	0.94
SSM:Kapton aluminisé de 0.5mm d'épaisseur	0.36	0.52	0.69
Peinture blanche (silicate)	0.14	0.90	0.16
OSR (optical solar reflector)	0.11	0.83	0.13

**Tableau I.2 :** caractéristiques optiques de quelques matériaux utilisés comme surfaces absorbante [5].

Dans le cas des métaux on utilise le plus couramment le cuivre, l'acier inoxydable ou bien l'aluminium, certaines de leurs caractéristiques thermo physiques sont données d'après le tableau (I-3) ci dessous :

Métal	Conductivité Thermique $\lambda(W / m.K)$	Chaleur massique $Cp(J / Kg.K)$	Masse volumique $\rho(Kg / m^3)$	diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho.Cp} 10^{-6} m^2 / s$
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
aluminium	204	879	2700	86

**Tableau I.3 :** Caractéristiques thermo physiques des certains matériaux métalliques [5].

### I.2.2.4. Le fluide caloporteur :

Le fluide caloporteur est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air comme fluide caloporteur a les avantages suivants [6]:

- Manque de problème de gel en hiver et d'ébullition en été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique x capacité calorifique, est faible ( $C_p=1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ ) pour l'air contre  $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$  pour l'eau.
- Les conduites de transport doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

## I.2.2.5. L'isolation thermique :

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en limitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement des différentes parties périphériques vers l'environnement extérieur. Pour cela il est important d'adopter les solutions suivantes :

- **Partie avant de l'absorbeur :** La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm. En plaçant un système constitué de deux vitres permet de limiter les pertes par réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [8].
- **Parties arrière et latérale :** Afin de limiter les pertes thermiques sur les côtés périphériques du capteur, on introduit une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister aux températures de fonctionnement. En plus, un isolant a pour rôle de minimiser les pertes thermiques.

Le choix d'un matériau isolant dépend des caractéristiques suivantes [3] :

- Une bonne résistance aux températures de fonctionnement.
- La constance de ces caractéristiques isolante dans le temps (conductivité thermique faible).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu et à l'eau de pluie....etc.

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

On distingue trois grandes familles d'isolants :

- Isolants minéraux : tel que la pierre ponce " Feldspath", laine de verre et vermiculite.
- Le bois sous forme de fibres agglomérées, le liège, la sciure de bois et les cendres des végétaux, sont des matériaux utilisés comme isolants végétaux.
- Isolants organiques de synthèse telle que la mousse de polyuréthane, la mousse de phénolique, le polystyrène expansé et le chlorure de polyvinyle qui sont les plus souvent utilisés.

Le tableau (I.4) regroupe certaines propriétés thermo physiques de ces isolants :

Matériau	Conductivité Thermique $\lambda(W / m.K)$	Chaleur massique $Cp(J / Kg.K)$	Masse volumique $\rho(Kg / m^3)$	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho.Cp} 10^{-6} m^2 / s$
Air (à 20°C)	0.025	1.2	1003	208
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Laine de roche	0.040	40	840	11.9
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc pur	0.153	1200	2170	0.6
PVC	0.166	1380	1000	1.2

**Tableau I.4 :** Propriétés thermo physiques de quelques matériaux isolant [5].

## I.2.3. Domaine d'application d'un capteur solaire à eau :

Les panneaux solaires à conversion thermiques peuvent être utilisés dans différents domaines d'applications pour produire de l'énergie thermique, comme le chauffage des serres, des piscines, de l'eau sanitaire, des locaux, climatisation solaire, etc....



**Figure I.7 :** Capteur solaire à eau installé sur le toit d'une maison [9].

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

## I.3. Deuxième partie :

### I.3.1. Echangeurs de chaleurs :

#### I.3.1.1. Introduction :

Un échangeur de chaleur est un dispositif qui facilite le transfert de chaleur entre deux fluides ou plus des températures différentes. Le transfert peut s'effectuer par l'intermédiaire ou non d'un milieu solide. Dans certains appareils, l'échange de chaleur est accompagné avec à un changement de phase de l'un des fluides mise en jeu, tel est le cas des condenseurs, évaporateurs, bouilleurs, etc.....

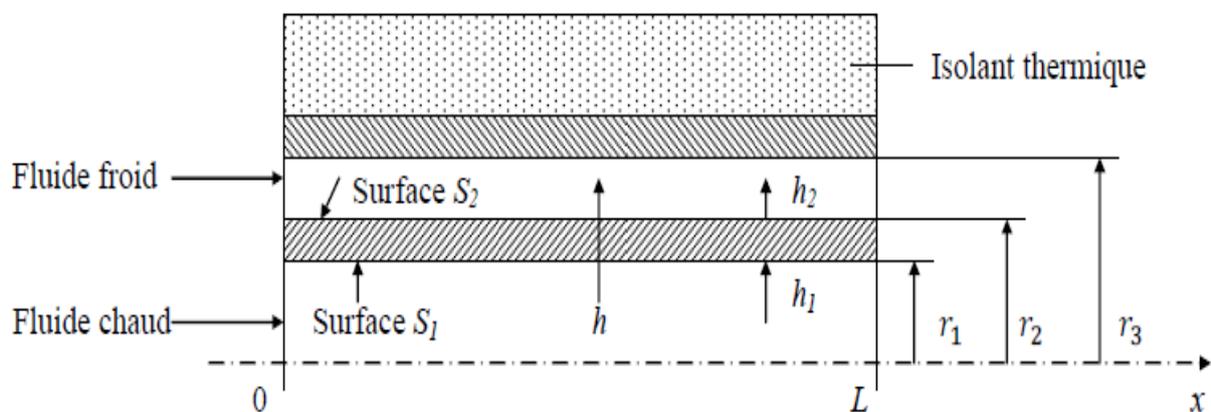


Figure I.8 : Schéma de principe d'un échangeur tubulaire simple co-axial [9].

#### I.3.1.2. Différents types d'échangeurs de chaleur :

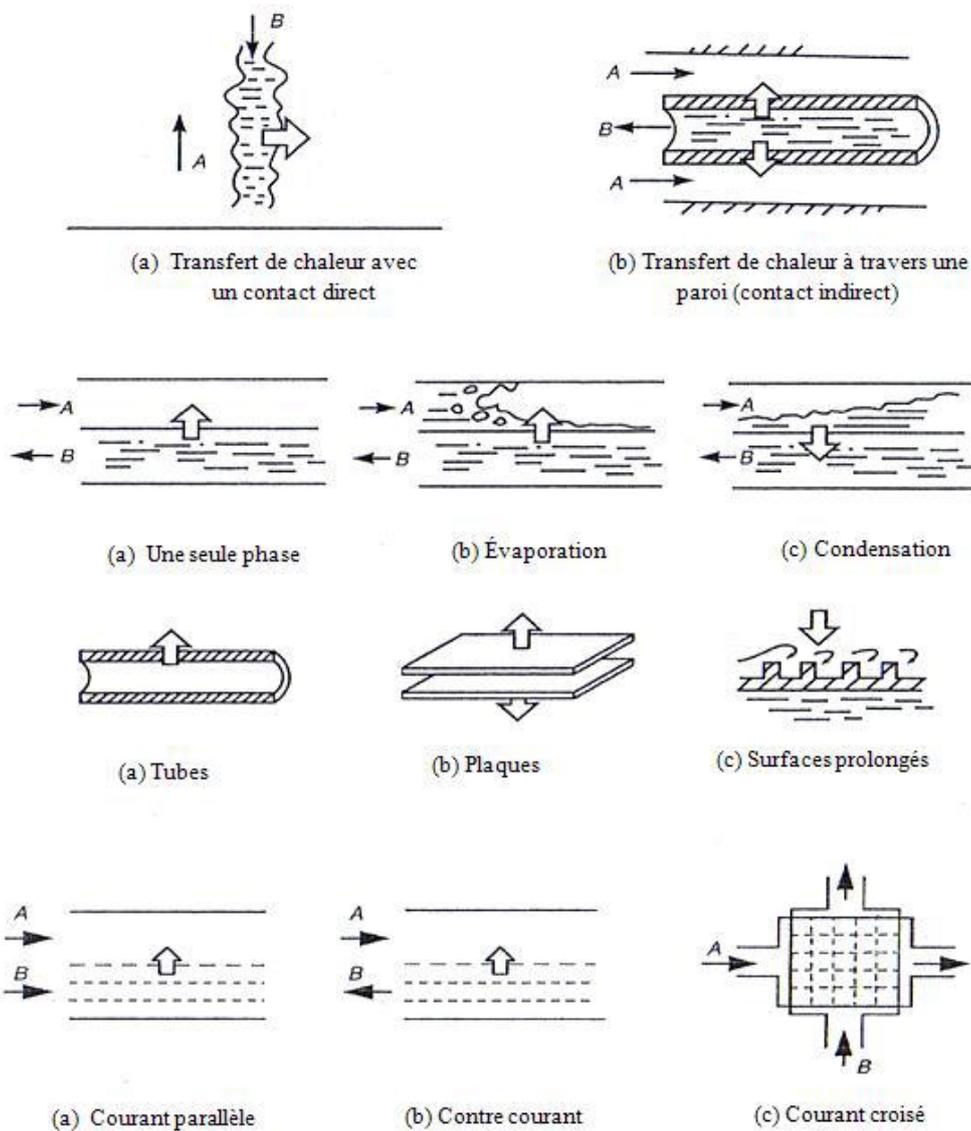
Il existé une grande variété d'échangeur de chaleur qui se diversifient suivant leurs fonctions et leurs construction. La conception d'un échangeur de chaleur est basée sur la considération de plusieurs paramètres, particulièrement la température de fonctionnement, la pression de service des fluides mise en jeu, la loi de variation des propriétés thermo-physiques et agressivité de ces fluides, de la maintenance et d'encombrement. Il est évident que le choix adéquat d'un échangeur bien adapté à sa fonction, bien dimensionné, bien réalisé et utilisé, permet un gain de rendement et d'énergie utilisée lors d'un procédés industriel quelconque. [9]

La classification des échangeurs de chaleur peut se faire suivant un grand nombre de critères, tels que :

- Processus de transfert : contact direct et contact indirect.
- Construction de la géométrie : tubes, plaques et surfaces à ailettes.
- Mécanisme de transfert de chaleur : sans changement de phase, monophasique ou diphasique.
- Arrangement de l'écoulement : contre courant, courant parallèle, croisé ou mixte.

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

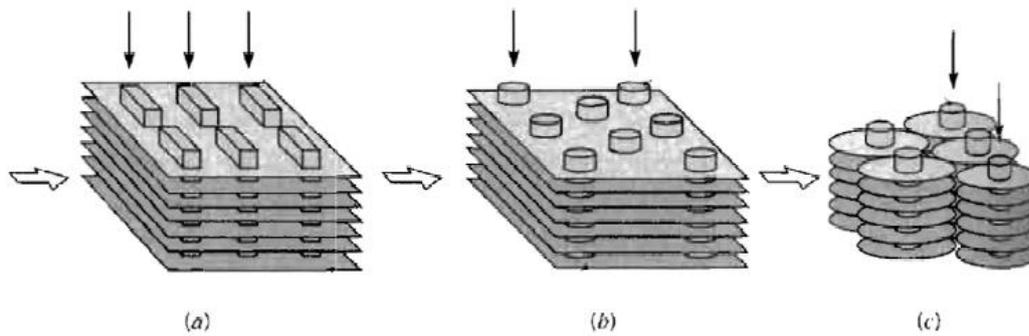
Les quatre critères précédents sont illustrés dans la figure (I.9).



**Figure I.9 :** Critères de classification des échangeurs de chaleur [9].

Du fait de leur compacité d'échange thermique, la configuration d'échangeurs de type tubes et ailettes est la plus utilisée dans la climatisation, le chauffage et le conditionnement d'air. Des exemples de ces géométries sont montrés d'après la figure (I.10) ci-après.

## Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes



**Figure I.10 :** Types d'échangeurs de chaleur à ailettes ; (a) tubes rectangulaires à ailettes et plaques continues ; (b) tubes circulaires avec ailettes et plaques continues ; (c) tubes circulaires avec ailettes circulaires indépendantes [9].

### I.3.1.3. Echangeurs à tubes et ailettes :

Lors de l'écoulement de fluides avec transfert de chaleur, lorsque l'un des deux fluides utilisés s'avère moins bon caloporteur que l'autre à cause de ses propriétés thermo-physiques médiocres (eau et air), l'utilisation d'ailettes semble très nécessaire autour des tubes et parfois à l'intérieur des tubes afin que la résistance thermique globale ne soit pas due au fluide ayant le plus petit coefficient d'échange. C'est essentiellement le cas dans les échangeurs gaz - liquide et liquide - gaz utilisés dans la récupération des calories contenues dans les fumées ou gaz chauds ou dans les différents systèmes thermodynamiques, tels que les pompes à chaleurs, les groupes de production de froid et dans les procédés de stockage de la chaleur dans les milieux granulaires tel que sable - air.

L'ailettement est souvent effectué extérieurement des tubes du côté du fluide caloporteur le moins bon tels que l'air, pour diminuer l'écart de température entre les résistances thermiques internes et externes. Le fluide caloporteur ayant un bon coefficient d'échange circule par contre à l'intérieur des tubes. Les ailettes peuvent avoir différentes formes et sont disposés suivant diverses modes de disposition.

- **Ailettes continues** : traversées par plusieurs tubes, de formes généralement rectangulaire, elles peuvent être planes ou ondulées fig. (I.11), la forme ondulée provoque une perturbation dans l'écoulement pour améliorer l'échange thermique.
- **Ailettes indépendantes** : traversées par un seul tube, peuvent être pleines ou segmentées fig. (I.11), de formes diverses généralement annulaires ou hélicoïdales spiralées, situées à l'intérieur ou l'extérieur des tube afin d'intensifier le processus d'échange thermique. Obtenues par enroulement d'un ruban serti ou soudé sur le tube, et qui sont disposées en quinconce à pas triangulaire ou en ligne fig.(I.14), adaptées aux grandes longueurs de tubes.

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

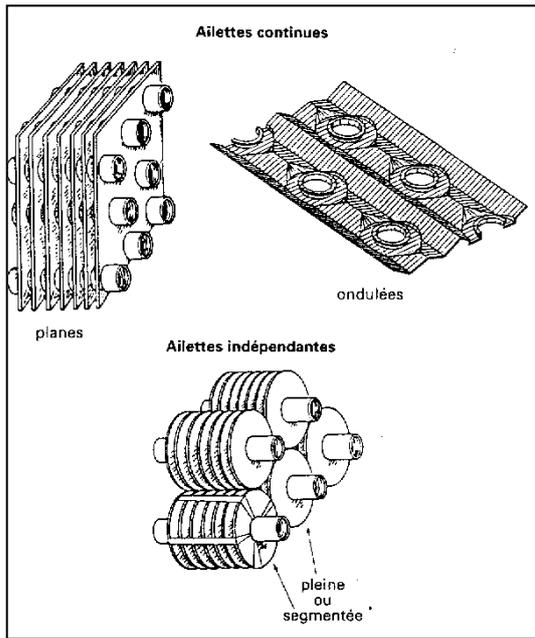


Figure I.11 : Ailettes continues ou indépendantes [10].

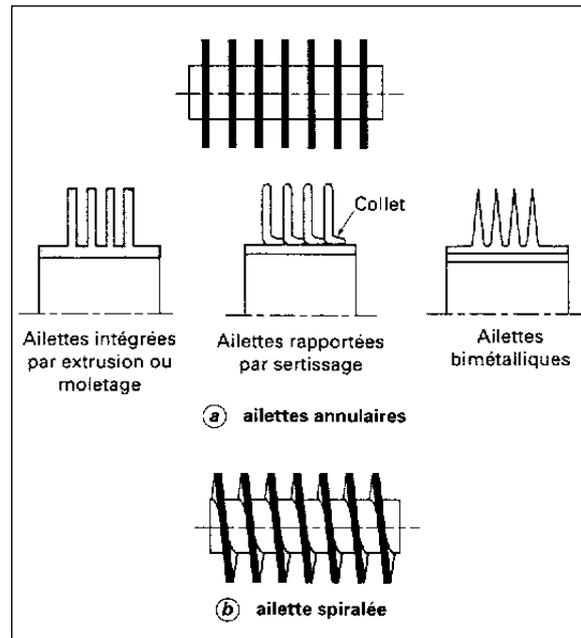


Figure I.12 : Ailettes indépendantes ou spiralées [10].

- **Ailettes longitudinales** : Les ailettes sont disposées longitudinalement suivant l'axe des tubes, situées à l'intérieur ou à l'extérieur des tubes fig. (I.13), leur rôle est amélioré le transfert de chaleur, les ailettes sont parfois enroulées et tordues [10].

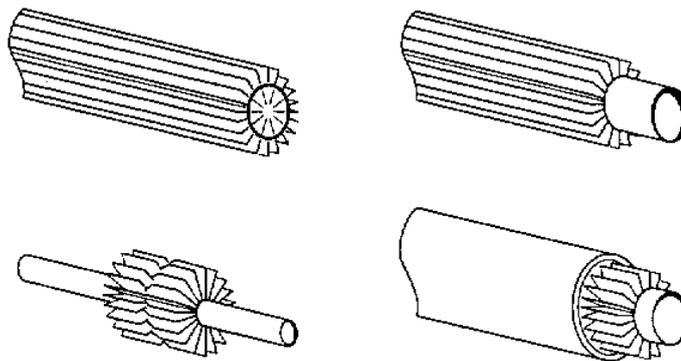
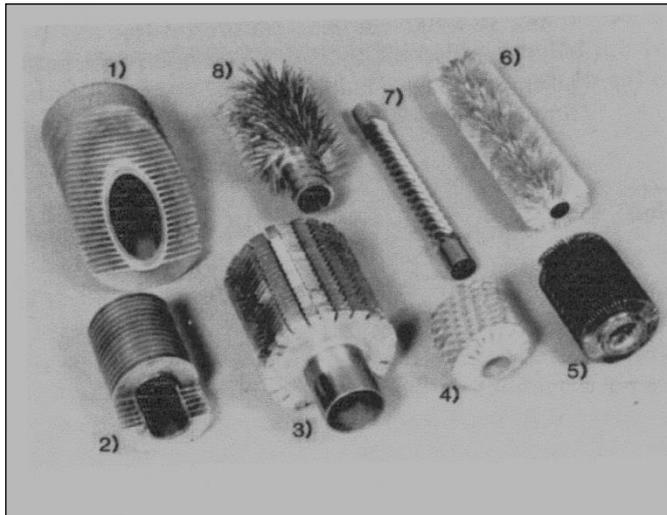


Figure I.13 : Tubes avec des ailettes longitudinales [10].

## Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes



① et ② tube avec ailettes circulaires externes dont l'épaisseur est constante

③ et ④ ailettes circulaires dentelés et enroulées en spirale embourbée.

⑤ ailettes en cuivre enroulé en spirale à l'extérieur et à l'intérieur.

⑥ et ⑧ ailettes usinées en métal, enroulées en spirale.

⑦ tube en spirale dentelée prévue pour améliorer la convection aussi bien que pour intensifier la surface d'échange.

Figure I.14 : Tubes avec divers types d'ailette externes [11].

### I.3.1.4. Caractéristiques de transfert de chaleur et de l'écoulement dans un échangeur à tubes à ailettes circulaires :

Le but fondamental dans la conception thermique d'un échangeur de chaleur est la détermination de la surface d'échange requise pour transférer la chaleur aux températures de liquide et aux débits d'écoulement. Plusieurs études considèrent que toute la surface des faisceaux des tubes à ailettes et le coefficient de transfert de chaleur  $h$  est strictement liés et régis par la disposition et la forme d'ailettes et des tubes. Par conséquent, il est important d'assurer que l'augmentation de la surface d'ailette doit être mise en application sans causer la diminution du coefficient de transfert de chaleur.

Il est évident que la surface d'ailette puisse être améliorée en augmentant la hauteur des ailettes et le nombre d'ailettes par mètre d'échange. Par la nature des distributions de la température sur l'ailette, la différence de la température entre le gaz ambiant et l'ailette diminuera également en raison des pertes continues par convection de la surface ailette.

D'autre part, la réduction de l'espacement entre les ailettes produit de faibles coefficients de transfert de chaleur, cette tendance dépend de l'évolution de la couche limite, qui se pose en conformité avec la vitesse et la turbulence de l'écoulement dans l'espace entre ailette. En outre, le problème relatif à l'ensemble de configurations et l'effet de profondeur de faisceau des tubes ne doit pas être négligé Figure (I.15) et figure (I.16).

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

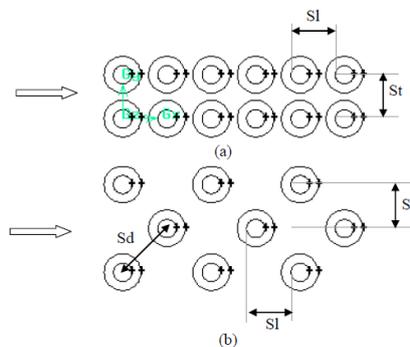
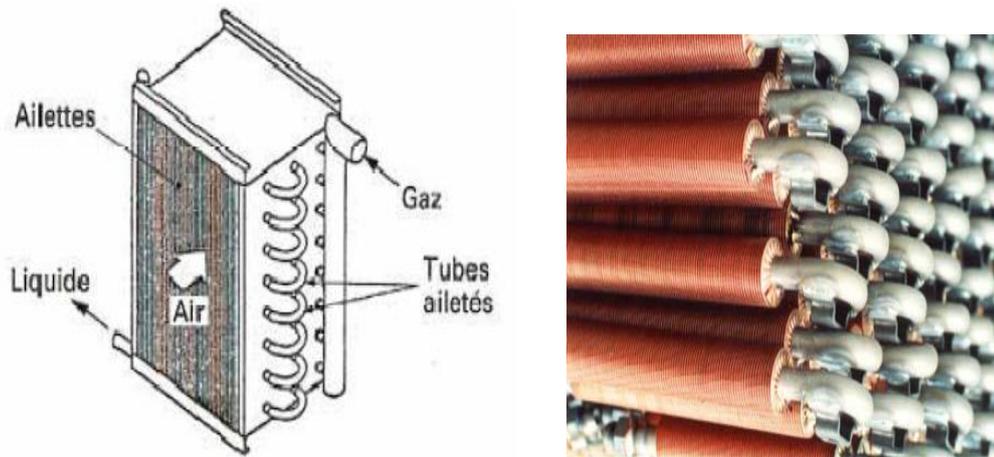


Figure I.16 : Arrangement de faisceaux de tubes

(a) Arrangement en ligne, (b) Arrangement en quinconce [9].

Il y a sept variables géométriques qui influencent le coefficient de transfert de chaleur et de frottement d'une ailette plate [12]. Sans considération de la forme d'ailettes et la disposition des tubes dans le faisceau, ces variables géométriques sont :

- Hauteur d'ailettes ( $h_f$ )
- Espacement d'ailettes ( $s$ )
- Epaisseur d'ailettes ( $\delta$ )
- Diamètre de tube extérieur ( $d$ )
- Pas transversal ( $St$ )
- Pas longitudinal ( $S$ )
- Nombre de rangés ( $n$ )

# Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires à eau et échangeurs de chaleur à tubes et à ailettes

---

En outre, les variables thermo hydrauliques sont :

- Vitesse du fluide gaz ( $U$ )
- Densité ( $\rho$ )
- Viscosité ( $\mu$ )
- Conductivité thermique ( $\lambda$ )
- Chaleur spécifique ( $C_p$ )

## I.3.2. Domaine d'application d'un échangeur de chaleur à tube et à ailettes :

Ce type d'échangeur est utilisé pour le chauffage dans les bâtiments, de l'eau est chauffée dans l'installation de chauffage et circule dans des radiateurs qui sont des échangeurs à ailettes. On utilise également ce type d'installation pour refroidir les moteurs de voiture ou encore les moteurs en tout genre. Dans ce dernier cas, la chaleur due aux frottements et à l'induction magnétique (cas d'un moteur électrique) est directement transférée à la protection extérieure du moteur qui possède des ailettes fixées à sa surface. [14].

Avantages	Inconvénients	Utilisations
<ul style="list-style-type: none"><li>• Bon rendement</li><li>• Peut prendre des formes précises</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Craint les chocs</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Eau/Air</li><li>• Huile/Air</li><li>• Solide/Air</li></ul>

## I.4. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre une étude générale sur les capteurs solaires, les éléments constitutants et le domaine d'utilisation, également l'importance industrielle des échangeurs de chaleur. Il existe différents types d'échangeurs de chaleur qui ont de nombreuses applications dans les différents domaines.

Dans ce chapitre, on s'est intéressé aux échangeurs à tubes et à ailettes, en effet ce dernier est l'élément essentiel constituant l'installation expérimentale réalisé par nous même. Cette installation est destinée pour la production de l'énergie thermique solaire pour des applications de chauffage des bâtiments en particulier.

# ***CHAPITRE II:***

***Théorie sur les capteurs  
solaires plans à eau et  
échangeurs de chaleur***

# Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

## II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré au principe de fonctionnement des capteurs solaires plans à eau et aux échangeurs de chaleur, ainsi qu'au calcul du rendement et de l'efficacité thermique de ces dispositifs qui sont destinés à la production de l'eau chaude sanitaire et au transfert de l'énergie thermique dans différents domaines, notamment pour la satisfaction des conditions du confort thermique des bâtiments.

## II.2. Capteur solaire à eau :

### II.2.1. Introduction :

Le capteur solaire qui transforme le rayonnement solaire en énergie thermique a pour fonction de transformer la plus grande quantité possible de rayonnement solaire incident en énergie thermique et de la transférer à un fluide caloporteur.

### II.2.2. Fonctionnement d'un capteur solaire à eau :

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan à eau est très simple comme il est représenté sur la figure (II.1) [15]. Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective ou peinte en noir, où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise au consommateur.

Le rendement thermique d'un capteur solaire plan est exprimé par la relation suivante :

$$\eta = \frac{m \cdot C_p \cdot (T_s - T_e)}{I_G \cdot S_c} \quad (\text{II.1})$$

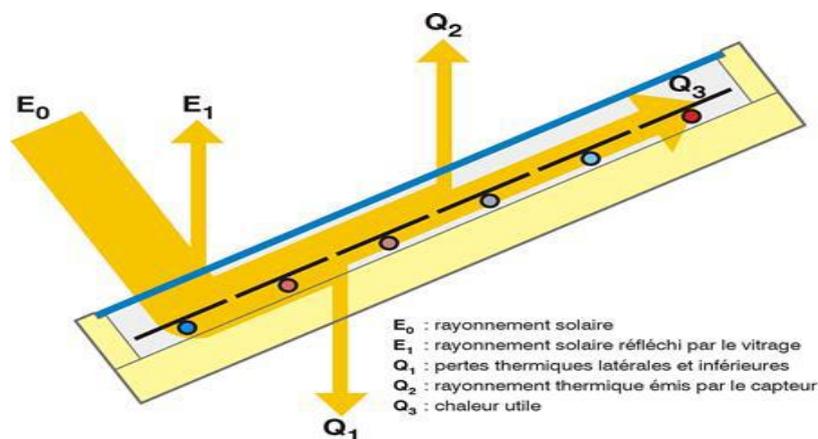


Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan thermique à eau [15].

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

### II.2.3. Bilan thermique d'un capteur solaire plan :

Le bilan thermique de la paroi absorbante s'écrit :

$$\Phi_{sa} = \Phi_p + \Phi_u + \Phi_{st} \quad (\text{II.2})$$

Où :  $\Phi_{sa}$ : étant l'énergie solaire absorbée par le capteur.

$\Phi_p$  : Flux perdu par la paroi absorbante

$\Phi_u$  : Flux utile transmis au fluide caloporteur

$\Phi_{st}$  : Flux stocké dans les éléments du capteur.

La puissance absorbée par le capteur solaire  $\Phi_{sa}$  s'écrit :

$$\Phi_{sa} = \tau_{cs} \cdot \alpha_{ps} \cdot I_G \cdot S_c \quad (\text{II.3})$$

$I_G$ : Eclairement solaire incident absorbé par le plan capteur (W/m<sup>2</sup>).

$\alpha_{ps}$ : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

$\tau_{cs}$ : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement solaire

$S_c$  : Surface de la paroi absorbante (m<sup>2</sup>).

Le coefficient d'échange global qui regroupant les différents échanges thermiques ayant lieu dans un capteur solaire plan à eau s'écrit :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{c,p-c} + h_{r,p-c}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{r,a-c}} + \frac{e}{\lambda}} + \frac{1}{\frac{e}{\lambda \cdot S} + \frac{1}{h_{vent}}} \quad (\text{II.4})$$

K : coefficient d'échange global (W/m<sup>2</sup>.K).

$h_{c,p-c}$  : Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture (W/m<sup>2</sup>.K).

$h_{vent}$  : (W/m<sup>2</sup>.K)

$h_{r,p-c}$  : Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture (W/m<sup>2</sup>.K).

## **Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur**

---

$h_{r,a-c}$  : Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture ( $W/m^2.K$ ).

$\lambda$  : La conductivité thermique ( $W/m^2.K$ ).

### **II.3.Echangeur de chaleur :**

#### **II.3.1.Introduction :**

Chaque fois qu'on a besoin de réchauffer ou de refroidir un fluide à l'aide d'un autre fluide on utilise les échangeurs thermiques. Ces dispositifs permettent le transfert de chaleur entre les deux fluides à des températures différentes. Ils doivent présenter une grande surface d'échange de chaleur pour une grande efficacité thermique.

Les matériaux composant l'échangeur thermique doivent être les plus conducteurs possible afin de favoriser l'échange thermique.

#### **II.3.2.Choix d'un échangeur thermique dans l'industrie :**

Le choix d'un modèle d'échangeur thermique pour une application industrielle quelconque, Il faut considérer les caractéristiques de l'application et la technologie de l'échangeur.

Pour le bon d'un échangeur de chaleur, il faut connaître les principales spécificités de l'application au sein de laquelle il sera mis en place, en considérant les points suivants :

- La place de l'échangeur : Quel rôle jouera l'échangeur ? A quoi sert-il ? Quelle place occupera-t-il dans l'installation ?
- Le type de fluides : Il est nécessaire de connaître toutes les caractéristiques des fluides qui circuleront dans l'échangeur. S'agit-il d'un gaz ou d'un liquide.
- Les fluides utilisés sont-ils visqueux ? Salé ?
- Les températures d'entrées et de sorties : C'est la suite des informations sur les fluides : à quelle température entrent-ils? et à quelle température faut-il qu'ils sortent?
- Les débits d'entrée et de sortie : Il faut également savoir à quelle pression et à quel débit les fluides entrent et sortent de l'échangeur.
- La perte de charge : Cela désigne la pression qu'il est possible de perdre dans l'échangeur durant la circulation des deux fluides caloporteur.

#### **II.3.3.Mode de fonctionnement ou géométrie d'écoulement des fluides dans un échangeur de chaleur :**

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

Il existe différents modes de fonctionnement qui sont relatif à l'écoulement des deux fluides caloporteurs mises en jeu, on cite principalement :

- L'écoulement à courant parallèle ou co-courant, où les deux fluides s'écoulent dans la même direction.
- Le mode d'écoulement à contre courant : les deux fluides circulent dans le sens inverse.
- L'écoulement à courant croisés : les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à par rapport à l'autre. Le sens d'écoulement n'a pas d'importance.

### II.3.4. Technologies des échangeurs de chaleur :

Les principaux types d'échangeurs rencontrés dans la pratique sont les suivants :

- A plaques et joints.
- A tubes et à ailettes.
- A tubes : monotubes, coaxiaux ou multitubulaires.
- A tubes et calandres

Le dimensionnement d'un échangeur de chaleur est basé sur certaines analyses, il est nécessaire de les prendre en considération avant d'entamer une étude de conception d'échangeurs thermiques.

Le dimensionnement d'un échangeur de chaleur repose principalement sur le calcul du bilan thermique, également sur la prise en compte des pertes de charges. [16], [17]

### II.3.5. Bilan thermique d'un échangeur de chaleur :

La puissance d'un échangeur thermique est le flux de chaleur perdu par le fluide chaud et instantanément récupéré par le fluide froid pendant la circulation des deux fluides le long de l'échangeur. Le bilan thermique s'écrit sous la forme suivante qui découle de la notion de conservation de l'énergie:

$$\dot{Q} = Q_f = - Q_c \quad (\text{II.5})$$

Autrement :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \cdot C p_c \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = \dot{m}_f \cdot C p_f \cdot (T_{sf} - T_{ef}) \quad (\text{II.6})$$

On désigne le débit thermique unitaire de chaque fluide dit aussi débit de capacité par les expressions suivantes :

Pour le fluide chaud l'expression du débit de capacité s'écrit :

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

$$q_{tc} = \dot{m}_c \cdot Cp_c \quad (\text{II.7})$$

Pour le fluide froid :

$$q_{tf} = \dot{m}_f \cdot Cp_f \quad (\text{II.8})$$

Donc l'équation du bilan thermique « puissance » devient :

$$\Phi = q_{tc} \cdot (T_{ce} - T_{cs}) = q_{tf} \cdot (T_{sf} - T_{ef}) \quad (\text{II.9})$$

Si :  $q_{tc} < q_{tf}$  donc  $q_{tc} = q_{tmin}$

Si :  $q_{tf} < q_{tc}$  donc  $q_{tf} = q_{tmin}$

Le fluide qui a le plus petit débit thermique unitaire subit l'écart de température le plus important, il présente une quantité de chaleur maximale qui pourra être échangée, par conséquent il commande le transfert. Cette quantité de chaleur maximale est dite la puissance maximale, étant défini par :

$$\text{Si, } \Phi_{max} = q_{tmin} \cdot T_{max} \quad \text{avec } T_{max} = T_{ce} - T_{fe} \quad (\text{II.10})$$

### II.3.6. Evaluation du coefficient d'échange global :

La connaissance du coefficient d'échange global est très important dans les calculs des échangeurs de chaleur, ce paramètre est régi par l'expression qui donne le flux de chaleur échangé par les deux fluides [17], tel que :

$$\Phi = k \cdot S \cdot (T_c - T_f) \quad (\text{II.11})$$

Avec K étant le coefficient d'échange global de transfert de chaleur, qui mis en jeu trois résistances [17]:

- La convection dans le fluide chaud, régi par un coefficient de convection  $h_c$  permettant de définir une résistance thermique convective appelée  $R_{th1}$  :

$$R_{th1} = \frac{1}{h_c} \quad (\text{II.12})$$

- La convection dans le fluide froid, régi par un coefficient de convection  $h_f$  permettant de définir une résistance thermique convective appelée  $R_{th2}$  :

$$R_{th2} = \frac{1}{h_f} \quad (\text{II.13})$$

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

- La conduction à travers la paroi de séparation d'épaisseur  $e$  et de conductivité thermique  $\lambda$  permettant de définir une résistance thermique de conduction appelée  $R_{th3}$  :

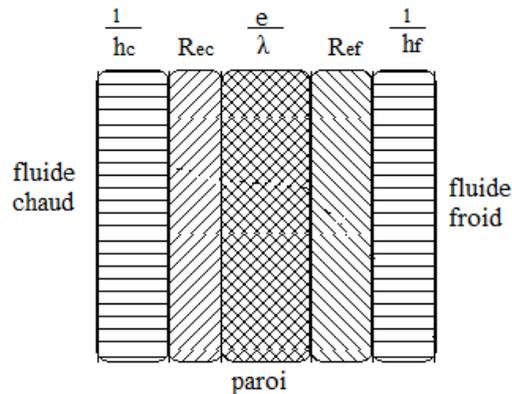
$$R_{th3} = \frac{e}{\lambda} \quad (\text{II.14})$$

Par conséquent l'expression du coefficient d'échange global est défini par :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + \frac{1}{h_f} + \frac{e}{\lambda}} \quad (\text{II.15})$$

La performance réelle d'un échangeur est déduite dans les calculs par le coefficient d'échange global, qui englobe une résistance thermique supplémentaire induite par l'encrassement durant le fonctionnement à long terme, notamment avec des températures élevées, ou les fluides de travail provoquent des dépôts de couches minces de tartre sur les parois internes des conduites. On désigne par :

- $R_{ec}$  : la résistance d'encrassement coté fluide chaud.
- $R_{ef}$  : la résistance d'encrassement coté fluide froid.



**Figure II.2** : Résistance d'encrassement thermique.

En ajoutant les résistances d'encrassement à l'équation du coefficient d'échange thermique global, il devient par conséquent sous la forme :

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_c} + R_{ec} + \frac{1}{h_f} + R_{ef} + \frac{e}{\lambda}} \quad (\text{II.16})$$

De telle sorte que le flux thermique transféré du fluide chaud au fluide froid est donné par l'expression:

$$\Phi = \frac{S \cdot (T_c - T_f)}{\frac{1}{h_c} + R_{ec} + \frac{1}{h_f} + R_{ef} + \frac{e}{\lambda}} \quad (\text{II.17})$$

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

### II.4. Méthode de dimensionnement d'un échangeur de chaleur [16], [17] :

L'étude d'un échangeur peut se faire selon deux méthodes différentes :

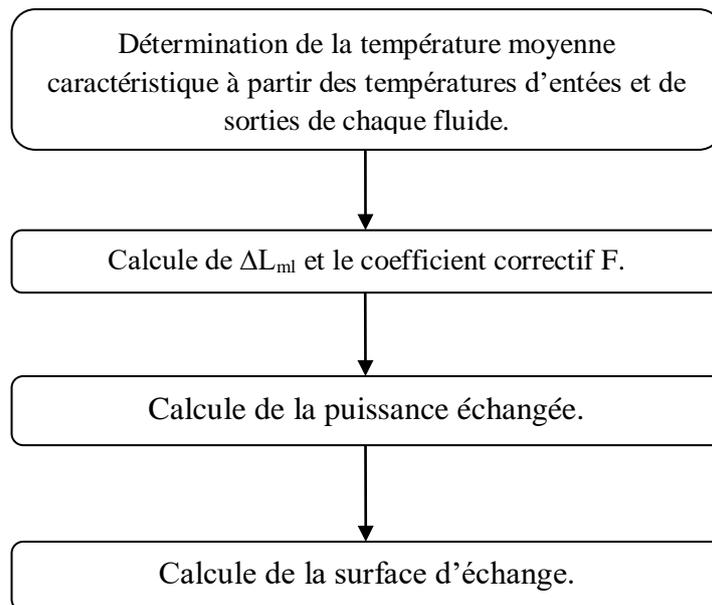
- Méthode de la différence moyenne logarithmique DTML.
- Méthode du nombre d'unité de transfert : NUT, appelée méthode de l'efficacité.

La première méthode est destinée au dimensionnement d'un appareil durant la phase de conception, en connaissant les quatre températures des fluides (entrée et sortie de l'échangeur), c'est-à-dire on recherche la géométrie (conception) de l'échangeur.

La deuxième méthode qui est utilisée pour simuler un échangeur existant, dont on connaît les températures d'entrée des deux fluides et on recherche les températures de sortie.

#### II.4.1. Méthode de la Différence de Température Logarithmique Moyenne « DTLM

Le déroulement de calcul de cette méthode peut être schématisé comme suite :



**Tableaux II.1:** Principe de la méthode DTLM [17].

L'étude de la différence moyenne de température dans un échangeur thermique s'effectuera en supposant que le coefficient global de transfert est constant en tout point, ainsi que les chaleurs spécifiques des fluides, qu'il n'y a ni pertes thermiques, ni changement de phases au cours du transfert. Dans ces conditions l'expression de la puissance thermique ou du flux de chaleur transféré du fluide chaud au fluide froid à travers une surface est exprimée par :

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

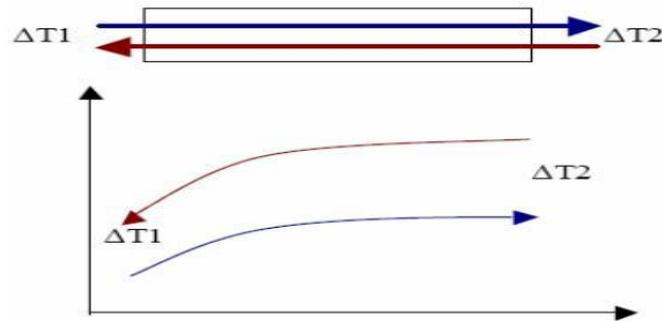
---

$$\phi = K.S.\Delta T_{lm} \quad (\text{II.18})$$

Soit :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}} \quad (\text{II.19})$$

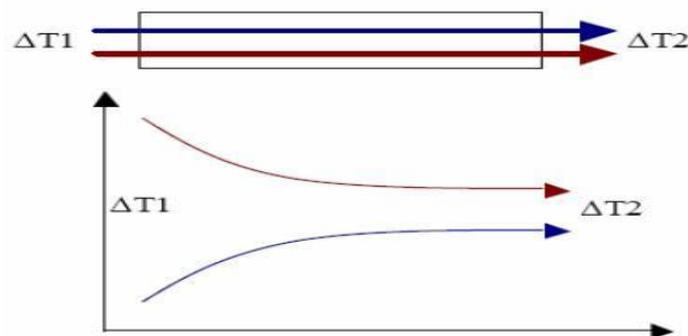
Pour un échangeur contre-courant  $\Delta T_{lm}$  est sous la forme :



**Figure II.3** : Distribution des températures dans un échangeur en mode contre courant.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{ce} - T_{fs}) - (T_{cs} - T_{fe})}{\ln \frac{(T_{ce} - T_{fs})}{(T_{cs} - T_{fe})}} \quad (\text{II.20})$$

Et pour un échangeur Co-courant  $\Delta T_{lm}$  est sous la forme :



**Figure II.4** : Distribution des températures dans un échangeur en mode Co-courant.

$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{ce} - T_{fe}) - (T_{cs} - T_{fs})}{\ln \frac{(T_{ce} - T_{fe})}{(T_{cs} - T_{fs})}} \quad (\text{II.21})$$

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

### Remarque :

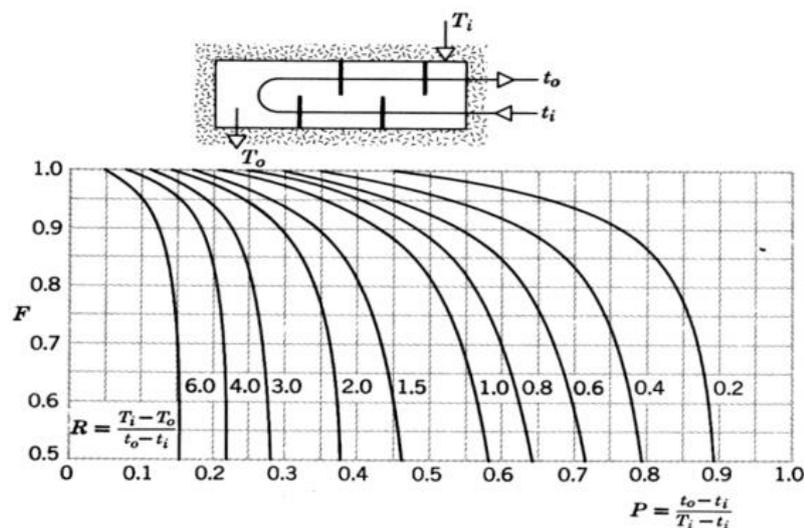
Pour les échangeurs plus complexes que le type contre-courant ou co-courants pur, la puissance évaluée selon la méthode DTLM ne représente plus exactement la différence de température moyenne effectuée. On continue cependant à calculer  $\Delta T_{lm}$  comme s'il s'agissait d'un échangeur à contre-courant ou co-courant pur, en corrigeant le résultat obtenu, par l'introduction d'un facteur dit facteur correctif F tenant compte de la véritable configuration des écoulements.

Autrement la puissance transférée de part et d'autre des deux fluides caloporteur dans l'échangeur est sous la forme :

$$\Phi = K.S.F.\Delta T_{lm} \quad (\text{II.22})$$

F est le Facteur de correction pour le cas d'un échangeur constitué d'une calandre et un multiple de 2 passes de tubes.

La littérature fournit les valeurs de "F" sous la forme d'abaques pour la plupart des configurations courantes d'écoulements.



**Figure II.5 :** Exemple d'abaque donnant le facteur correcteur F pour un échange à tubes et calandre à deux passes.

### II.4.2. Efficacité d'un échangeur :

L'efficacité d'un échangeur de chaleur est définie comme étant le rapport du flux de chaleur réellement échangé entre les deux fluides, au flux maximum qui pourrait être échangé dans l'échangeur.

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

$$\varepsilon = \frac{\Phi}{\Phi_{max}} \quad 0 < \varepsilon < 1 \quad (\text{II.23})$$

D'où :

$$\varepsilon = \frac{q_{tc} \cdot (T_{ce} - T_{cs})}{q_{min} \cdot (T_{fs} - T_{fe})} = \frac{q_{tf} \cdot (T_{fs} - T_{fe})}{q_{min} \cdot (T_{ce} - T_{cs})} \quad (\text{II.24})$$

Dans le cas où  $q_{tc} < q_{tf}$  ce qui implique que  $q_{tc} = q_{min}$  on dit que le fluide chaud commande le transfert, l'expression de l'efficacité prend la forme :

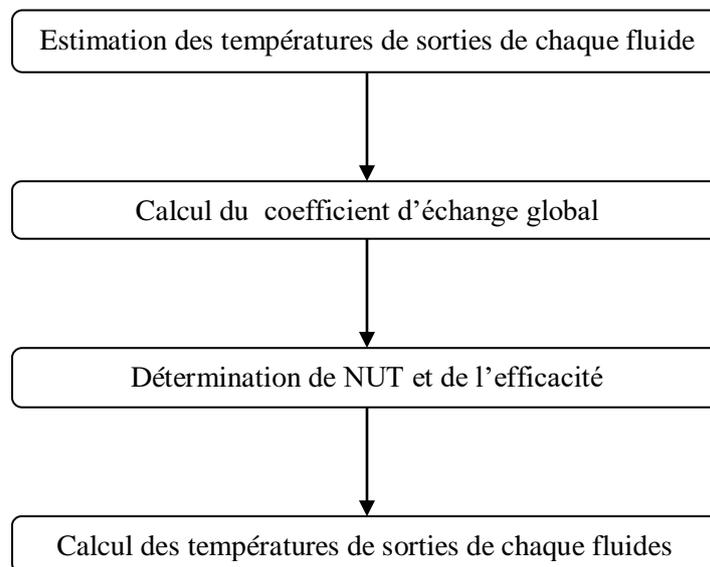
$$\varepsilon = \frac{(T_{ce} - T_{cs})}{(T_{fs} - T_{fe})} \quad (\text{II.25})$$

Si  $q_{tf} < q_{tc}$  ce qui implique que  $q_{tf} = q_{min}$  on dit que c'est le fluide froid commande le transfert, dans ce cas l'expression de l'efficacité devient :

$$\varepsilon = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{cs})} \quad (\text{II.26})$$

### II.4.3 Méthode de l'efficacité :

Le déroulement de calcul de cette méthode est schématisé comme suit :



**Tableaux II.2** : Principe de la méthode de l'efficacité [17].

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

---

La méthode de l'efficacité permet d'apporter une réponse élégante et rapide à la plupart des problèmes qui se posent dans les études d'ingénierie relatives aux échangeurs en particulier aux échangeurs à faisceau et calandre, qui se répartissent en deux grandes classes :

- Des problèmes de conception dans lesquels les températures d'entrée et une température de sortie sont imposées, les débits étant connus. La question est de sélectionner le modèle d'échangeur le plus approprié, et de chercher la taille et la surface  $S$  d'échange nécessaire pour obtenir la température de sortie désirée.
- Des problèmes de performances où les données sont le modèle et la taille de l'échangeur, les débits et les températures d'entrée. Il s'agit alors de déterminer la puissance et les températures de sortie.

Le nombre d'unités de transfert relatif au fluide qui possède le débit thermique unitaire minimal est habituellement désigné par NUT.

$$NUT = \frac{K.S}{q_{min}} \quad (II.27)$$

Dans la modélisation des échangeurs de chaleur, le nombre NUT, le rapport des débits thermiques désigné par  $R$ , jouent un rôle important dans la détermination de l'efficacité de l'échangeur thermique.

Le rapport des débits thermiques est désigné par :

$$R = \frac{q_{min}}{q_{max}} \quad (II.28)$$

Dans le cas où  $q_{tc} < q_{tf}$  ce qui implique que  $q_{tc} = q_{min}$  on dit que le fluide chaud commande le transfert :

$$R = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{cs})} \quad (II.29)$$

Si  $q_{tf} < q_{tc}$  ce qui implique que  $q_{tf} = q_{min}$  on dit que le fluide froid commande le transfert :

$$R = \frac{(T_{fs} - T_{fe})}{(T_{ce} - T_{cs})} \quad (II.30)$$

### II.5. Relation entre NUT et efficacité:

Le nombre d'unité de transfert NUT et l'efficacité  $E$  pour les différents types d'échangeur thermique pour  $0 < R < 1$  sont reliés par des relations, pour différentes modes d'écoulement tel que donné par le tableau (II.3) et (II.4).

## Chapitre II : Théorie sur les capteurs solaires plans à eau et échangeurs de chaleur

Type d'échangeur	NUT	E
Co-courant	$-\frac{1}{1+R} * \ln[1 - (1+R) * E]$	$\frac{1}{1+R} * (1 - \exp[-NUT * (1+R)])$
Contre courant	$\frac{1}{R-1} * \ln\left[\frac{E-1}{(R * E) - 1}\right]$	$\frac{1 - \exp[-NUT * (1-R)]}{1 - R * \exp[-NUT * (1-R)]}$
Courant croisé	$\frac{1}{R} * \ln\left[\frac{1}{1 + [R * \ln(1+E)]}\right]$	$E - 1 - \exp\left[-\frac{1}{R} * (1 - \exp(-R * NUT))\right]$

**Tableaux II.3** : relation entre NUT et efficacité [16].

Cas particuliers :

Type d'échangeur	NUT $\rightarrow \infty$	R=1
Co-courant	$E = \frac{1}{1+R}$	$E = \frac{1}{2} [-\exp(-2NUT)]$
Contre courant	$E \rightarrow 1$	$E = \frac{NUT}{1+NUT}$
Courant croisé	$E = 1 - \exp\left(-\frac{1}{R}\right)$	$E = 1 - \exp[-(1 - \exp(-NUT))]$

**Tableaux II.4** : relation entre NUT et E dans des cas particuliers [16].

### II.6.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle physique étudié et les équations de base sur lesquelles nous nous appuyons, qui nous aident notamment dans le calcul des performances thermiques liées à l'échangeur à tubes et à ailettes et aux capteurs solaires à eau.

# ***CHAPITRE III :***

***Etude***

***Expérimentale***

## Chapitre III : Etude expérimentale

---

### III.1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous décrivons les différents composants du dispositif expérimental a qui fait objet de ce travail, ainsi que les différentes étapes de réalisation de ce projet proposé, au niveau du hall technologique du Département de génie mécanique de l'Université de Biskra, Les travaux ont été effectués durant la période allant du mois de février jusqu'au mois d'avril 2019.

### III.2.Description du banc d'essai :

Les différentes manipulations qui ont eu lieu sur le banc d'essai expérimental ont été réalisé près du hall technologique du département de génie mécanique de l'Université de Biskra, située au sud est du Sahara Algérien à  $34.50^\circ$  de latitude, à  $5.44^\circ$  de longitude. Le dispositif expérimental est constitué d'un capteur solaire plan à eau couplé à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes, le plan de captation est exposé en direction plein sud.



Figure III.1 : Hall technologie d'université de Biskra.

### III.3. Eléments constituant du dispositif expérimental :

Le dispositif expérimental est constitué des éléments suivants :

- D'un capteur solaire plan à eau dont les caractéristiques géométriques sont :
  - Longueur du capteur  $L_c = 2.02$  m.
  - Largeur du capteur  $L_c = 1.03$  m.
  - Longueur de l'absorbeur  $L_{abs} = 1.91$  m.

## Chapitre III : Etude expérimentale

---

- Largeur de l'absorbeur  $L_{abs} = 0.91$  m.
- Surface de la couverture transparente en verre  $S_v = 1.97m^2$ .
- Le fluide caloporteur utilisé est l'eau de robinet.
- D'un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes :
  - Dimension 40cm x 25cm x 5cm.
  - Nombre des tubes 30, De diamètre extérieur 0.007 m
  - Nombres d'ailettes 190, D'une longueur 0.25 m et largeur 0.05 m
- Accessoires et capteurs :
  - Une pompe à eau qui assure la circulation de l'eau dans un circuit fermé entre le capteur solaire et l'échangeur à tubes et ailettes.
  - Débitmètre à flotteur.
  - 02 Capteurs de température analogiques qui mesurent la température de l'eau à l'entrée et à la sortie.



**Figure III.2 :** capteur solaire plan à eau exposé au rayonnement solaire Incident en direction plein sud.

### III.4. Composants du dispositif expérimental :

#### III.4.1. Capteur solaire plan à eau : Il se compose des éléments suivants :

- Un boîtier en bois de dimensions : Longueur = 2.02m, Largeur = 1.03m, hauteur = 0.14 m, épaisseur = 0.02 m,
- La face inférieure est recouverte d'une couche d'isolant en panneaux sandwich de 50 mm d'épaisseur en face postérieure et de 30 mm pour les faces latérales.

## Chapitre III : Etude expérimentale

- D'une plaque absorbante constituée de :
- Une plaque en cuivre peinte en noir mate placée la face haute de l'isolation qui joue le rôle de l'absorbeur.
- Un serpentin constitué de plusieurs conduites en tuyauterie de cuivre fixés solidairement par soudage sur la face arrière de la plaque absorbante en cuivre peinte en noir.
- Une couverture transparente en verre ordinaire d'épaisseur égale à 4 mm

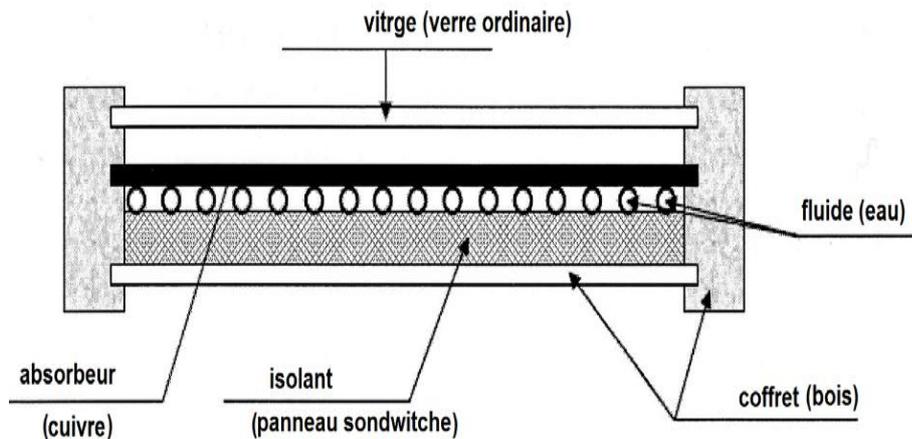


Figure III.3 : Coupe verticale du capteur solaire [18].

### III.4.2. Isolation thermique :

L'isolation thermique a pour rôle de limiter les déperditions thermiques vers l'extérieur du capteur, principalement par le bas et les côtés latéraux, pour cela, on a utilisé un panneau sandwich (Panneaux en mousse polyuréthane) avec une couche en mousse de polyuréthane de haute densité injectée entre les bordures de la plaque absorbante et les parois latérales du boîtier en bois Figure (III.4).



**Figure III.4 :** réalisation de l'isolation.



**Figure III.5 :** mousse isolante.

La mousse polyuréthane est matière isolante mono composante, auto-expansible, adhésive, isolante, étanche et non toxique, permettant de réaliser toutes les opérations d'isolation thermique et acoustique. Elle durcit par polymérisation en présence de l'humidité de l'air. Elle contient plus de 80 % de cellules fermées, ce qui la rend dense et stable.

### III.4.3. Couverture transparente en verre :

La couverture transparente utilisée est une plaque en verre de longueur 1.98 m et d'une largeur de 0.995 m et d'épaisseur égale à 0.004 m.



**Figure III.6 :** capteur solaire plan à eau avec couverture transparente en verre.

## Chapitre III : Etude expérimentale

### III.4.4. Echangeur de chaleur à tubes et à ailettes :

L'échangeur de chaleur à tubes et à ailettes intégré au capteur solaire plan se compose de tubes de cuivre et d'un ensemble de plaques très fines en aluminium pour augmenter la surface d'échange, l'échangeur de chaleur comporte figure (III.7) :

- 30 tubes en cuivre de diamètres extérieur égale à 0.007 m, l'ensemble forme un circuit en serpentin relié directement au capteur solaire plan à eau en circuit fermé
- 190 ailettes de dimension ; Longueur = 0.4 m ; Largeur = 0.25 m ; épaisseur = 0.05 m



**Figure III.7 :** Echangeur de chaleur à tubes et à ailettes.

Le couplage de l'échangeur à tubes et à ailettes au capteur solaire plan à eau est assuré par un support métallique figure (III.8), réalisé et fixé directement par soudage à l'arc électrique sur le support principale du capteur. Ce qui a facilité la liaison par conduite étanche.





Figure III.8 : Support métallique de l'échangeur de chaleur fixé par soudage.



Figure III.9 : vue intérieur de l'échangeur de chaleur.

### III.4.5. Pompe à eau :

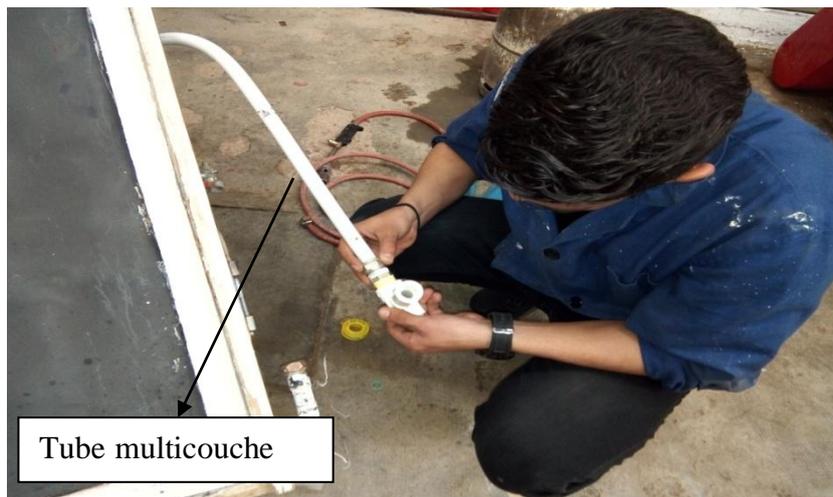
La pompe à eau a pour rôle d'assurer en mode de convection forcée la circulation en continu le fluide caloporteur (eau) entre le capteur et l'échangeur de chaleur dans un circuit fermé Figure (III.10). Le débit d'eau à l'entrée du capteur est ajusté par une vanne manuelle relié directement à un débitmètre à flotteur Figure (III.18), qui permet de régler le débit d'eau qui circule dans le capteur solaire à eau.



**Figure III.10 :** Pompe à eau.

### III.4.6. Tuyauterie et raccordement :

La liaison entre le capteur solaire à eau et l'échangeur de chaleur est réalisé par une tuyauterie en PVC haute pression multi couche. Le tube multicouche Figure (III.11) est de la famille des tubes synthétiques de type tuyau en PER. Comme son nom l'indique, il est composé de plusieurs couches lui apportant des caractéristiques précises. Il permet une plomberie sans soudure en utilisant des raccords à visser principalement mais d'autres types de raccordement sont possibles. [18].



**Figure III.11 :** Tube multicouche.

Le raccordement entre les différents éléments de l'installation est fait par des raccords traditionnels à visser en laiton qui assurent une excellente étanchéité et qui possède une grande simplicité de mise en œuvre (montage et démontage). Ce raccord ne nécessite pas d'outillage spécifique : l'utilisation d'une simple clé suffit. L'étanchéité s'effectue par un simple serrage de la

## Chapitre III : Etude expérimentale

bague crantée sur le tube. Ce type de raccord est utilisable aussi bien en chauffage qu'en sanitaire, il doit rester accessible. [18]



Figure III.12 : Raccord de tube multicouche.

### III.5. Système de remplissage de circuit :

Pour remplir le circuit avec de l'eau, on a utilisé un système composé de 03 robinets tel qu'illustré sur la figure (III.13) (deux robinets et une vanne principale). Le remplissage du circuit est effectué à partir du premier robinet avec le second robinet qui est en position ouverte, alors que la vanne est fermée jusqu'à ce que le circuit soit entièrement rempli d'eau.

Une fois le circuit est chargé d'eau, la pompe à eau est mise en route, après fermeture du robinet 01 et ouverture de la vanne principale pour permettre à l'eau de circuler librement dans le circuit fermé.

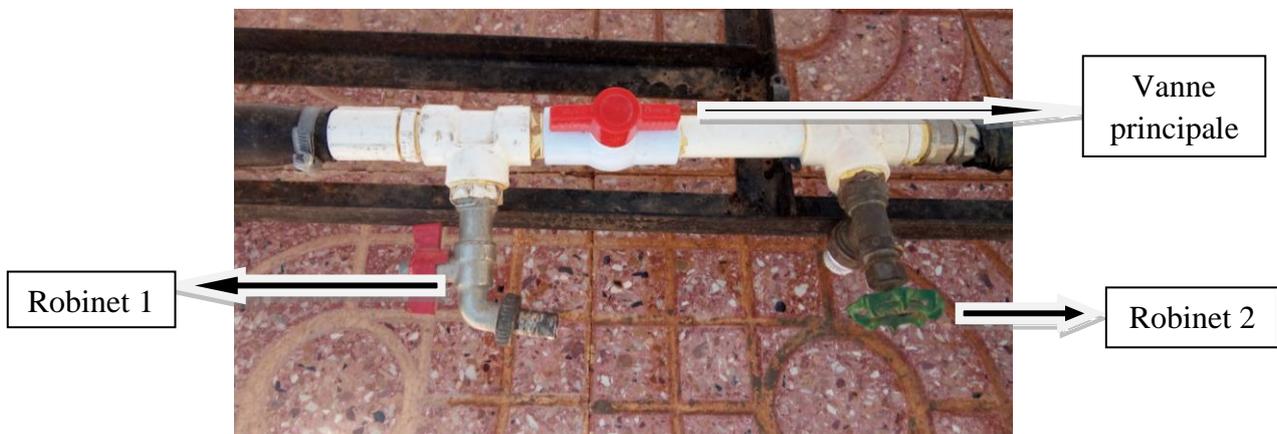


Figure III.13 : Système de remplissage du circuit.

## Chapitre III : Etude expérimentale

### III.6. Isolation de la tuyauterie multicouche :

Les tuyauteries du circuit sont isolées de manière à limiter les pertes de chaleur au niveau des conduites de raccordement reliant les entrées et sorties entre le capteur solaire et l'échangeur de chaleur Figure (III.14).



Figure III.14 : isolation des conduites de raccordement.

### III.7. Instrumentations de mesure :

#### III.7.1. Mesure du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire reçu par le plan incliné du capteur solaire à eau est mesuré par un Pyranomètre portatif à affichage à cristaux liquide. Il est équipé d'un cadran à affichage pour la lecture directe de l'intensité lumineuse en  $W/m^2$  Figure (III.15), dont l'intervalle de mesure est compris entre 0-1999  $W/m^2$ , avec une résolution de 1  $W/m^2$  et une précision de l'ordre +/- 5%.

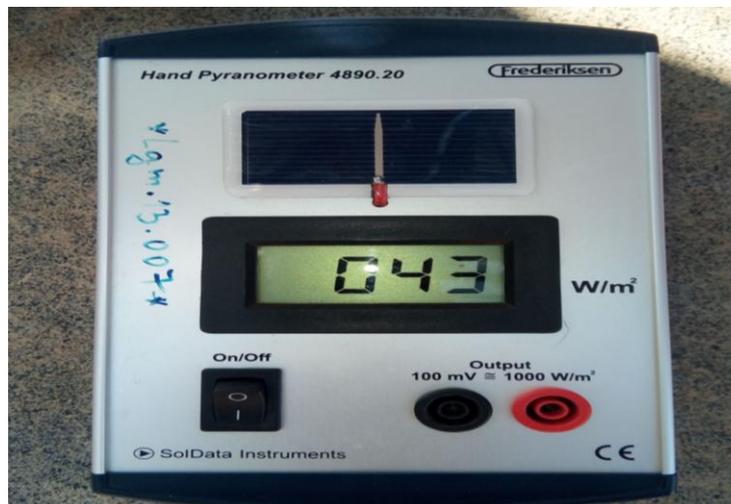


Figure III.15 : Pyranomètre.

## Chapitre III : Etude expérimentale

### III.7.2. Mesure de vitesse et les températures de l'échangeur :

La mesure de la vitesse et le débit ainsi que la température de l'air véhiculé à travers l'échangeur de chaleur sont réalisés par un anémomètre à hélice de type Kimo LVB Thermo-anémomètre figure (III.16) (intervalle = 0-35 m/s, résolution = 2.95. m/s, précision = +/- 5%).



Figure III.16 : Anémomètre à hélice.

### III.7.3. Réglage de la vitesse de ventilation :

Pour ajuster la vitesse de l'air véhiculé à travers l'échangeur de chaleur, on a utilisé un régulateur de tension (potentiomètre) de type 4000W AC 220V SCR pour le réglage du nombre de tour du ventilateur (pompe à air) Figure (III.17), ce qui permet d'obtenir plusieurs valeurs de débit d'air. Le potentiomètre est relié directement à un watt mètre afin de mesurer la puissance électrique consommée par le ventilateur Figure (III.20).



Figure III.17 : Régulateur de tension.

## Chapitre III : Etude expérimentale

---

### III.7.4. Mesure du débit d'eau :

Pour mesurer le débit volumique de l'eau dans le circuit, on a employé un débitmètre à flotteur gradué muni d'une vanne manuelle, ce qui permis de contrôler et ajuster le débit d'eau voulu en circulation dans le circuit fermé Figure (III.18).

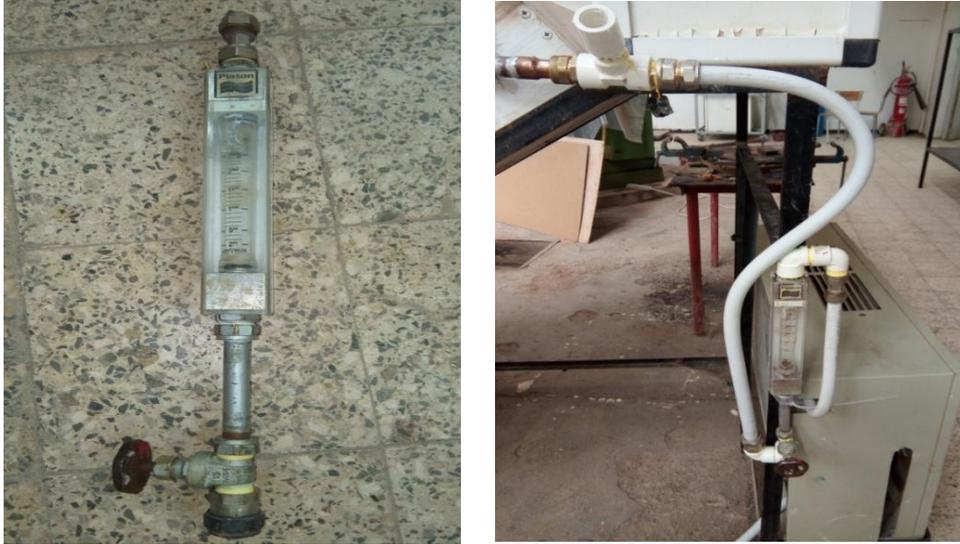


Figure III.18 : Débitmètre à flotteur.

### III.7.5. Mesure des températures du capteur solaire à eau :

Le contrôle des températures de l'eau entrante et sortante au niveau du capteur solaire, est réalisé par des capteurs de température analogiques, dont la lecture est réalisée sur un cadran de température gradué avec aiguille figure (III.19). Les capteurs de températures sont intégrés directement au circuit de l'eau en mouvement dans le collecteur solaire.



Figure III.19 : Thermomètre.

## Chapitre III : Etude expérimentale

### III.7.6. Mesure la puissance électrique de la pompe à et du ventilateur :

Pour mesurer la puissance électrique de la pompe à eau et de la ventilation, on a utilisé un wattmètre de type DW-6060, à affichage digital muni d'une bascule pour remise à zéro Figure (III.20).

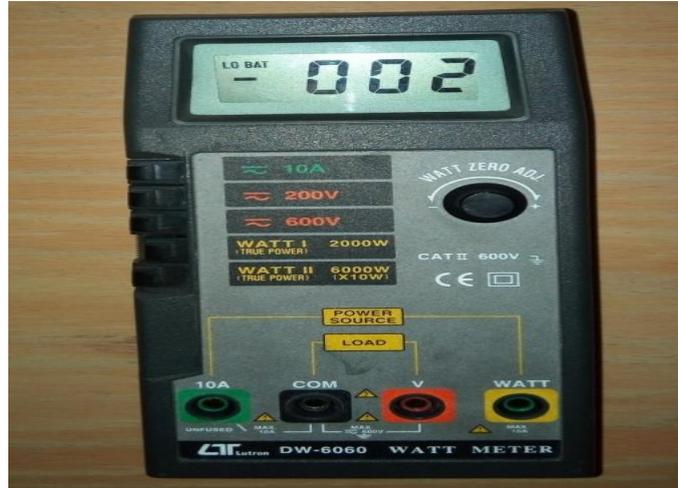


Figure III.20 : Watt mètre.

### III.8. Principe de fonctionnement de l'installation :

L'étude expérimentale démarre par l'alimentation du fluide à l'aide d'une pompe à eau vers le capteur solaire, ce dernier, parfaitement incliné en plein sud, reçoit le rayonnement solaire, la plaque absorbante se chauffe en transférant une partie de la chaleur convertie au fluide qui s'écoule en direction de l'échangeur de chaleur à tubes et à ailettes.

D'autre part, un ventilateur intégré à l'échangeur permis de faire circuler l'air à travers le corps de chauffe de l'échangeur, ce qui permis d'obtenir un transfert de chaleur entre l'eau chaude provenant du capteur et l'air froid traversant l'échangeur en mode d'écoulement à courant croisé.



Figure III.21 : Dispositif expérimental.

## Chapitre III : Etude expérimentale

	$T_{amb}$	$T_{e-cap}$	$T_{s-cap}$	$T_{e-éch-eau}$	$T_{s-éch-eau}$	$T_{e-éch-air}$	$T_{s-éch-air}$	$I_{G-inc}$	$Q_{v-cap}$	$V_{éch-air}$	$P_{é-éch}$	$P_{é-cap}$
<b>9 :30</b>	26	23	24	23.5	21	23.2	24	447	1000	4.1	84	16
<b>10 :00</b>	26	28	29	28.5	26	24	25.6	565	1000	3.6	79	16
<b>10 :30</b>	25	29	31	30.5	27	27	28.6	687	1000	3.1	75	16
<b>11 :00</b>	26	31	34	33.5	29	26.4	29.5	780	1000	2.84	70	16
<b>11 :30</b>	27	32	37	36.5	30	25	31	877	1000	2.72	65	16
<b>12 :00</b>	27	33	40	39.5	31	27.2	32.4	930	1000	2.68	60	16
<b>12 :30</b>	27	34	41	40.5	32	30	34	980	1000	1.82	55	16
<b>13 :00</b>	28	34	42	41.5	32	29.3	36.7	1005	1000	1.62	50	16
<b>13 :30</b>	27	33	44	43.5	31	31.7	39.2	1020	1000	1.54	45	16
<b>14 :00</b>	28	34	46	45.5	32	30.2	43.2	1012	1000	1.31	40	16
<b>14 :30</b>	28	33	46	45.5	31	29.4	44.3	1002	1000	0.63	36	16

**Tableaux III.1** : Exemple de tableau de mesure.

### III.9.Conclusion :

Dans ce chapitre, on a essayé de présenter les différentes étapes de fabrication et de montage du dispositif expérimental constitué d'un capteur solaire plan à eau et d'un échangeur à tubes et à ailettes. D'autre part, on a exposé les différents instruments de mesures employés durant le déroulement des manipulations expérimentales, ce qui a permis de suivre en fonction du temps et de l'ensoleillement l'évolution de nombreux paramètres importants pour la quantification des performances thermiques de notre installation de production de la chaleur par l'énergie solaire thermique.

# ***CHAPITRE IV:***

***Résultats***

***et***

***discussions***

## Chapitre IV : Résultats et discussions

---

### IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre, on s'intéresse à observer l'évolution des températures de l'eau en circulation dans un circuit fermé entre le capteur solaire plan à eau et l'échangeur à tubes et à ailettes, ainsi que la celle de l'air dans l'échangeur en fonction du rayonnement solaire et des débits de l'eau et de l'air respectivement, ceci étant durant les conditions de fonctionnement ordinaire en utilisant le capteur solaire à eau et l'échangeur de chaleur à tubes et à ailettes conçu et réalisé le hall technologique du département de génie mécanique de l'Université Mohammed Khider de Biskra.

Notre objectif est de déterminer les températures maximales pouvant être atteintes dans toutes les conditions climatiques pour la production d'air chaud, afin de tracer les courbes de variation des températures et du rayonnement solaire en fonction du temps, tout en modifiant la puissance électrique en fonction de débit, également la vitesse de l'air à l'entrée et à la sortie de l'échangeur par un variateur de vitesse ajustable.

### IV.2. Calcul de la surface d'échange totale de l'échangeur à tubes et à ailettes :

Afin d'évaluer les performances thermiques de l'installation, on devra calculer la surface d'échange totale commune mise en jeu entre les deux fluides caloporteurs. Pour cela on a déterminé les dimensions des éléments de l'échangeur à tubes et à ailettes utilisé dans le dispositif expérimental, ce qui a permis d'obtenir les valeurs suivantes :

Longueur effective de l'échangeur  $L = 40\text{cm}$

Largeur effective de l'échangeur  $l = 25\text{cm}$

Hauteur effective de l'échangeur  $e_{éch} = 5\text{cm}$

Épaisseur d'une ailette  $e_{ail} = 0.0001\text{m}$

Nombre d'ailettes  $n_{ail} = 190$

Nombre des tubes  $n_{tub} = 30$

Diamètre extérieur d'un tube  $D_{ext} = 7\text{ mm}$

#### ➤ Calcul de la surface effective totale des ailettes de l'échangeur :

$$S_{ail} = 2 * L * l * n_{ail} - n_{tub} * \left[\frac{D_{ext}}{2}\right]^2 * \pi$$

Application, numérique :

$$S_{ail} = 0.25 * 0.4 * 2 * 190 - 30 * \left[\frac{0.007}{2}\right]^2 * \pi$$

$$S_{ail} = 38\text{ m}^2$$

## Chapitre IV : Résultats et discussions

- **Calcul de la surface d'échange effective totale des tubes :**

$$S_{tub} = (L * D_{ext} * n_{tub} * \pi) - (\pi * e_{ail} * D_{ext} * n_{tub} * n_{ail})$$

Application, numérique :

$$S_{tub} = (0.4 * 0.007 * 30 * \pi) - (\pi * 0.0001 * 0.007 * 30 * 190)$$

$$S_{tub} = 0.2558472 \text{ m}^2$$

- **Calcul la surface totale effective mise en jeu :**

$$S_t = S_{ail} + S_{tub}$$

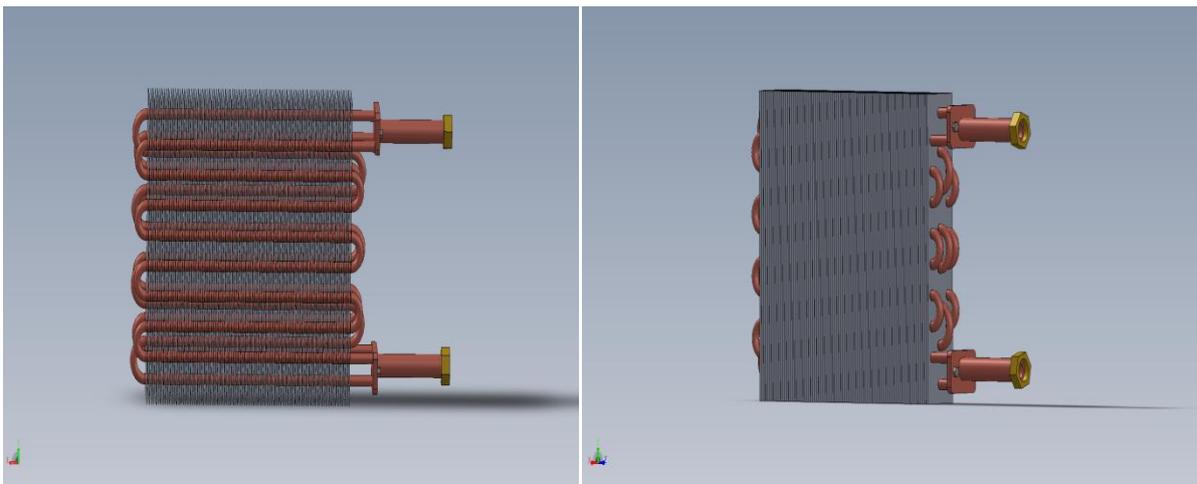
Application, numérique :

$$S_t = 38 + 0.2558472$$

$$S_t = 38.2558472 \text{ m}^2$$

### IV.3. Résultats et discussions :

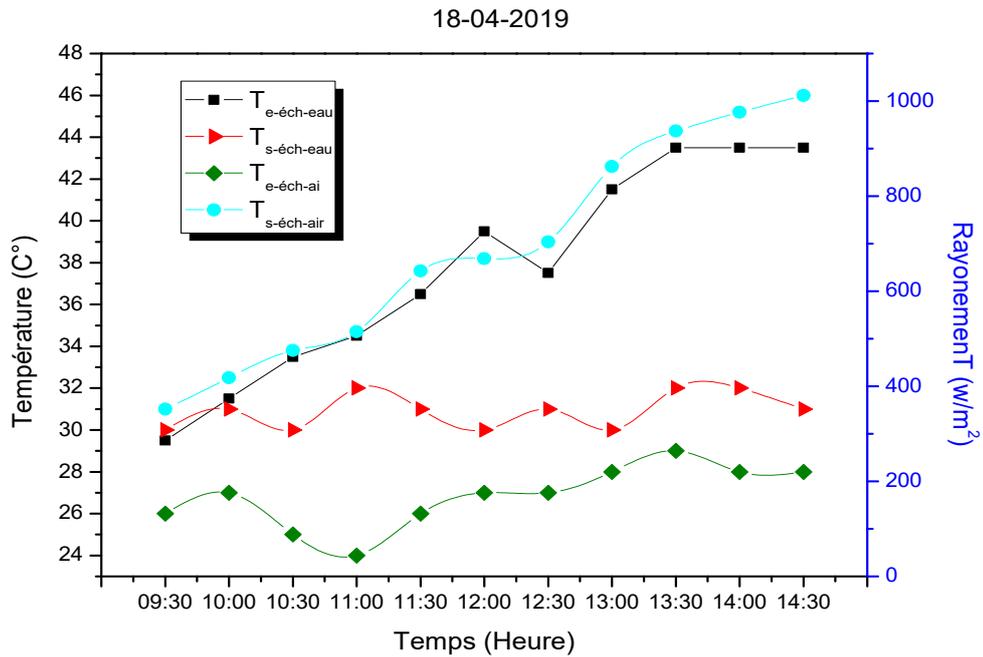
Le Protocol expérimental consiste à la prise de mesures des différents paramètres, notamment le rayonnement solaire reçu par le plan du capteur solaire à eau, les températures de l'air et l'eau à l'entrée et à la sortie, le débit d'eau en circulation dans le circuit fermé entre le capteur et l'échangeur, le débit d'air véhiculé à travers l'échangeur ainsi que les puissance électrique consommées par la pompe à eau et le ventilateur . Les paramètres mesurables nous permis par la suite de déterminer la quantité de chaleur fournit au niveau de l'échangeur, le rendement thermique et le coefficient de performance de l'installation.



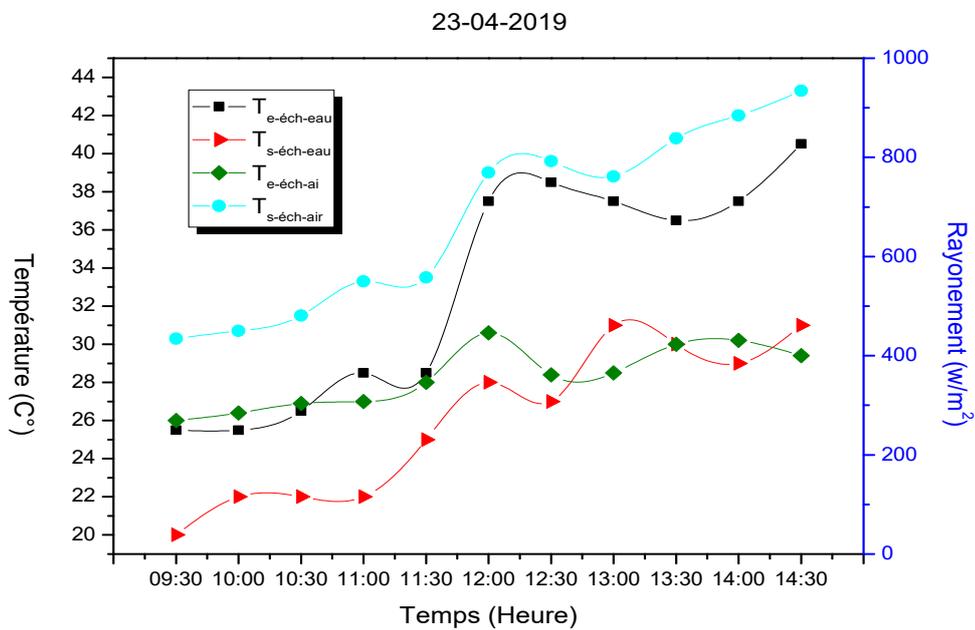
**Figure IV.1 :** Un dessin représentatif d'un échangeur à tubes et à ailettes par Programme de conception mécanique solidworks.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### ➤ Variation des températures dans l'échangeur (débit d'eau fixe, débit d'air variable)

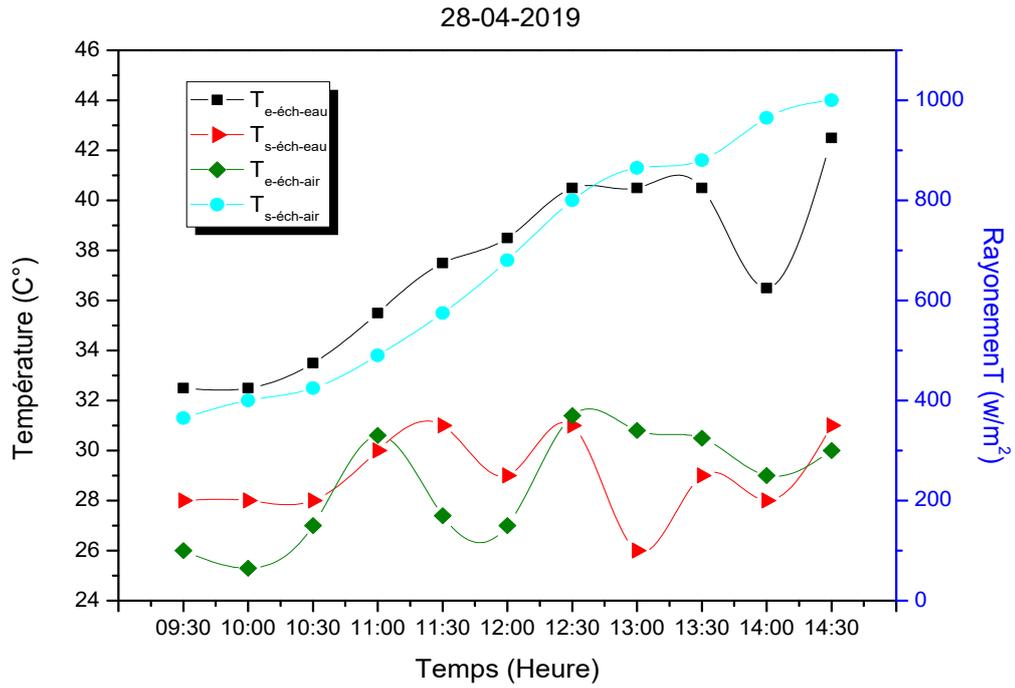


**Figure IV.2 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel très claire).

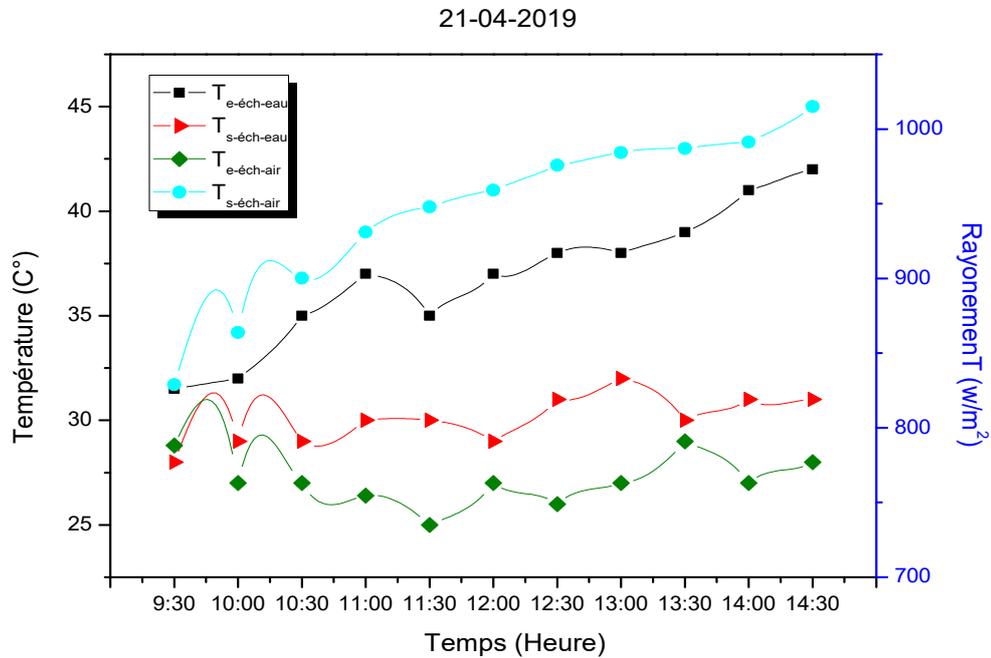


**Figure IV.3 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel clair).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

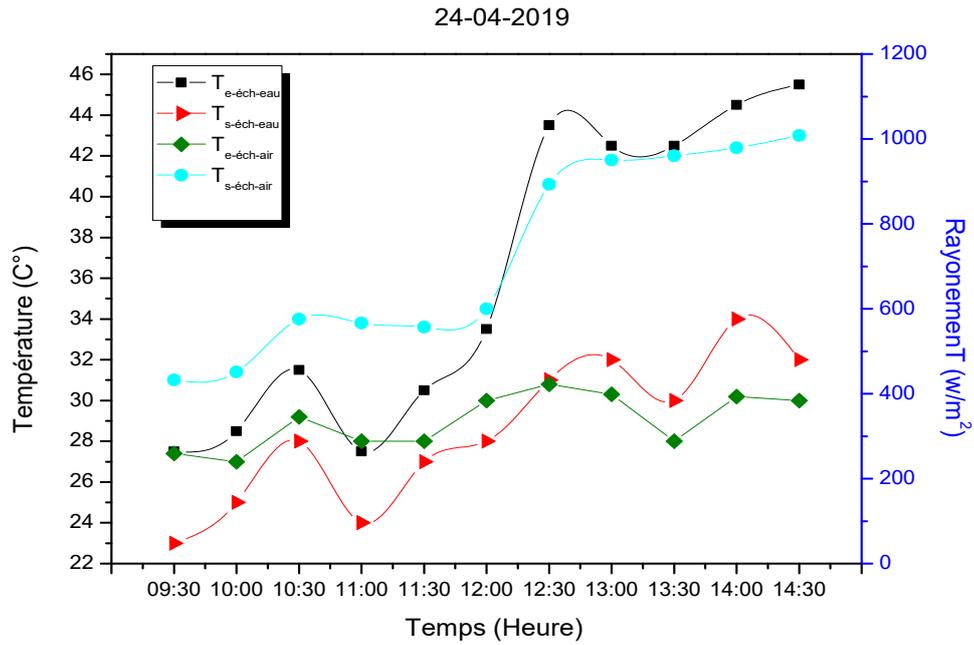


**Figure IV.4 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit de d'eau égale à 120 Kg/h, (ciel très clair).

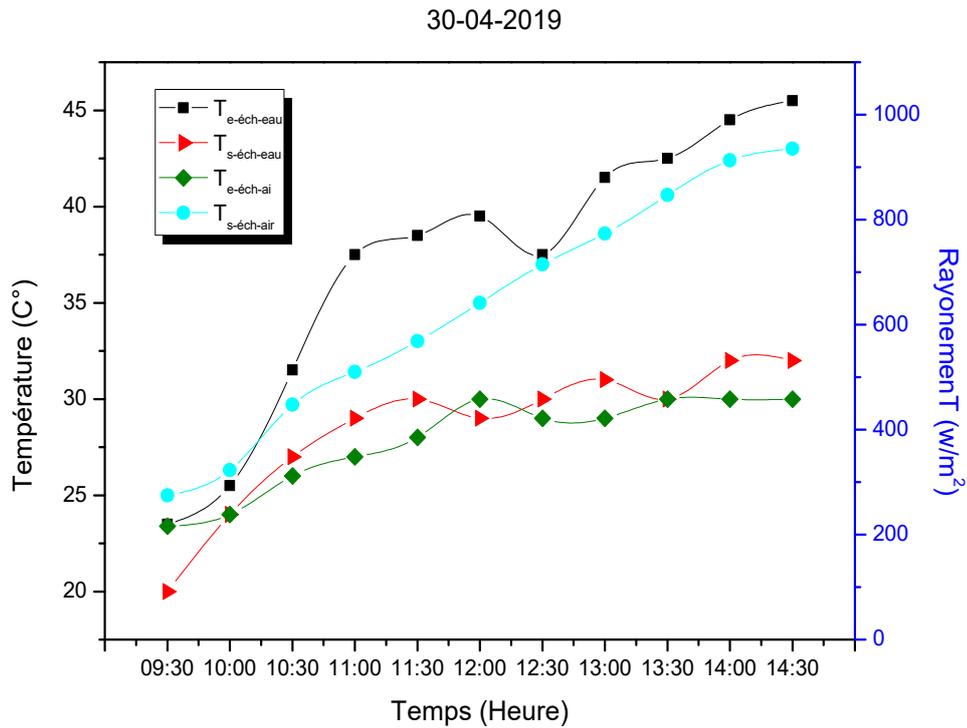


**Figure IV.5 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel pollué).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

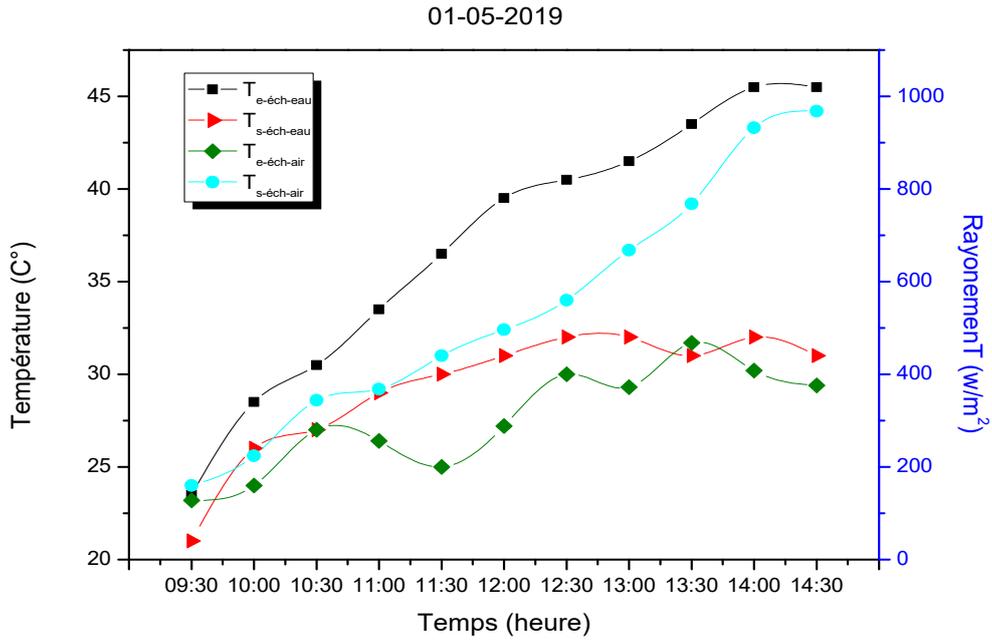


**Figure IV.6 :** Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel nuageux).

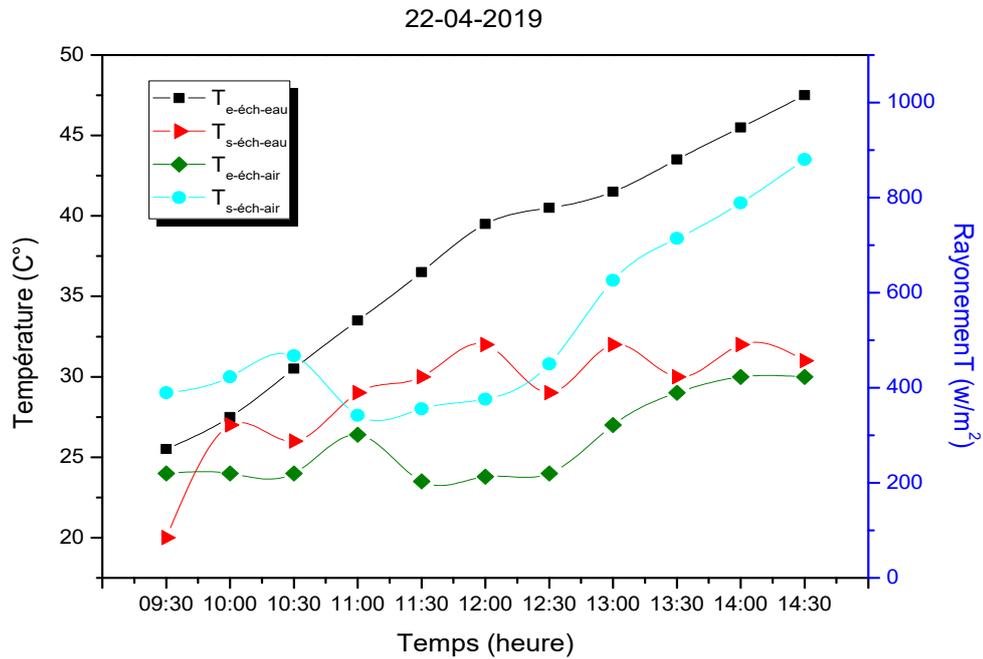


**Figure IV.7 :** Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 Kg/h, (ciel clair + vent fort).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

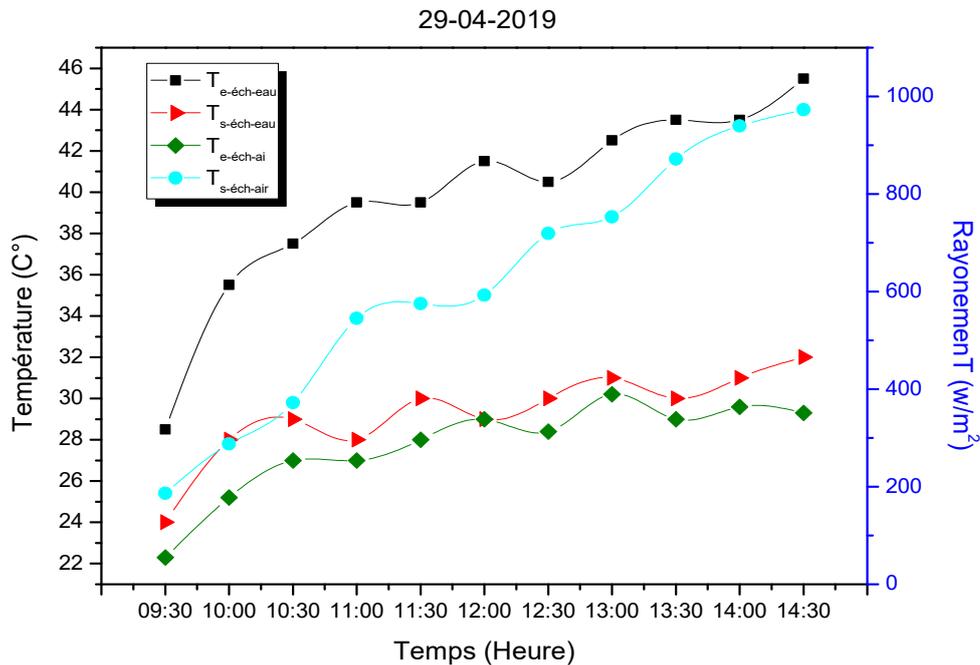


**Figure IV.8 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel très clair).



**Figure IV.9 :** Variation des températures de l'eau et l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel nuageux).

## Chapitre IV : Résultats et discussions



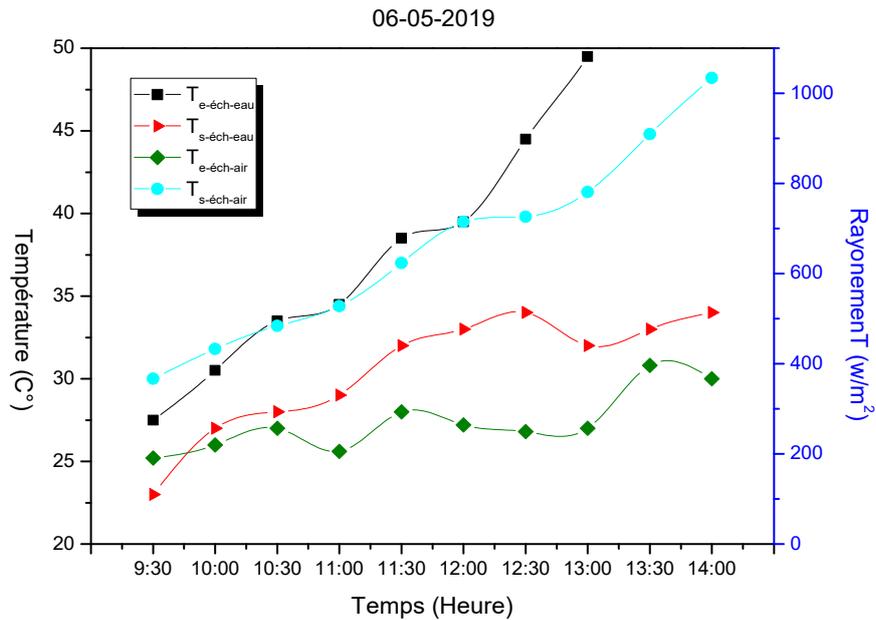
**Figure IV.10 :** Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 Kg/h, (ciel clair).

Les figures (IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10) montrent l'évolution des températures d'entrée et de sortie de l'eau et de l'air mesurées aux niveaux de l'échangeur à tubes et à ailettes en fonction du temps pour plusieurs valeurs de débit d'eau de 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h respectivement sous différentes conditions météorologiques.

L'analyse de courbes montre que l'augmentation des températures de sortie de l'air au niveau de l'échangeur et de l'eau au niveau du capteur par temps ensoleillé clair et nuageux est obtenue avec des vitesses de ventilation relativement modérées ainsi que pour des débits d'eau en circulation dans le circuit fermés faibles et moyens, en effet l'ajustement de ces deux paramètres contribue à l'augmentation de la température de l'air chaud produit par l'échangeur correspondant à une quantité de chaleur véhiculée par l'air nécessaire au chauffage des locaux en période d'hivers où les températures extérieures sont très basses (air chaud à la sortie de l'échangeur).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

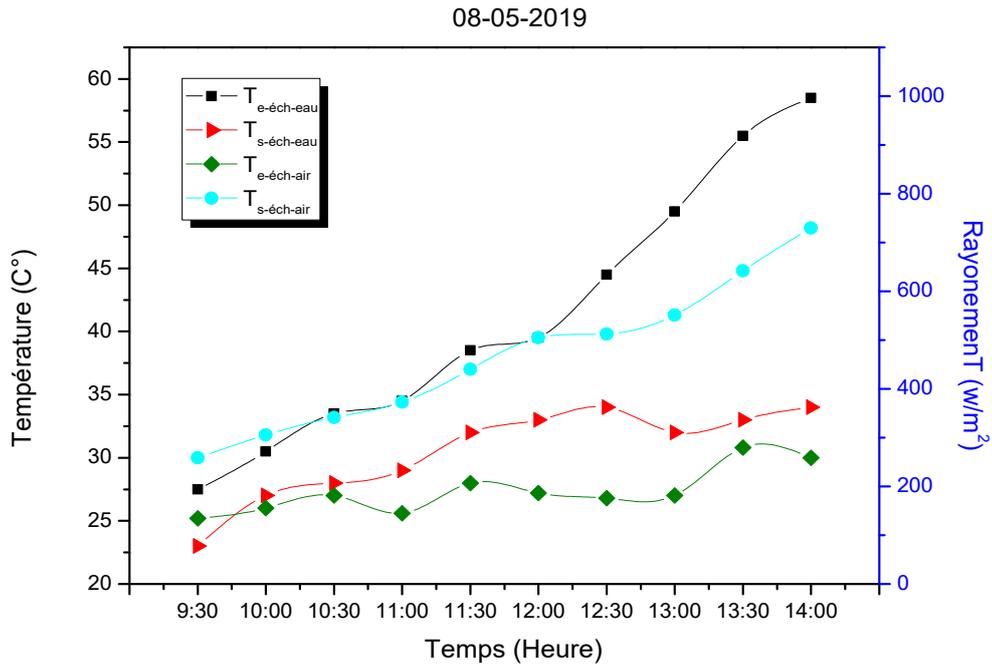
### ➤ Variation des températures dans l'échangeur (débit d'eau variable, débit d'air fixe)



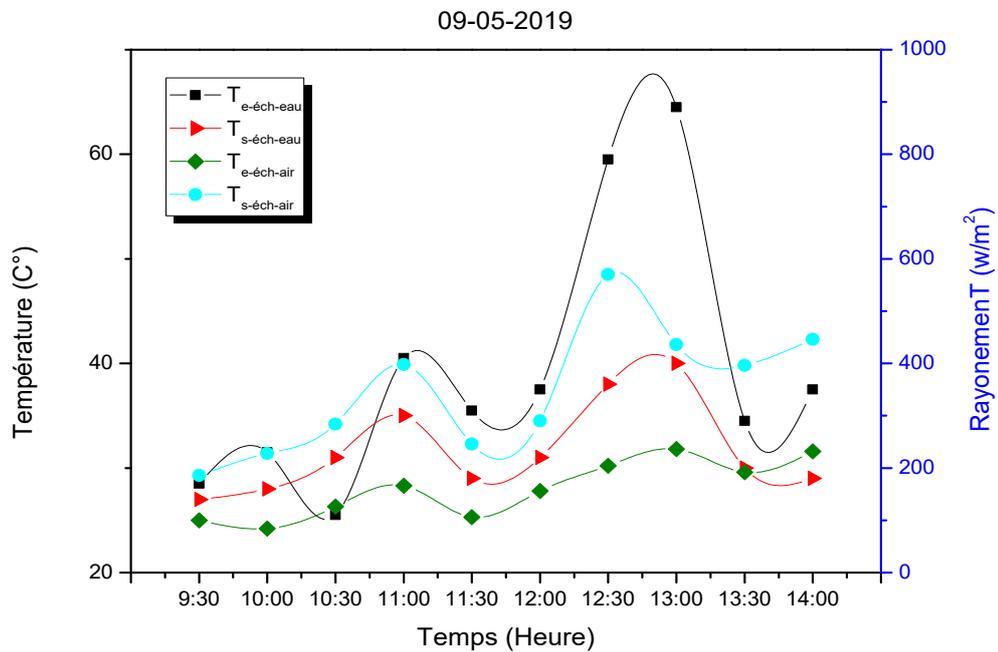
**Figure IV.11** : Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair).

Les figures IV.11, IV.12 et IV.13 représentent les variations des températures d'entrée et sortie de l'eau et de l'air aux niveaux de l'échangeur à tubes et à ailettes en fonction de temps, pour plusieurs valeurs de débit d'eau égal à 120 kg/h, 90 kg/h et 60 kg/h respectivement, à savoir que les expérimentations ont été réalisées sous différentes conditions météorologiques, où on a maintenue constant la puissance électrique et la vitesse de ventilation correspondante à un débit d'air égale 1.385 kg/h.

## Chapitre IV : Résultats et discussions



**Figure IV.12 :** Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair).



**Figure IV.13 :** Variation des températures de l'eau et de l'air pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé par changement de débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h et 60kg/h, (ciel clair).

## Chapitre IV : Résultats et discussions

On observe que l'accroissement des températures de sortie de l'air et de l'eau par temps ensoleillé et ciel clair Figures (IV.11 et IV.12), est régit par des débits d'eau relativement moyens et faibles ajustés par une vanne, qui entraînent une augmentation de la température de l'air véhiculé à travers l'échangeur à tubes et ailettes, ce qui confirme que le débit d'eau provenant de la source chaude (capteur solaire) est un facteur qui affecte la variation des températures aussi bien que l'intensité du rayonnement solaire reçu et des conditions météorologiques extérieures.

➤ **Résultats de calcul des performances thermiques de l'installation (débit d'eau fixe, débit d'air variable)**

t(H)	$S_{\text{échngeur}}$	$\Delta T_{ml}$	$\emptyset$	$K$	$C_{min}$	$NUT$	$\epsilon$	$\eta_{cap}$	$\eta_{inst}$	$\dot{m}$	$Q_u$
09:30	38.2558	3,75662	215,966	2198,981	69,6666	1207,338	0,991471	0,16177	0,16039	0,0166	4.41
10:00	38.2558	4,62529	536,433	4436,173	69,6666	2435,655	0,996150	0,26776	0,26673	0,0166	3.43
10:30	38.2558	5,13300	536,433	3997,387	69,6666	2194,742	0,995633	0,29329	0,29204	0,0166	3.50
11:00	38.2558	8,94514	397,100	1698,027	69,6666	932,2918	0,988901	0,4093	0,4048	0,0166	7.09
11:30	38.2558	7,96217	341,366	1639,915	69,6666	900,3863	0,988513	0,31659	0,3129	0,0166	7.11
12:00	38.2558	8,85595	452,833	1955,848	69,6666	1073,847	0,990372	0,41139	0,40745	0,0166	7.92
12:30	38.2558	10,0438	174,166	663,3180	69,6666	364,1908	0,974269	0,35546	0,34630	0,0166	8.75
13:00	38.2558	9,97987	257,766	987,9478	69,6666	542,427	0,981599	0,38866	0,38170	0,0166	12.34
13:30	38.2558	13,0448	132,366	388,1259	69,6666	213,0982	0,961342	0,47345	0,45518	0,0166	12.79
14:00	38.2558	13,0422	20,9000	61,29505	69,6666	33,65369	0,885529	0,42923	0,38011	0,0166	12.10
14:30	38.2558	14,0914	104,500	283,6558	69,6666	155,7396	0,951982	0,47633	0,45340	0,0166	10.72

**Tableaux IV.1 :** Performances thermiques de l'échangeur calculés pour un débit d'eau = 60 kg/h.

t(H)	$S_{\text{échngeur}}$	$\Delta T_{ml}$	$\emptyset$	$K$	$C_{min}$	$NUT$	$\epsilon$	$\eta_{cap}$	$\eta_{inst}$	$\dot{m}$	$Q_u$
09:30	38.2558	4,03327	365,75	3468,634	104.5	1269,622	0,999118	0,22736	0,2255	0.025	5.40
10:00	38.2558	3,49068	303,05	3320,748	104.5	1215,491	0,995315	0,20865	0,2068	0.025	6.11
10:30	38.2558	4,11583	261,25	2427,896	104.5	888,6816	0,983695	0,15234	0,1570	0.025	5.62
11:00	38.2558	4,55359	658,35	5530,173	104.5	2024,182	0,991432	0,15217	0,1511	0.025	6.07
11:30	38.2558	4,46805	323,95	2773,704	104.5	1015,098	0,988062	0,19611	0,1941	0.025	4.09
12:00	38.2558	11,0953	104,5	802,0744	104.5	293,5949	0,965185	0,46774	0,4539	0.025	2.66
12:30	38.2558	10,9924	303,05	1044,783	104.5	382,4049	0,975666	0,63220	0,6161	0.025	5.20
13:00	38.2558	12,9743	73,15	254,5841	104.5	93,16855	0,933552	0,50290	0,4695	0.025	5.97
13:30	38.2558	13,0448	52,25	154,4003	104.5	56,38318	0,911701	0,67939	0,6194	0.025	6.30
14:00	38.2558	11,3281	219,45	740,9494	104.5	271,207	0,967212	0,54093	0,5232	0.025	4.95
14:30	38.2558	13,248	261,25	754,2557	104.5	276,0834	0,960546	0,73143	0,7080	0.025	4.28

## Chapitre IV : Résultats et discussions

**Tableaux IV.2 :** Performances thermiques de l'échangeur calculés pour un débit d'eau = 90 kg/h.

t(H)	$S_{\text{échngeur}}$	$\Delta T_{ml}$	$\emptyset$	$K$	$C_{min}$	$NUT$	$\epsilon$	$\eta_{cap}$	$\eta_{inst}$	$\dot{m}$	$Q_u$
09:30	38.2558	4,88909	167,2	1308,097	139,333	359,101	0,97397	0,30392	0,2960	0,033	4.10
10:00	38.2558	5,52721	69,6666	482,1149	139,333	132,351	0,94657	0,19337	0,1830	0,033	7.60
10:30	38.2558	3,80489	278,666	2801,394	139,333	769,044	0,98662	0,09992	0,0985	0,033	5.82
11:00	38.2558	4,24669	236,866	2133,461	139,333	585,682	0,9828	0,33280	0,3270	0,033	3.44
11:30	38.2558	7,27068	278,666	1466,027	139,333	402,456	0,97627	0,39480	0,3854	0,033	8.47
12:00	38.2558	10,0399	125,4	477,7469	139,333	131,152	0,94625	0,6243	0,5907	0,033	10.55
12:30	38.2558	9,04253	69,6666	294,691	139,333	80,8992	0,92783	0,62415	0,5791	0,033	6.51
13:00	38.2558	7,73243	1365,46	6754,564	139,333	1854,278	0,9946	0,32084	0,3191	0,033	5.80
13:30	38.2558	11,2988	153,266	518,856	139,333	142,4374	0,94906	0,86230	0,8183	0,033	7.74
14:00	38.2558	11,1496	947,466	3250,372	139,333	892,298	0,98841	0,64505	0,6375	0,033	7.80
14:30	38.2558	12,709	209	629,0217	139,333	172,680	0,95521	0,82435	0,7874	0,033	6.91

**Tableaux IV.3 :** Performances thermiques de l'échangeur calculés pour un débit d'eau = 120 kg/h.

Les tableaux (IV.1, IV.2 et IV.3) ci-dessus représentent les résultats de calcul des performances thermiques de l'installation réalisée, pour plusieurs valeurs de débit d'eau égal à 120kg/h, 90kg/h et 60kg/h respectivement, qui correspondent également à une variation de la puissance électrique du ventilateur intégré à l'échangeur à tubes et à ailettes.

On remarque également à travers les calculs que lorsque la puissance thermique échangé est élevée, entraîne une augmentation du coefficient d'échange global et de NUT, ce qui ce traduit encore par une augmentation de l'efficacité de l'échangeur et le rendement du capteur solaire, ce qui donne un rendement thermique total élevé de l'installation particulièrement avec un débit d'eau égal à 120 kg/h.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

➤ **Résultats de calcul les performances de installation (débit d'eau variable, débit d'air fixe)**

t(H)	$S_{\text{échangeur}}$	$\Delta T_{ml}$	$\emptyset$	$K$	$C_{min}$	$NUT$	$\epsilon$	$\eta_{cap}$	$\eta_{inst}$	$\dot{m}$	$Q_u$
09 :30	38.2558	8,77405	348,3332	1518,543	139,333	416,8746	0,976959	0,25168	0,222750	0,033	6.67
10 :00	38.2558	4,4680	153,2666	1312,08	139,333	360,1971	0,974040	0,19524	0,17121	0,033	7.78
10 :30	38.2558	5,98965	41,79999	266,9355	139,333	73,27989	0,9236	0,37115	0,342812	0,033	8.62
11 :00	38.2558	7,02122	10,45	56,92930	104,5	20,83780	0,857797	0,33280	0,279468	0,025	12.23
11 :30	38.2558	7,6853	156,75	780,1470	104,5	285,55	0,968863	0,33299	0,322623	0,025	12.51
12 :00	38.2558	8,9707	31,35	133,6723	104,5	48,92802	0,904958	0,31256	0,282862	0,025	14.74
12 :30	38.2558	12,365	243,8333	754,2264	69,6666	414,1056	0,976832	0,38523	0,376312	0,0166	16.69
13 :00	38.2558	16,7387	452,8333	1034,779	69,6666	568,1401	0,982336	0,6739	0,66207	0,0166	19.75
13 :30	38.2558	18,610	661,833	1360,292	69,6666	746,8616	0,986248	0,42581	0,42292	0,0166	19.88
14 :00	38.2558	22,2808	578,2333	992,6655	69,6666	545,0177	0,981675	0,47595	0,4714	0,0166	20.30

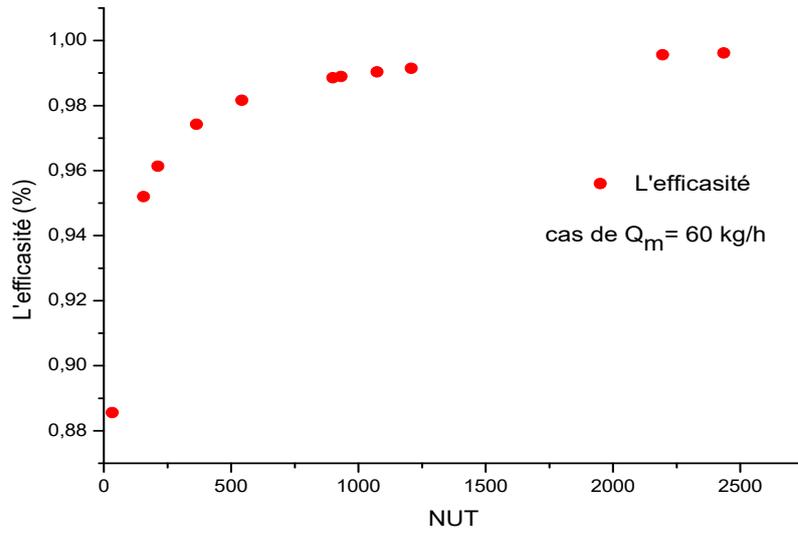
**Tableaux IV.4. :** Performances thermiques de l'échangeur calculé pour des débits d'eau égal à 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h.

Le tableau (IV.4) représente les résultats de calcul des performances thermiques de l'installation pour des débits d'eau égale 120kg/h, 90kg/h et 60kg/h respectivement, avec vitesse de ventilation et une puissance électrique consommée maintenues constantes.

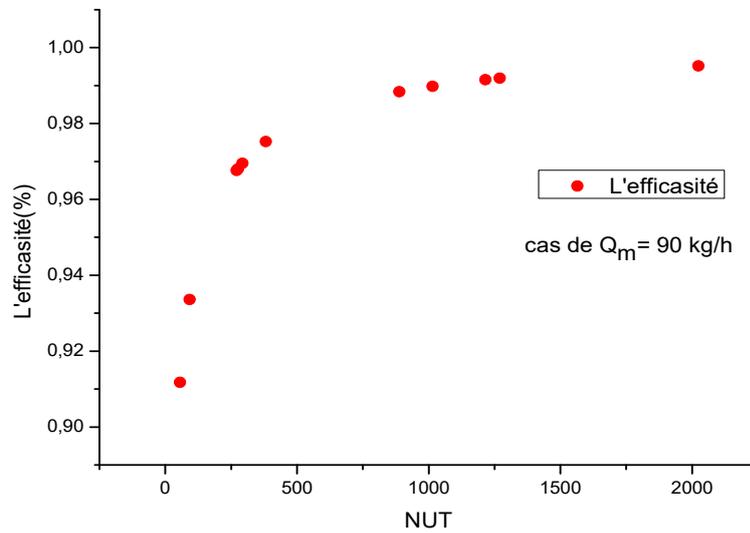
L'analyse des résultats de calcul montre que l'augmentation de la puissance thermique échangée entre les deux fluides entraîne un accroissement du coefficient d'échange global et de NUT, ce qui entraîne également une augmentation du l'efficacité de l'échangeur et le rendement du capteur solaire, ce qui permet d'obtenir un rendement de l'installation élevé, notamment pour un débit d'eau égal à 60 kg/h.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

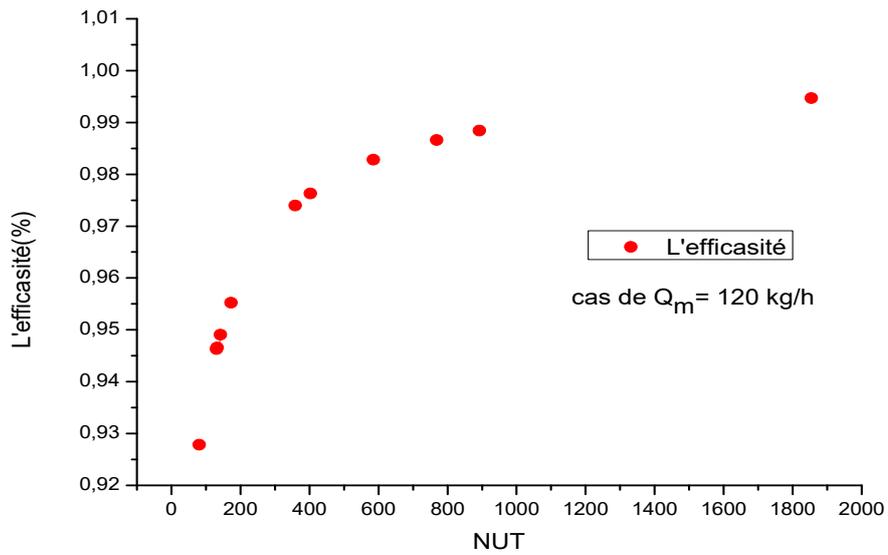
- Evolution de l'efficacité en fonction de NUT (débit d'eau fixe, débit d'air variable)



**Figure IV.14** : Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 60 kg/h.

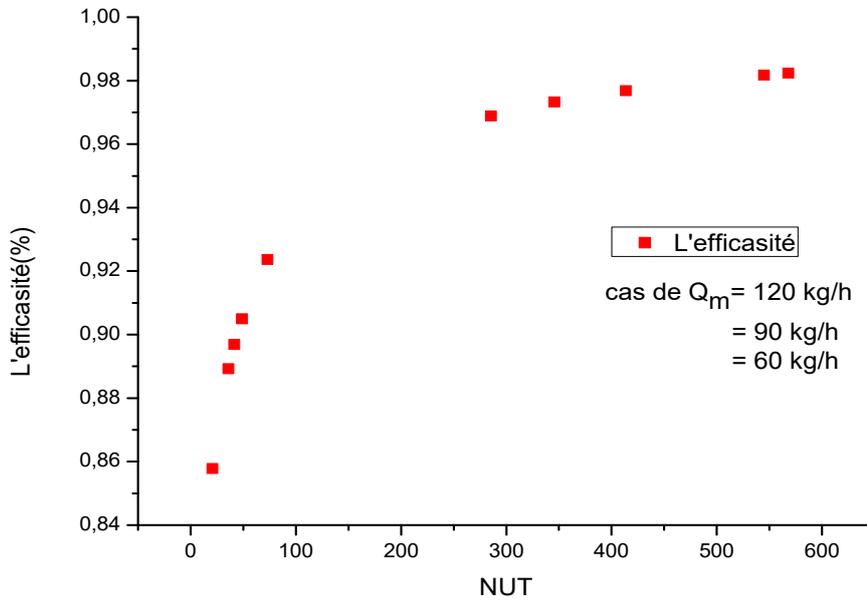


**Figure IV.15** : Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 90 kg/h.



**Figure IV.16 :** Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale à 120 kg/h.

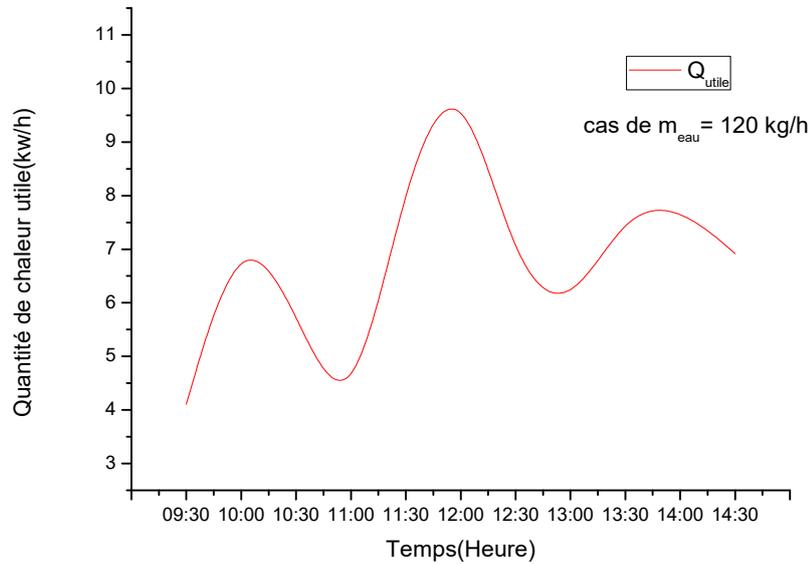
➤ Evolution de l'efficacité en fonction de NUT (débit d'eau variable, débit d'air fixe)



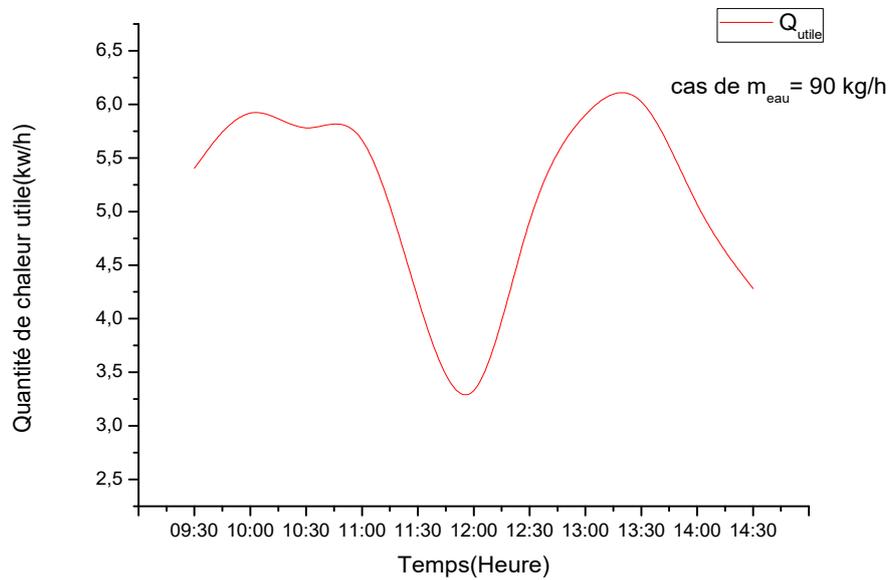
**Figure IV.17 :** Variation de l'efficacité en fonction de NUT pour un échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour des débits d'eau égale à 120 kg/h, 90 kg/h et 60 kg/h.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

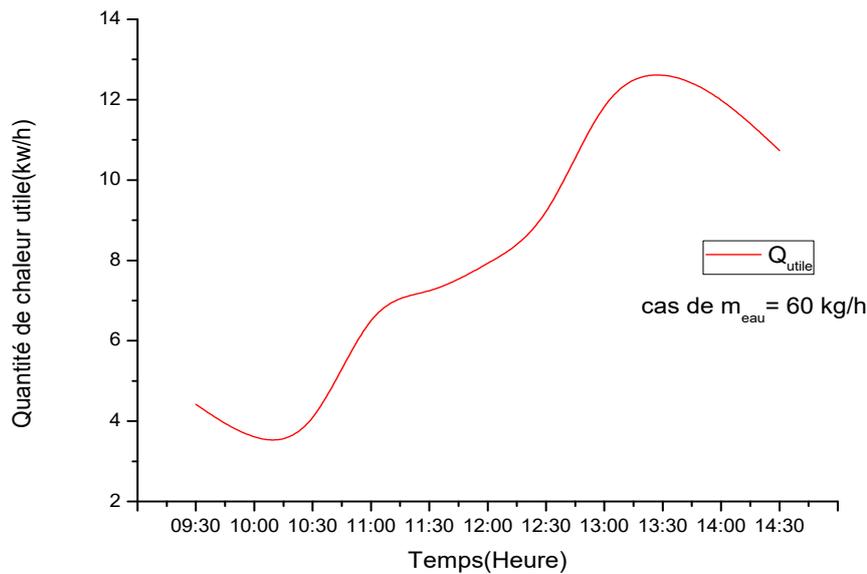
➤ Variation de la quantité de chaleur utile (débit d'eau fixe, débit d'air variable)



**Figure IV.18** : Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 120 kg/h.



**Figure IV.19** : Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 90 kg/h.



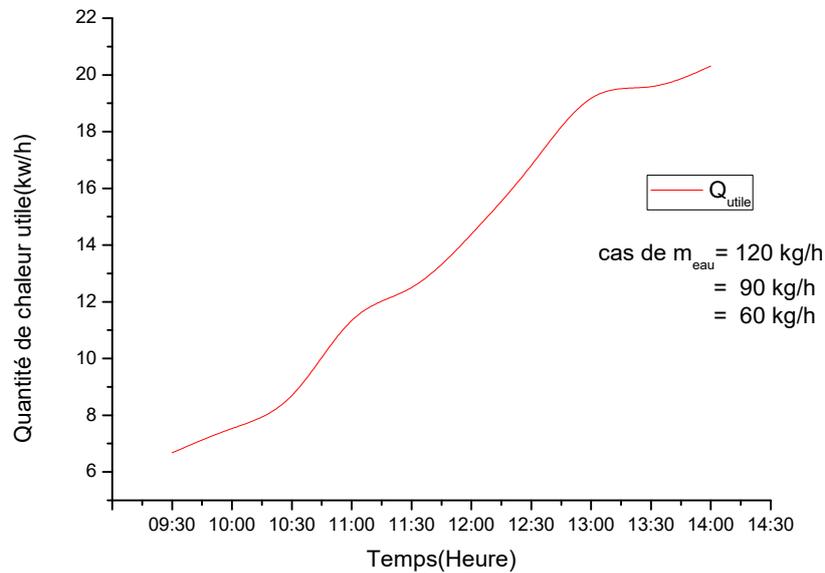
**Figure IV.20 :** Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égal à 60 kg/h.

Les courbes telles que montrées par les figures (IV.18, IV.19 et IV.20) représentent la variation de la quantité de chaleur utile produite par l'échangeur à tubes et à ailettes en fonction de temps, pour des débits massique de d'eau à travers l'échangeur égale de 120 kg/h, 90 kg/h et 60 kg/h respectivement, à savoir que pour chaque valeur de débit lui correspond une puissance électrique consommée par le ventilateur ou l'ajustement est assuré par un variateur de vitesse électrique.

L'augmentation de la quantité de chaleur produite par l'échangeur a été obtenue notamment dans le cas d'un débit d'eau égal 60 kg/h, cela est traduit par des faibles débits d'eau en circulation dans le capteur solaire d'une part et à la vitesse de l'air relativement modérée de la ventilation de l'autre part, ce qui engendre une différence de température importante entre l'entrée et la sortie de l'échangeur qui se traduit par une augmentation de la quantité de chaleur produite par l'échangeur de chaleur.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

- La variation de la quantité de chaleur utile (débit d'eau variable, débit d'air fixe)



**Figure IV.21 :** Variation de la quantité de chaleur utile pour l'échangeur à courant croisé : fluide non brassé pour un débit d'eau égale 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h.

La figure (IV.21) représente la variation de la quantité de chaleur utile produite par l'échangeur à tubes et à ailettes en fonction du temps pour des débits d'eau de l'ordre de 120 kg / h, 90 kg /h, et 60 kg/h respectivement, pour une puissance de ventilation maintenue fixe correspondant à un débit massique d'air égale à 1.385 kg/h, On remarque une augmentation importante de la quantité de chaleur utile produite par l'échangeur avec des débits d'eau chaude provenant du capteur, se traduisent des coefficients de performance come suite (pour le cas d'un ciel clair) :

- Pour un débit de 120 kg/h, le COP égale 1.18
- Pour un débit de 90 kg/h, le COP égale 1.54
- Pour un débit de 60 kg/h, le COP égale 2.06

Cela est dû à la quantité de chaleur transférée par l'eau à l'air de la ventilation en fonction du changement de débit au cours de la journée, ce qui entraîne une forte augmentation de la différence de température et une augmentation de la quantité de la chaleur produite par l'installation.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

- Variation du rendement thermique de l'installation (débit d'eau fixe, débit d'air variable)

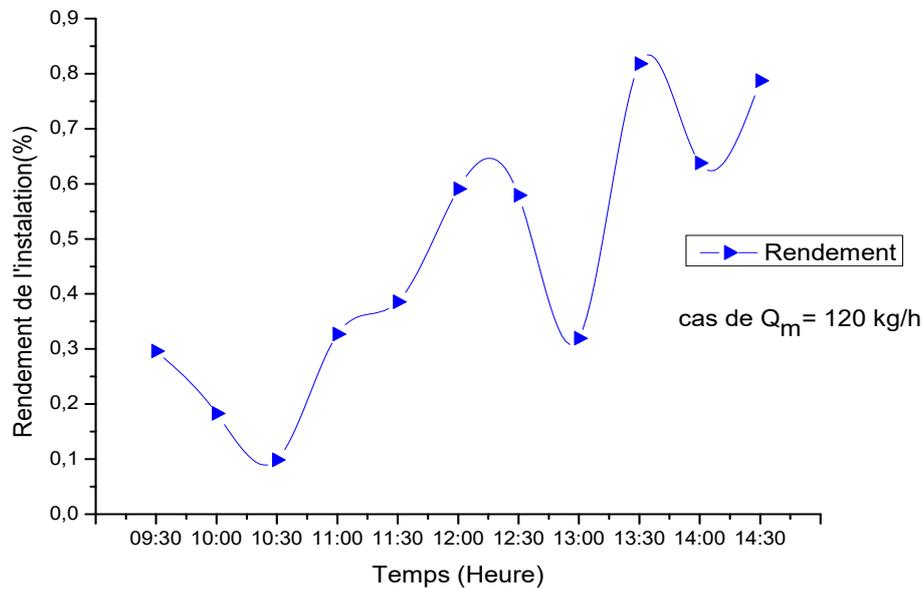


Figure IV.22 : Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 120 kg/h.

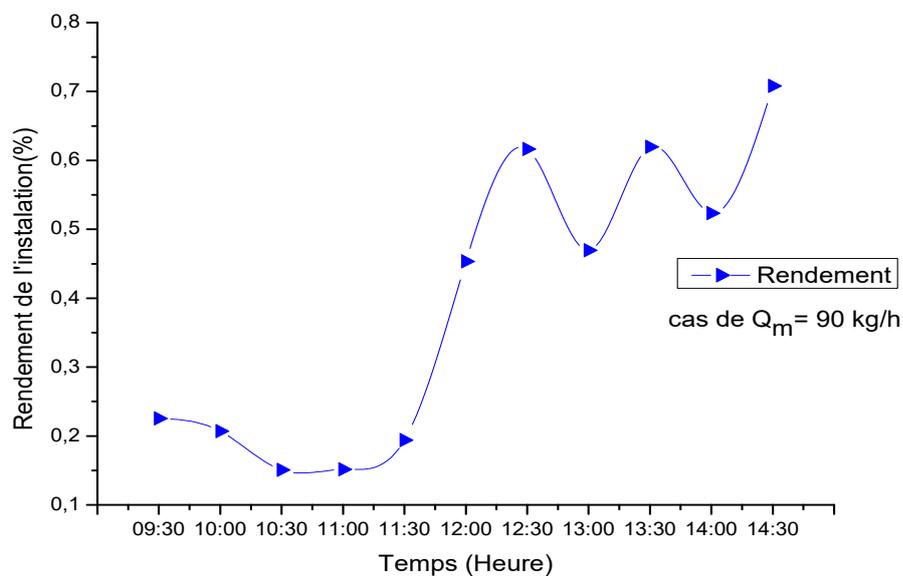
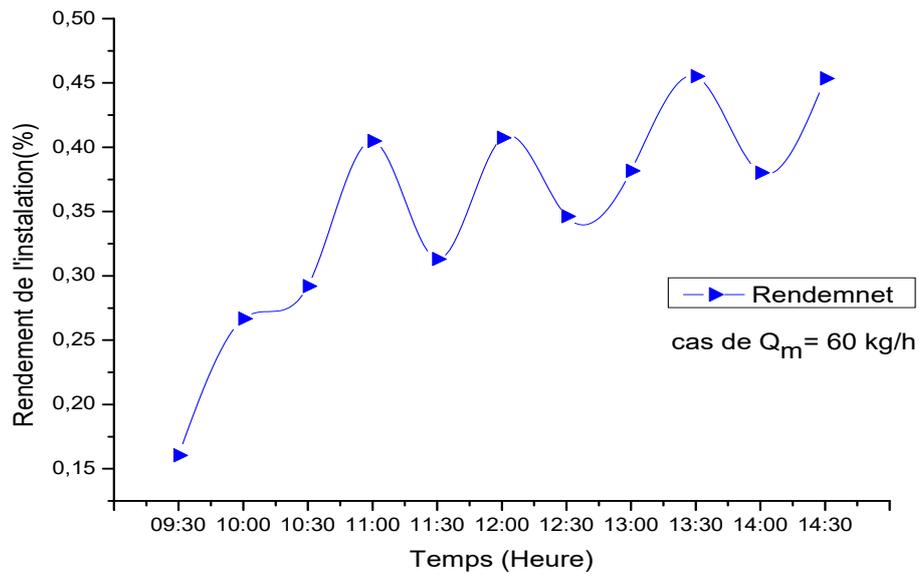


Figure IV.23 : Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 90 kg/h.

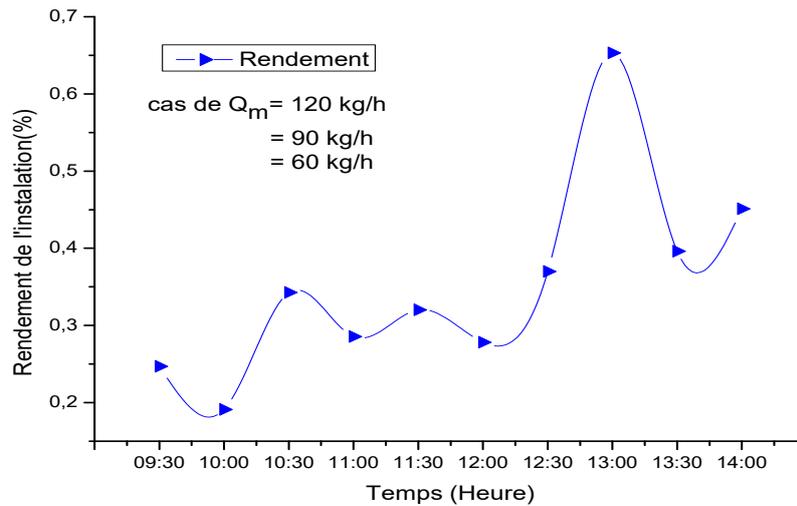


**Figure IV.24** : Evolution du rendement thermique de l'installation pour un débit d'eau égal à 60 kg/h.

Les figures (IV.21, IV.22, et IV.23) montrent les variations du rendement thermique de l'installation en fonction de temps pour des débits d'eau de 120kg/h, 90kg/h, 60kg/h, pour chaque puissance de ventilation variable (débits d'air égal 0.852 kg/h, 0.748 kg/h, et 1.141 kg/h), on constate une augmentation du rendement de l'installation, notamment avec le cas où le débit massique d'eau est de l'ordre de 120kg /h, l'augmentation est expliquée par une différence de température importante au niveau du capteur solaire à eau et à une augmentation de son rendement. En effet, plus le rendement du capteur solaire à eau est élevé, plus le rendement de l'installation est important.

## Chapitre IV : Résultats et discussions

### ➤ La variation du rendement de l'installation (débit d'eau variable, débit d'air fixe)



**Figure IV.25 :** Variation du rendement de l'installation pour un débit d'eau égal 120 kg/h, 90 kg/h, 60 kg/h.

La figure IV.24 montre la variation du rendement de l'installation en fonction du temps pour des débits d'eau chaude variables respectivement de 120 kg/h, 90 kg/h et 60 kg/h, pour une puissance de ventilation fixée (débit air = 1.385 kg/h), on constate une diminution du rendement de l'installation avec la stabilisation de l'efficacité cela est dû au changement de débit tout au long de la journée, ce qui entraîne de nombreuses pertes thermiques traduites par une diminution du rendement de l'installation par rapport aux résultats précédents figures (IV.21, IV.22 et IV.23).

#### IV.4.Conclusion :

A travers cette étude expérimentale on a pu étudier les effets de certains paramètres sur le comportement thermique de notre installation expérimentale, qui est spécifiquement conçue pour produire de la chaleur à partir de l'énergie solaire, destinée au chauffage des locaux des bâtiments en général, d'autre part, de déterminer expérimentalement les principaux paramètres de performances tels que la quantité de chaleur journalière produite, le coefficient d'échange global, l'efficacité, NUT et le rendement thermique de l'installation.

Il est important de noter que les résultats obtenus montrés sous formes des courbes selon le prototype étudié sont basés sur des expériences réelles. A travers cette étude on a pu montrer qu'il est possible de produire de l'énergie thermique grâce à l'exploitation de l'énergie solaire disponible avec des moindres coûts possibles

***Conclusion***  
***Générale***

---

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif de réaliser un banc d'essai pilote composé d'un capteur solaire plan à eau couplé à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes destiné à produire une quantité de chaleur utile à partir d'un débit d'air chaud pour chauffer les bâtiments par l'exploitation de l'énergie solaire.

Pour calculer les performances thermiques du dispositif expérimental notamment la quantité de chaleur produite, le rendement thermique et le coefficient de performance de l'installation, on a effectué plusieurs expériences sous différentes conditions climatiques, pour mettre en évidence l'effet de la variation en fonction du temps des paramètres de fonctionnement tel que les débits massiques des deux fluides caloporteurs, le rayonnement solaire incident reçu par le plan capteur et la vitesse du vent.

L'analyse des résultats obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

- L'élévation importante des différences de température pour l'eau et l'air sont obtenues en particulier avec le débit massique de l'eau circulant dans le circuit fermé de l'ordre de 60 Kg/h avec une variation du débit d'air produit par l'échangeur à tubes et à ailettes.
- L'ajustement adéquat des débits massiques d'air véhiculé dans l'échangeur et l'eau chaude provenant du capteur solaire conduit à une quantité de chaleur produite importante, également qu'à l'augmentation du coefficient d'échange global (K), du nombre d'unité de transfert (NUT), de l'efficacité ( $\epsilon$ ) et du rendement thermique de l'installation ( $\eta$ ), en effet le débit est un facteur clé dans l'évolution des performances thermiques de l'installation.
- Les débits massiques moyens et bas conduisent à une quantité de chaleur importante qui se manifeste par un coefficient de performance important.
- A travers cette étude on a pu montrer qu'il est possible de produire de l'énergie thermique grâce à l'exploitation de l'énergie solaire disponible avec des moindres coûts possibles.
- Le banc d'essai réalisé peut être exploité par les étudiants au niveau du département de Génie Mécanique pour étudier le principe de la production de l'énergie thermique à partir de l'énergie solaire en utilisant les capteurs solaires plans à eau et les échangeurs de chaleurs à tubes et à ailettes.

## Références bibliographiques

- [1] L. Bennamoun et A. Belhamri. (2007), Contribution à l'étude de faisabilité des séchoirs solaires pour les produits agricoles, Revue des Energies Renouvelables CER 07 Oujda (2007), pp. 201-204.
- [2] A. Dalila. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives". Mémoire de magister (2010), Université El Hadj Lakhder, Batna.
- [3] K. Salima. "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Mémoire de magister (2009), Université de Constantine.
- [4] Y. MAIGNE, J-P. CAUSSE, M. CLAVERIE, B. EQUER. "Les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE". Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » Juillet 2008.
- [5] Site internet: [www.Energie Solaire.com](http://www.Energie Solaire.com). Consulté le 05/01/2019.
- [6] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [7] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [8] S. Souad. "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan". mémoire de Magister (2010), 05-19 Université de Constantine.
- [9] Mr. Farouk Tahrou, « Modélisation et optimisation des échangeurs de chaleur à ailettes indépendantes », Thèse de doctorat, Université El Hadj Lakhder, Batna, 2016.
- [10] Naima. T, Hadjila. T, « Dimensionnement d'une unité de récupération de GPL à partir de gaz associé (Déthaniseur et débutaniseur) », Mémoire d'ingénieur, (2008). Université de M'hamed Bougara, BOUMERDES,
- [11] A.BONTEMPS, A.GARRIGUE, C.GOUBIER, J.HUETZ, C.MARLVILLET, P.MERCIER, R.VIDIL, « Technologie des échangeurs thermiques », Techniques de l'ingénieur (TI), groupement pour la recherche sur les échangeurs thermiques.
- [12] Boubaker L, « optimisation des paramètres de fonctionnement d'une débutaniseur, mémoire d'ingénieur, (2006), Université de M'hamed Bougara, BOUMERDES.

- [13] Laplante G, Bernier M, « Convection mixte défavorable et conjuguée dans un tube vertical », J. Heat Mass Transfer, vol. 40, No 15, (1997), pp.3527-3536.
- [14] Marchio D, Reboux P, « cours Introduction aux transferts thermiques », École des mines de Paris, ParisTech, (2008).
- [15] Bellel, N., Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries, thèse de doctorat, (2004), Université de Constantine.
- [16] BOUGRIOU CHERIF, Calcul et technologie des échangeurs de chaleur ; Edition n°5327,Metadata 1998.
- [17] Jean-Marie SEYNHAEVE, Les bases du transfert de chaleur, édition International journal of multiphase flow, 2000.
- [18] site web: <http://plomberie.comprendrechoisir.com/comprendre/tube-multicouche>, consulté le : 19 mai 2019.

## Annexe

### Propriétés physiques de l'air et de l'eau :

Propriétés de l'eau à saturation							Propriétés de l'air à 1 atm						
$\theta$	$\rho$	$c_p$	$\lambda$	$10^4 \cdot \mu$	$10^7 \cdot \alpha$	Pr	$\theta$	$\rho$	$c_p$	$\lambda$	$10^5 \cdot \mu$	$10^5 \cdot \alpha$	Pr
(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m <sup>2</sup> /s)		(°C)	(kg/m <sup>3</sup> )	(J/kg.°C)	(W/m.°C)	(Pa.s)	(m <sup>2</sup> /s)	
0	1002	4218	0,552	17,90	1,31	13,06	0	1,292	1006	0,0242	1,72	1,86	0,72
20	1001	4182	0,597	10,10	1,43	7,02	20	1,204	1006	0,0257	1,81	2,12	0,71
40	995	4178	0,628	6,55	1,51	4,34	40	1,127	1007	0,0272	1,90	2,40	0,70
60	985	4184	0,651	4,71	1,55	3,02	60	1,059	1008	0,0287	1,99	2,69	0,70
80	974	4196	0,668	3,55	1,64	2,22	80	0,999	1010	0,0302	2,09	3,00	0,70
100	960	4216	0,680	2,82	1,68	1,74	100	0,946	1012	0,0318	2,18	3,32	0,69
120	945	4250	0,685	2,33	1,71	1,45	120	0,898	1014	0,0333	2,27	3,66	0,69
140	928	4283	0,684	1,99	1,72	1,24	140	0,854	1016	0,0345	2,34	3,98	0,69
160	910	4342	0,680	1,73	1,73	1,10	160	0,815	1019	0,0359	2,42	4,32	0,69
180	889	4417	0,675	1,54	1,72	1,00	180	0,779	1022	0,0372	2,50	4,67	0,69
200	867	4505	0,665	1,39	1,71	0,94	200	0,746	1025	0,0386	2,57	5,05	0,68
220	842	4610	0,652	1,26	1,68	0,89	220	0,700	1028	0,0399	2,64	5,43	0,68
240	816	4756	0,635	1,17	1,64	0,88	240	0,688	1032	0,0412	2,72	5,80	0,68
260	786	4949	0,611	1,08	1,58	0,87	260	0,662	1036	0,0425	2,79	6,20	0,68
280	753	5208	0,580	1,02	1,48	0,91	280	0,638	1040	0,0437	2,86	6,59	0,68
300	714	5728	0,540	0,96	1,32	1,02	300	0,616	1045	0,0450	2,93	6,99	0,68

### Corrélations entre 0 et 100 °C

( $\theta$  : température en °C,  $T$  température en K)

#### Pour l'air

- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$  kg m<sup>-3</sup>
- $c_p = 1004$  J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>
- $\lambda = 7,57 \cdot 10^{-5} \theta + 0,0242$  W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>
- $\mu = 10^{-5} (0,0046 \theta + 1,7176)$  Pa s
- $\alpha = 10^{-5} (0,0146 \theta + 1,8343)$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

#### Pour l'eau

- $\rho = -0,00380 \theta^2 - 0,0505 \theta + 1002,6$  kg m<sup>-3</sup>
- $c_p = 4180$  J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>
- $\lambda = -9,87 \cdot 10^{-6} \theta^2 + 2,238 \cdot 10^{-3} \theta + 0,5536$  W m<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>
- $\mu = 10^{-4} (0,00200 \theta^2 - 0,3389 \theta + 17,199)$  Pa s
- $\alpha = 10^{-7} (-0,00360 \theta + 1,340)$  m<sup>2</sup> s<sup>-1</sup>

## ملخص

نهتم في هذا العمل بتركيب وتجريب جهاز لإنتاج الهواء الساخن لتدفئة المباني بواسطة استغلال الطاقة الشمسية عن طريق لاقط شمسي مائي مسطح مدمج في مبادل حراري مزود بأنابيب ورقاقات.

لتسليط الضوء على تأثير إعدادات التشغيل، مثل الإشعاع الشمسي، والتدفق الكتلي للماء داخل قناة المجمع الشمسي، وقوة مروحة المبادل الحراري على الأداءات الحرارية، أجريت العديد من التجارب في ظل ظروف مناخية مختلفة، مما مكننا من متابعة تطور درجات الحرارة عند المخرج بدلالة الزمن وكمية الحرارة الناتجة والكفاءة الحرارية ومعامل الأداء للجهاز.

**الكلمات المفتاحية:** لاقط شمسي مائي، مبادل حراري، تدفئة المباني، الطاقة الشمسية، الأداء.

## Résumé

Dans ce travail on s'intéresse à la réalisation et l'expérimentation d'une installation de production de l'air chaud destiné au chauffage des bâtiments par énergie solaire à l'aide d'un capteur solaire à eau intégré à un échangeur de chaleur à tubes et à ailettes.

Pour mettre en évidence l'effet des paramètres de fonctionnement, telles que l'éclairement solaire incident, le débit massique de l'eau en circulation dans le capteur et la puissance de ventilation de l'échangeur à tubes et à ailettes sur les performances thermiques, de nombreuses expériences ont été réalisés sous différentes conditions climatiques, ce qui nous a permis de suivre en fonction du temps l'évolutions des températures de sortie, la quantité de chaleur produite, le rendement thermique et le coefficient de performance de l'installation.

**Mots clés :** capteur solaire à eau, échangeur de chaleur, chauffage des bâtiments, énergie solaire, performances.

## Abstract

In this work we are interested in the realization and the experimentation of a hot air production installation intended for the heating of the buildings by solar energy by means of a solar water sensor integrated in a heat exchanger. with tubes and fins.

To highlight the effect of operating parameters, such as incident solar irradiance, the mass flow rate of circulating water in the sensor, and the fan power of the tube and fin exchanger on thermal performance. many experiments were carried out under different climatic conditions, which enabled us to follow, as a function of time, the evolution of the outlet temperatures, the quantity of heat produced, the thermal efficiency and the performance coefficient of the installation.

**Key words:** solar water collector, heat exchanger, building heating, solar energy, performance.