

**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR  
DEPARTEMENT DE MECANIQUE**

# **Projet de Fin d'études**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de  
Master**

**Option : Energies Renouvelables**

**Thème :**

## **Réalisation et Expérimentation d'un capteur solaire plan à eau**

**Présenté par : Ketfi Omar**

Soutenu le : 03 octobre 2012

Devant les jurys :

M. Lafri Djamel	promoteur	USD-Blida
Dr. Hamid Abdelkader	président de jury	USD-Blida
Dr. Abdi Hamid	membre de jury	USD-Blida
Dr. Semmar Djafar	membre de jury	USD-Blida

**Année Universitaire**

**2011/2012**

**Dédicace :**

**Je dédié ce modeste travail à mes parents qui mon beaucoup  
encourager pour terminer ce travail, à mes frères et à mes cousins et  
cousines.**

**Sans oublier mes oncles et a tous mes tantes, ainsi tous mes collègues et  
mes amis sans exception.**

### **Remerciements :**

**Je tiens à remercier louange à Allah qui m'a donnée le courage, la patience et la capacité de mener ce travail à terme.**

**J'exprime mes vifs remerciements à mon promoteur Mr D-Lafri, pour m'avoir encadré durant mon travail.**

**Je tiens également à remercier tous les enseignants qui m'ont aidé le long de mon travail.**

**Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à monsieur le chef du département de mécanique Mr Toumy et les employer de l'atelier de mécanique Abdelkader et Smaine pour leurs aide pendant la réalisation de mon projet.**

**Mes vifs remerciements vont également à tous mes collègues, à Moustapha qui m'a aidé à réaliser ce projet, Et à mes chers parents pour leur soutien et leur éducation.**

## **Résumé**

Le but de ce travail est la réalisation et l'expérimentation d'un capteur solaire plan à circulation du liquide en respectant les conditions de la norme Européenne EN 12975-2.

Le capteur réalisé au sein de l'université de Blida est constitué d'un boîtier de parois d'aluminium, et d'une plaque absorbante en acier galvanisé de forme convexe, l'échangeur de chaleur est un serpentin en cuivre de 19 mètres de longueur.

L'expérimentation de notre capteur se fait dans le but de déterminer les performances ainsi le rendement de ce dernier.

En variant la température d'entrée du fluide au capteur, les performances du capteur sont déduites.

Une partie de résultats et interprétations est établie à la fin de ce travail.

## **Abstract**

The aim of this work is the realization and experimentation of a solar liquid circulation plan according to European standard EN 12975-2. The collector realized in the University of Blida is a form Aluminum housing and a galvanized steel plate absorber convex shaped, the heat exchanger is a serpentine of 19 meters in length. The characterization of our sensor is for the purpose of determining the performance and efficiency of the latter.

By varying the inlet temperature of the fluid to the collector, collector performance will be deducted.

Part of results and interpretations is set at the end of this work.

## ملخص :

الهدف من هذا العمل هو الانجاز و تحديد الخصائص لملتقط الطاقة الشمسية لتسخين المياه وفقا للمعيار الاوروبي 12975-2.

تم صنع ملتقط الطاقة في جامعة البليدة و هو مصنوع من الالمنيوم من الخارج, و مجهز بصفيحة حديدية غير قابلة للأكسدة, الانبوب الناقل للماء عبارة عن انبوب نحاسي بطول 19 متر.

تخصيص الملتقط تأتي بهدف تحديد خصائصه و تحديد عائد الملتقط, و ذلك بتغيير درجة حراره المياه في مدخل الملتقط.

جزء يحتوي على النتائج و التفسيرات مذكور في اخر العمل.

## Table des matières

<b>Liste des figures</b> .....	<b>I</b>
<b>Liste des tableaux</b> .....	<b>III</b>
<b>Nomenclature</b> .....	<b>IV</b>
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Le présent travail</b> .....	<b>1</b>
<b>Travaux portant sur les capteurs solaires thermiques</b> .....	<b>3</b>
<b>Chapitre 1 : notions générales sur l'énergie solaire</b> .....	<b>6</b>
I-1. Introduction .....	6
I-2. Le soleil .....	6
I-3. La constante solaire $I_c$ et l'indice de clarté $K_t$ .....	6
I-4. Le corps noir .....	7
I-5. Position du soleil .....	7
I-5-1. Les coordonnées équatoriales .....	7
I-5-2. Les coordonnées horizontales .....	9
I-6. Les coordonnées géographiques d'un site .....	10
I-7. Mouvement de la terre .....	10
I-8. Orientation d'un plan .....	11
I-9. L'angle d'incidence sur un plan .....	12
I-10. Le rayonnement solaire .....	13
I-11. Eclairage solaire sur un plan incliné .....	14
I-12. Conclusion.....	16
<b>Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques</b> .....	<b>17</b>
II-1. Introduction .....	17
II-2. Éléments de construction des capteurs solaire plans thermiques .....	17

II-3. Surface des capteurs nécessaire .....	21
II-4. Bilan optique du capteur solaire .....	22
II-4-1. Définition du rendement optique d'un capteur solaire .....	22
II-5. Le rendement optique du capteur .....	25
II-6. Conclusion .....	25
II-7. Bilan énergétique d'un capteur solaire .....	26
II-7-1. Hypothèses .....	26
II-7-2. Bilan thermique .....	26
II-7-3. Les pertes thermiques dans un capteur solaire .....	27
II-7-3-a. Pertes thermique vers l'avant du capteur .....	27
II-7-3-b. Pertes thermique vers l'arrière du capteur .....	29
II-7-3-c. Pertes thermiques latérales du capteur .....	29
II-8. Bilan thermique sur l'absorbeur .....	30
II-8-1. L'efficacité de l'ailette .....	30
II-8-2. Efficacité de l'absorbeur .....	31
II-8-3. Le facteur de conductance .....	31
II-9. Le rendement d'un capteur solaire plan .....	32
II-10. Conclusion .....	33
<b>Chapitre 3 : Norme Européenne EN 12975-2 .....</b>	<b>34</b>
III-1. Introduction .....	34
III-2. La norme européenne EN 12975-2 :2006 .....	34
III-3. Conditions d'essai .....	34
III-4. Déroulement des tests .....	36
III-4-1. Conditions de teste .....	36
III-5. Nombre de points de mesure .....	37
III-6. La constante du temps .....	37

III-7. Le rendement instantané .....	38
III-8. Conclusion .....	38
<b>Chapitre 4 : Etude Expérimentale .....</b>	<b>39</b>
IV-1. Introduction .....	39
IV-2. Description du capteur solaire plan .....	39
IV-3. Réalisation en photos du capteur solaire .....	40
IV-4. Caractéristiques du capteur .....	40
IV-5. Instruments utilisées .....	41
IV-5-1. Le circulateur .....	41
IV-5-2. La résistance de chauffage .....	42
IV-5-3. Clapet anti-retour .....	42
IV-6. Les instruments de mesure utilisés lors du test du capteur .....	43
IV-6-1. Mesure des températures .....	43
IV-6-2. Mesure du débit .....	44
IV-6-3. Mesure de l'éclairement solaire .....	45
IV-6-4. Acquisition des données .....	45
IV-7. Le support du capteur .....	46
IV-8. Déroulement des tests expérimentaux .....	46
IV-8-1. Détermination expérimentale de la contenance en fluide .....	46
IV-8-2. Régulation expérimentale du débit massique .....	47
IV-8-3. Calcule des pertes de charge dans le capteur .....	47
IV-8-4. Variation expérimentale de la température d'entrée du fluide .....	47
IV-8-5. Calcule expérimentale de la constante du temps .....	47
IV-8-6. Testes expérimentaux du rendement instantané .....	48
IV-9. Conditions à respecter avant d'entamer les tests .....	49
IV-10. Conclusion .....	49

<b>Chapitre 5 : résultats et discussions .....</b>	<b>50</b>
V-1. Introduction .....	50
V-2. Résultats expérimentaux .....	50
V-2-1. Calcul de la constante du temps .....	50
V-3. Interprétation des résultats .....	52
V-4. Circuit fermé .....	53
V-4-1. Interprétation des résultats .....	54
V-4-2. Détermination du rendement journalier du capteur .....	55
V-5. Représentation des courbes de résultats .....	56
Journée 17/07/2012 ( $T_e = T_a \pm 1^\circ\text{C}$ ).....	56
Journée du 19/07/2012 : circuit fermée .....	58
V-6. Tableaux de calculs .....	60
V-6-1. Pour le calcul de la constante du temps .....	60
V-6-2. Tableau des relevés pour le calcul du rendement instantané .....	61
V-7. Représentation du rendement du capteur suivant le standard ASHRAE .....	62
V-8. Conclusion .....	63
 <b>Conclusion générale .....</b>	 <b>64</b>

**Annexe A : Conception**

**Annexe B : Réalisation en photos du capteur solaire plan**

**Annexe C : Résultats supplémentaires**

**Annexe D : Les normes et les standards**

**Annexe E : Article**

## **Liste de figures :**

## **Pages**

<i>Figure (1-1)</i> : Le spectre solaire	<b>1</b>
<i>Figure (1-2)</i> : Le spectre solaire en fonction de la longueur d'onde	<b>2</b>
<i>Figure (1.3)</i> : Les coordonnées horizontale du soleil	<b>4</b>
<i>Figure (1.4)</i> : Les coordonnées géographiques d'un site	<b>5</b>
<i>Figure (1.5)</i> : Mouvement de la terre autour du soleil	<b>6</b>
<i>Figure (1.6)</i> : Les angles caractérisant un capteur plan inclinée	<b>7</b>
<i>Figure (1.7)</i> : Les différents types de rayonnement solaire	<b>8</b>
<i>Figure (2-1)</i> : Les différentes configurations du circuit hydraulique	<b>13</b>
<i>Figure (2-2)</i> : Vue d'ensemble d'un capteur solaire plan à circulation du liquide	<b>14</b>
<i>Figure (2-3)</i> : Réfraction d'un rayon solaire	<b>16</b>
<i>Figure (2-4)</i> : Réflexion et transmission entre le couvert et l'absorbeur	<b>18</b>
<i>Figure (2-5)</i> : Bilan thermique d'un capteur plan	<b>21</b>
<i>Figure (2-6)</i> : Coupe sur l'absorbeur	<b>24</b>
<i>Figure (2-7)</i> : Schéma de l'absorbeur avec le serpentín	<b>24</b>
<i>Figure (4-1)</i> : Représentation du capteur réaliser	<b>32</b>
<i>Figure (4-2)</i> : Le circulateur électrique	<b>35</b>
<i>Figure (4-3)</i> : Vanne de réglage du débit	<b>35</b>
<i>Figure (4-4)</i> : Résistance de préchauffage	<b>35</b>
<i>Figure (4-5)</i> : Clapet anti-retour	<b>36</b>
<i>Figure (4-6)</i> : Thermocouple type K	<b>37</b>
<i>Figure (4-7)</i> : Schéma des dispositions des thermocouples dans le circuit	<b>37</b>
<i>Figure (4-8)</i> : Emplacement des thermocouples d'entrée et sortie du capteur	<b>37</b>
<i>Figure (4-9)</i> : Disposition des thermocouples dans le capteur	<b>37</b>

<b>Figure (4-10) : Mesure du débit massique</b>	<b>38</b>
<b>Figure (4-11) : Positionnement du Solarimètre</b>	<b>38</b>
<b>Figure (4-12) : Appareille d'acquisition (enregistreur de données)</b>	<b>39</b>
<b>Figure (5-1) : Constante du temps</b>	<b>44</b>
<b>Figure (5-2) : Circuit fermé de la journée du 19/07/2012</b>	<b>46</b>
<b>Figure (5-3) : Variation de l'éclairement globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012</b>	<b>49</b>
<b>Figure (5-4) : Variation des températures d'entrée et sortie et ambiante en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012</b>	<b>49</b>
<b>Figure (5-5) : Variation de la température supérieure et inférieure de la plaque absorbante en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012</b>	<b>50</b>
<b>Figure (5-6) : Variation de l'éclairement solaire globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 19/07/2012</b>	<b>51</b>
<b>Figure (5-7) : Variation des températures d'entrée et sortie et ambiante en fonction du temps pour la journée du 19/07/2012</b>	<b>51</b>
<b>Figure (5-8) : Variation de la température supérieure et inférieure de la plaque absorbante pour la journée du 19/07/2012</b>	<b>52</b>
<b>Figure (5-9) : Variation de la température supérieure et inférieure de la cuve pour la journée du 19/07/2012</b>	<b>52</b>
<b>Figure (5-10) : Evolution du rendement instantané suivant le standard ASHRAE</b>	<b>55</b>

**Remarque :** *les figures de réalisation du capteur son en Annexe.*

**Liste des tableaux :****pages**

<b><i>Tableau (2-1)</i></b> : Tableaux des différents types de couches sélectives et leurs caractéristiques	
<b>12</b>	
<b><i>Tableau (3-1)</i></b> : Les caractéristiques des instruments de mesure suivant la norme	
EN 12975-2	<b>28</b>
<b><i>Tableau (3-2)</i></b> : Tableau des limites des paramètres que doit respecter suivant la norme	
EN 12975-2	<b>29</b>
<b><i>Tableau (3-3)</i></b> : La gamme de variation des différents paramètres suivant la norme	
EN 12975-2	<b>29</b>
<b><i>Tableau (4-1)</i></b> : Caractéristiques techniques des éléments du capteur solaire	<b>34</b>
<b><i>Tableau (4-2)</i></b> : Caractéristiques techniques du capteur solaire	<b>34</b>
<b><i>Tableau (4-3)</i></b> : Caractéristiques des différents instruments de mesures	<b>36</b>
<b><i>Tableau (5-1)</i></b> : Calcul de la constante du temps	<b>53</b>
<b><i>Tableau (5-2)</i></b> : Relevés de tests pour le calcul du rendement instantané	<b>54</b>

## Nomenclature :

Symboles	désignations	unités
$I_c$	constante solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
$I$	éclairement solaire	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_\beta$	Éclairement globale sur une surface inclinée	[W/m <sup>2</sup> ]
$k_t$	indice de clarté	
$J$	numéro du jour	
$Q$	quantité de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]
$\dot{Q}$	Puissance thermique	[ W ]
$\sigma$	constante de Stephan Boltzmann	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\delta$	Déclinaison du soleil	[degré]
$\omega$	Angle horaire	[degré]
$\omega_s$	Angle horaire au lever au coucher du soleil	[degré]
$T_{sv}$	temps solaire vrai	[heures]
$T_l$	temps locale	[heures]
$E_t$	équation du temps	[minute]
$L_{ref}$	longitude de référence	[degré]
$L_{lieu}$	longitude du lieu	[degré]
$D$	décalage horaire	
$h$	la hauteur du soleil	[degré]
$\varphi$	Latitude du lieu	[degré]
$z$	altitude du lieu	[mètre]
$a$	azimut du soleil	[degré]
$\beta$	Inclinaison d'un plan	[degré]
$H_c$	hauteur du capteur	[degré]
$\gamma$	Azimut d'un plan	[degré]
$\theta$	Angle d'incidence	[degré]

$\bar{\sigma}$	Fraction d'insolation mensuelle	
$\sigma_f$	Fraction d'insolation	
Rb	coefficient de convention géométrique	
e	épaisseur	[mètre]
D	diamètre	[mètre]
r	réflexion	
$\tau$	Transmittivité	
K	coefficient d'extinction, conductivité, Kelvin	[W/m.K], [273.15+°C]
$\dot{m}$	débit massique	[Kg/s]
$\rho$	Réfectivité	
$\alpha$	Absorptivité	
$\varepsilon$	Émissivité	
$\rho_d$	Réfectivité du vitrage (pour le diffuse)	
$\rho_s$	Albédo du sol	
T	température	[°C]
h	coefficient de transfert par convection	[W/m².K]
U	coefficient de pertes thermiques	
w	longueur de l'ailette	[mètre]
A	surface m²	
l	largeur mètre	
L	longueur, Litre	[metre], [L]
Cp	chaleur spécifique	[Kj/Kg.K]
$\eta$	Rendement	
$\eta_0$	rendement optique	

**Indice :**

a	ambiante
c	ciel, convection, capteur
v	vitrage
b	direct
d	diffuse
g	global
r	réfléchi, rayonnement
l	latérales
i	interne
e	externe, eau, entrée
s	sortie
u	utile
eff	effective
p	plaque
av	avant
arr	arrière
lat	latérale
is	isolant
mf	moyen fluide

## **Introduction générale :**

En Algérie le chauffage de l'eau sanitaire est assuré par l'énergie conventionnelle (gaz naturelle, électricité, et fuel). Les principaux systèmes utilisés sont les chauffe-eau solaire individuelles a gaz, cumulus électrique et chauffage centrale utilisant une chaudière pour les collectives.

Ces formes d'énergie présente plusieurs inconvénients, dont les réserves sont limitées. Pour palier a cette carence, de nouvelles formes d'énergie sont progressivement utilisées dont nous citons l'énergie solaire.

Cette dernière présente les avantages suivants :

- Renouvelable.
- Propre donc permet la préservation de l'environnement.
- Facilement exploitables.
- Peu couteuse.
- Permet d'économiser l'énergie conventionnement ce qui revient à économiser des devises pour le pays.

Plusieurs raison font de l'Algérie un site très favorable pour une utilisation très large de cette énergie renouvelable, nous citons :

- L'importance du potentielle annuel d'énergie solaire.
- La large population habitant dans des endroits isolés dépourvus de l'électricité et du gaz
- L'augmentation du prix de l'énergie conventionnelle dans les dernier temps

## **Le présent travail :**

Le présent travail est une réalisation d'un dispositif de conversion d'énergie solaire en énergie thermique (chaleur), ce dispositif est appeler capteur solaire plan a circulation du liquide.

La surface globale du capteur est de 2m<sup>2</sup>. Le circuit hydraulique est un serpentin de 19 mètres de longueur, le boitier étant construit en aluminium.

Dans ce document on s'introduit en premier à l'énergie solaire et son utilisation ainsi le modèle estimant l'énergie solaire sur un élément de surface.

Pour la deuxième partie du travail, on s'introduit au détaillés de réalisation ainsi la norme utiliser pour les tests de notre capteur.

Pour la dernière partie, les résultats du comportement du capteur a des températures d'entrée variables, et a des différents types de circuit sont établit.

## 2- Travaux portant sur les capteurs solaires thermiques :

### **1 - Installation de chauffage solaire d'eau à usage domestique par monsieur**

#### **D-Lafri :**

L'installation collective du chauffage d'eau solaire est conçue pour chauffer 400 litres d'eau à 50°C. Cette valeur peut être supérieure ou inférieure selon l'éclairement solaire.

Le système se compose de deux principaux sous-systèmes :

#### *Sous système de captage :*

L'installation est équipée par quatre capteurs de 2 m<sup>2</sup> de surface, le circuit hydraulique est de type radiateur a tubes parallèles.

#### *Sous système de stockage :*

L'installation est équipée d'une cuve de stockage collectif de 400 Litres.

La figure montre le schéma de l'installation étudiée :

### **2 - Conception et réalisation d'un chauffe-eau solaire :**

**Par** Alioune Diop SY 2006/2007

Alioune Diop SY à réaliser un chauffe-eau solaire pour une famille de 15 personnes. Les parois du capteur sont en bois, et le circuit hydraulique est en forme de serpent. L'isolation est faite par la laine de verre.



### **3- Réalisation d'un chauffe-eau solaire a thermosiphon :**

Lionel Barra Janvier 2006

Réalisation de deux panneaux solaires de 2.9 m<sup>2</sup>. Circuit hydraulique (tubes parallèles) Deux cuves de stockage de 220 L et 200 L.

Par journée bien ensoleillée, l'eau chaude solaire arrive ballon à + de 70°, ce qui me permet le soir d'avoir 200 litres d'eau à 55°. Après puisage de l'eau chaude (douche, bain) il reste encore de l'eau à environ 45°, Au matin, les deux cuves se sont équilibrées vers 30°.

Mise en place des capteurs (environ 150 Kg)



#### **4 - Optimisation d'un Capteur Solaire Plan**

Par : A-Benkhelifa

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Dans cet article un modèle mathématique permettant de calculer les pertes thermiques vers l'avant d'un capteur solaire plan (entre l'absorbeur et l'ambiance) est présenté.

Après avoir comparé les résultats obtenus par rapport à ceux issus de relations empiriques rencontrées dans la littérature, un programme de calcul pour étudier l'influence de quelques paramètres physiques et géométriques sur le coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur est établi.

#### **5 - Etude préliminaire du potentiel de production d'eau chaude par capteurs plans solaires pour une application industrielle dans la région des Hauts Plateaux**

B. Boutaghriout<sup>1</sup>, A. Ghouari<sup>1</sup>, C. Hamouda<sup>1</sup> et A. Malek

Une contribution à l'étude du potentiel de production d'eau chaude d'une installation, utilisant des capteurs plans, implantée sur le site de l'Université de Batna. Donner, en premier lieu, un aperçu sur le contexte énergétique mondial en termes de consommation d'énergie et de niveaux de températures requis dans le secteur industriel, ainsi qu'une analyse de la consommation nationale par vecteurs énergétiques dans le secteur de l'industrie. Ensuite, une définition de la chaîne de mesure appliquée au banc d'essai expérimental, suivi par le modèle de simulation établi. Et présentation de l'interface d'acquisition et de contrôle du système, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

## **6- Article : Heat removal factor for a flat-plate solar collector with a serpentine tube**

**Par : S.I.Abdel-Khalik**

### **Résumé :**

L'article présente l'étude des performances d'un capteur plan. Celui-ci est de type plaque absorbante plus tube en forme de serpent. Des équations relatives aux variations de température du fluide dans les différents segments du serpent sont établies.

Ces équations sont ensuite utilisées pour déterminer le facteur d'évacuation de chaleur  $Fr$  du capteur. Dans le cas général d'un serpent à  $N$  boucles, le facteur d'évacuation de chaleur dépend de trois groupes adimensionnels comportant les différents paramètres de construction et d'utilisation du capteur solaire.

Un schéma général d'estimation de  $Fr$  pour des capteurs à serpent de géométrie et de nombre de boucle quelconques est présenté.

## **7- Thèse : Contribution à la détermination des performances de capteur plan à contact direct eau-plaque d'absorption (forme convexe et concave)**

**Par : H.Abdi**

Monsieur H.Abdi a étudié l'influence de la forme de la plaque absorbante sur le rendement du capteur, la comparaison du rendement de trois capteurs solaires plans dont deux ont une plaque d'absorption de forme concave et la troisième de forme convexe a donné que le capteur avec la plaque absorbante de forme convexe a le meilleur rendement.

## **8 - Tests des capteurs solaires à circulation liquide suivant la norme EN 12975-2 :**

Un banc de tests pour les capteurs solaires plan est présent dans le centre de développement des énergies renouvelables à Alger.

Le banc de tests permet de déterminer les performances thermiques des capteurs solaires à circulation de liquide en régime stationnaire et quasi-stationnaire.

La norme sur laquelle sont basés les tests est la norme européenne EN 12975-2-2006 dont les conditions de test sont mentionnées dans le Tableau (3-2).

### **Instrumentation utilisée :**

- La mesure des températures est assurée par des thermocouples de type K (-250 °C à 1 372 °C), et de type J (0 à 750 °C).
- Pour la mesure du rayonnement solaire global, un pyranomètre est exploité.
- Les débitmètres à flotteur pour la mesure du débit, peu coûteux et précis.
- un anémomètre pour la mesure de la vitesse du vent.



**Figure : photo du banc de teste des capteurs solaires plans**

Pour voir l'article complet (voir Annexe E)

# CHAPITRE 1

## NOTIONS GÉNÉRALES SUR L'ÉNERGIE SOLAIRE

## I-I. Introduction

Il semble que ce soit les égyptiens qui aient découvert l'effet de serre. Au 3<sup>e</sup> siècle avant J-C, Archimède a brûlé la flotte romaine à Syracuse avec des miroirs plans groupés de façon à former un miroir concave.

En 1615 Salomon de Caus construit une pompe dont la force motrice est fournie par de l'air chauffé par le soleil. En 1878, le professeur A. Mouchot a inventé une machine à vapeur à l'aide d'un grand miroir conique.

La crise de l'énergie en 1973 a relancé de nombreux travaux de recherches en héliotechnique. Espérons que de la multitude des montages réalisés, et du fonctionnement des études théoriques entreprises, naîtront quelques systèmes faibles, peu coûteux et bon rendement, capables de concurrencer économiquement les machines existantes à énergie classiques.

## I-2. Le soleil

Le soleil a une importance primordiale sur le plan humain puisque sans elle la vie n'existe pas sur terre. Son diamètre est de 1 391 000 Km et sa température apparente est environ 5 800 °K et la distance moyenne terre soleil de 149 450 000 de kilomètre.

Une toute petite partie de son énergie arrive sur terre sous forme d'ondes électromagnétiques d'où leur longueur d'onde varie de 0.25 micron à 4 micron [1].

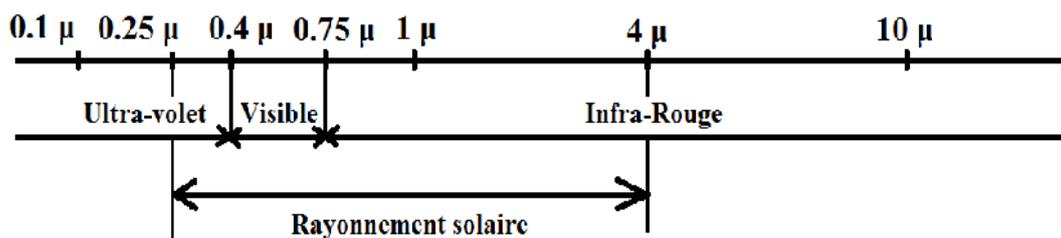


Figure (1-1) : le spectre solaire

Avec : 1 micron = 0.001 millimètre = 1μ

## I-3. La constante solaire $I_c$ et l'indice de clarté $K_t$ :

C'est le flux énergétique reçu par une surface unitaire, sa valeur a été retenue de 1367 W/m<sup>2</sup>.

On introduit une correction due à la variation de la distance terre soleil :

$$f = 1 + 0.034 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} (J - 5)\right) \quad (1-1)$$

**J** : le numéro du jour partant du 1<sup>er</sup> janvier.

#### I-4. Le corps noir :

C'est un corps d'une parfaite absorption des radiations de différents longueur d'onde, et est aussi totalement émissif. Son émittance énergétique (le flux d'énergie par unité de surface pour tous le spectre solaire) n'est fonction que de la température, et donnée par la loi de STEPHAN :

$$Q = \sigma . T^4 \text{ [W/m}^2\text{]} \quad (1-2)$$

Avec :

$$\sigma : 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{.K}^4\text{]} \quad \text{constante de Stephan.}$$

Le spectre solaire à la limite de l'atmosphère terrestre étant assimiler à un corps noir a la température de 5 800 °K. Pour cela dont tous nos calcule on assimile le soleil a un corps noir de température 5 800 °K.

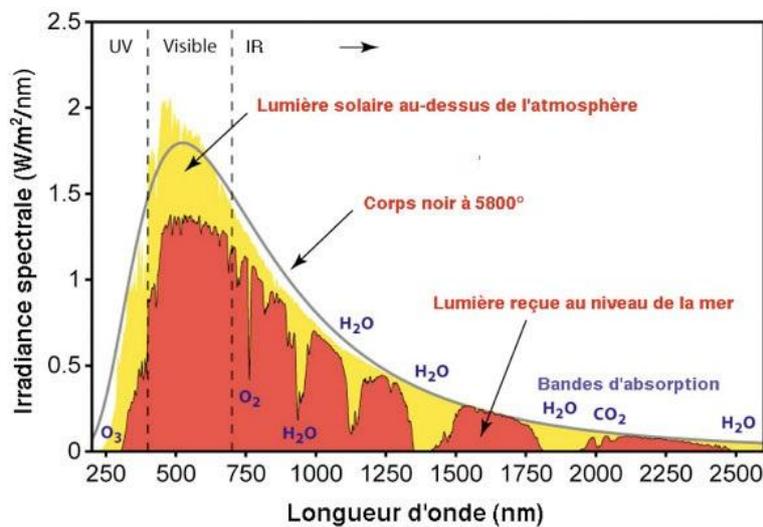


Figure (1-2) : le spectre solaire en fonction de la longueur d'onde

#### I-5. Position du soleil :

Le soleil peut être repérer tout le long de la journée à l'aide de deux types de coordonnées (Equatoriales et Horizontales)

##### I-5-1. Les coordonnées équatoriales :

Ce sont les coordonnées qui dépends du plan équatoriale pour le repérage du soleil.

### I-5-1-1. La déclinaison du soleil :

C'est l'angle formée par le plan équatoriale et la direction terre soleil, il est compris entre -23.45 ° et +23.45 °

Sa formule est :

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left((284 + J) \cdot \frac{360}{365}\right) \quad (1-3)$$

Avec : **J** : le numéro du jour.

### I-5-1-2. L'angle horaire :

C'est l'angle formé par le méridien origine (le demi-cercle reliant le point nord avec le sud, on prend le méridien origine de Greenwich) et la projection de la direction du soleil sur le plan équatoriale.

L'angle horaire correspond à 15 ° chaque 1 heure, il vaut 0 ° à midi, et de 90 ° à 18 h, et -90 ° à 6 h. sa formule est :

$$\omega = 15 \cdot (T_{sv} - 12) \quad (1-4)$$

Avec :

$T_{sv}$  : le temps solaire vrai, c'est le temps légal corrigé par l'effet de l'écart entre la longitude du lieu et celle de référence :

$$T_{sv} = T_l + E_t + 4 \cdot (L_{ref} + L_{lieu}) + D \quad (1-5)$$

Avec :

$$E_t = 9.87 \sin 2B - 7.53 \cos B - 1.5 \sin B$$

Equation du temps. Comprise entre -16 min et +16 min

$$\text{Avec } B = \frac{360}{365} \cdot (J - 81)$$

$L_{ref}$  : Longitude de référence (prendre égale à 0 °).

$L_{lieu}$  : Longitude du lieu.

**D** : Décalage horaire (en Algérie D=1).

### I-5-2. Les coordonnées horizontales :

Se repère est formée par le plan de l'horizon avec la verticale du lieu.

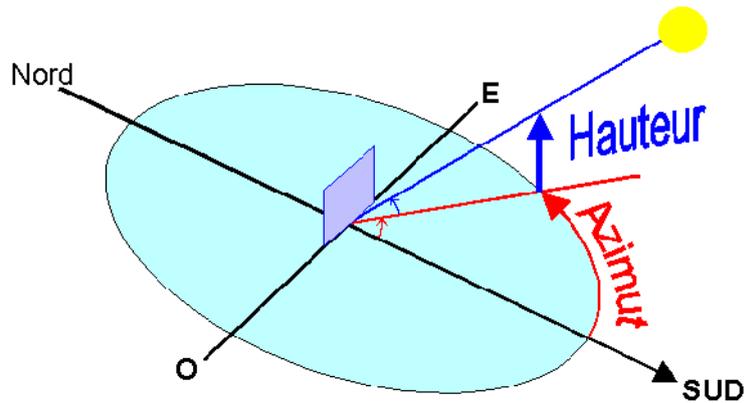


Figure (1.3) : les coordonnées horizontale du soleil

#### I-5-2-1. La hauteur du soleil :

La hauteur du soleil est l'angle formée par la direction du soleil avec sa projection sur le plan horizontale, il vaut  $0^\circ$  au lever et coucher du soleil et  $90^\circ$  au midi solaire.

Sa formule est :  $\sin h = \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \omega + \sin \delta \cdot \sin \varphi$  (1-6)

D'où on tire la relation de l'angle horaire au lever et coucher du soleil :

Au lever au coucher du soleil  $h=0$  en remplant dans la formule précédente on trouve :

$$\omega_s = -\tan \delta \cdot \tan \varphi \quad (1-7)$$

D'où :  $\omega_s < 0$  au lever

$\omega_s > 0$  au coucher

#### I-5-2-2. L'azimut du soleil :

C'est l'angle formé par la projection de la direction du soleil avec le plan horizontale, sa formule est :

$$\sin a = \frac{\cos \delta \cdot \sin \omega}{\cos h} \quad (1-8)$$

## I-6. Les coordonnées géographiques d'un site :

### I-6-1. La latitude du lieu : $\varphi$

Il correspond à l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre et le lieu avec le plan de l'équateur.

$\varphi < 0$  l'hémisphère Sud

$\varphi > 0$  l'hémisphère Nord

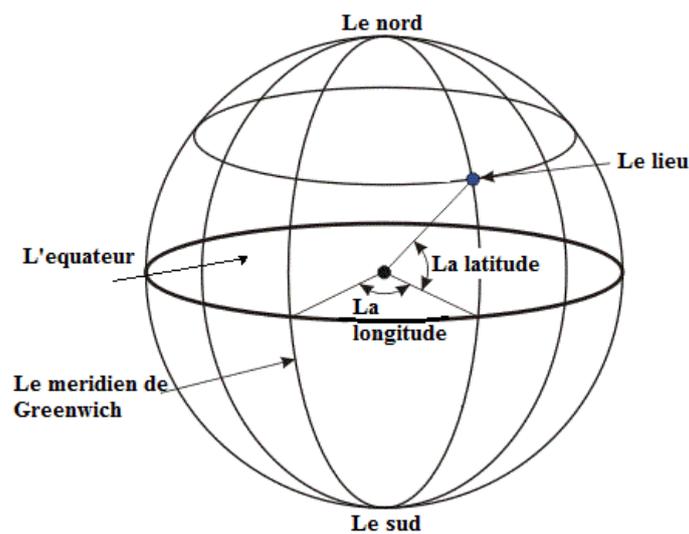
$\varphi = 0$  sur le plan de l'équateur

### I-6-2. La longitude du lieu : $L_{lieu}$

Il correspond à l'angle entre la méridienne origine et celui passant par le lieu, on choisit l'origine à  $0^\circ$ .

### I-6-3. L'altitude du lieu : $z$

Elle correspond à l'élévation d'un lieu (en mètre) par rapport au niveau de la mer.



*Figure (1.4) : les coordonnées géographiques d'un site*

## I-7. Mouvement de la terre :

La terre tourne autour de son axe dans une période de 24 h, et on tournant autour du soleil dans une période de 365.25 jours.

Le plan sur laquelle la terre tourne autour du soleil est appeler *plan de l'écliptique*.

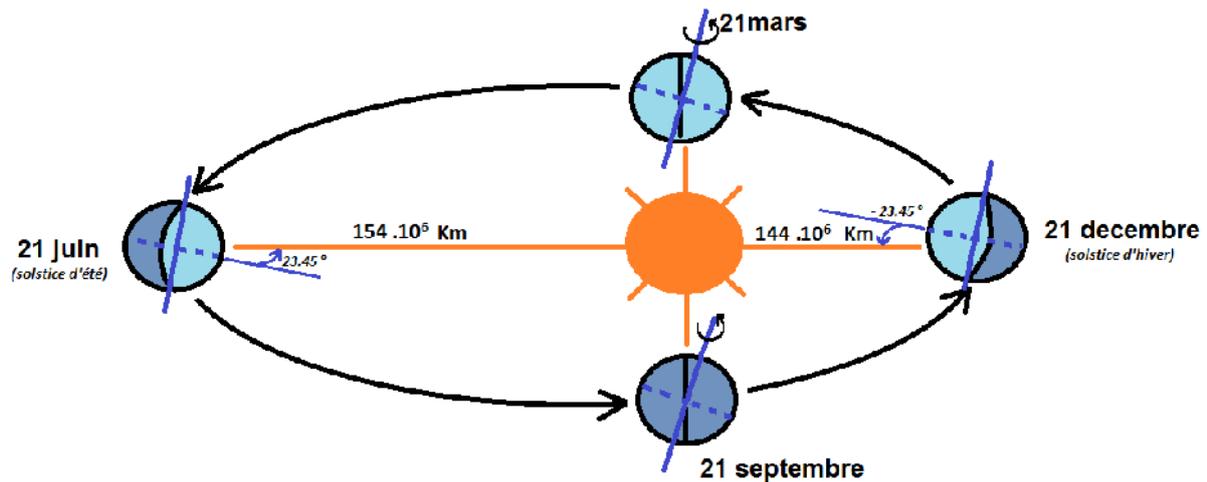


Figure (1.5): mouvement de la terre autour du soleil

### I-8. Orientation d'un plan :

N'importe qu'elle plan est défini par deux angles importantes :

#### I-8-A. L'inclinaison du plan : $\beta$

C'est l'angle que fait le plan (le capteur) avec l'horizontale. Généralement on choisit  $\beta = \varphi$  pour un calage annuel, pour un calage saisonnier on prend :

Pour l'hiver  $\beta = \varphi + 10^\circ$

Pour l'été  $\beta = \varphi - 10^\circ$

On peut définir aussi la hauteur du capteur  $Hc$  comme étant l'angle entre la normale du capteur et le plan horizontal, tel que :  $Hc = 90 - \beta$

#### I-8-B. L'azimut du plan (déviation azimutale) : $\gamma$

C'est l'angle que fait la projection de la normale du plan sur le plan horizontal avec la direction sud.

Pour un capteur orienté plein sud  $\gamma = 0$ .

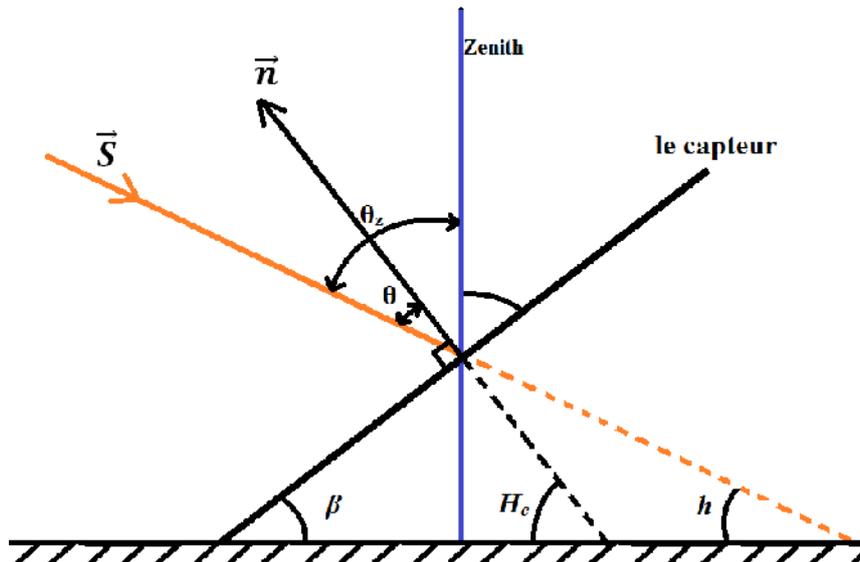


Figure (1.6): les angles caractérisant un capteur plan inclinée

### I-9. L'angle d'incidence sur un plan : $\theta$

C'est l'angle formé par la normale du plan avec le vecteur portant la direction du soleil.

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

Sa formule est :  $\cos \theta = \vec{n} \cdot \vec{S}$

On trouve :

$$\cos \theta = \sin \varphi \cdot \sin \delta \cdot \cos \beta - \sin \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \beta \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \cos \beta \cdot \cos \omega + \cos \varphi \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (1-9)$$

Cas particulier :

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

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin(\varphi - \beta) + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos(\varphi - \beta)$$
- Pour un calage annuel de type ( $\beta=\varphi$ ) :

$$\cos \theta = \cos \omega \cdot \cos \delta$$

### I-10. Le rayonnement solaire :

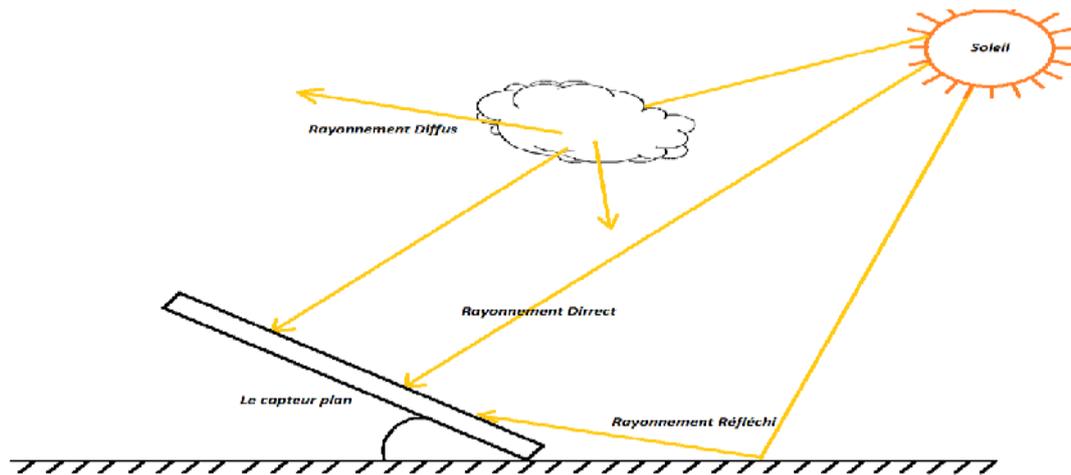


Figure (1.7) : les différents types de rayonnement solaire

#### I-10-1. Différents type d'éclairement solaire :

- **Eclairement solaire direct :  $I_b$**

C'est l'éclairement solaire provenant directement du disque solaire sans aucune perturbation ou changement de direction.

- **Eclairement solaire diffuse :  $I_d$**

Des constituants, les molécules de gaz, les aérosols, nuage interceptent l'éclairement solaire directe. Après différents phénomènes complexes le rediffusent vers le sol. Le rayonnement diffus est donc la part de cette diffusion, il importe d'ajouter la réflexion des surfaces avoisinantes dans le cas des récepteurs inclinés.

- **Eclairement solaire réfléchi :  $I_r$**

C'est tout éclairement renvoyé par une surface, l'éclairement réfléchi par la terre s'appelle Albédo du sol.

- **Eclairement solaire globale :  $I_g$**

C'est la somme de l'éclairement directe et diffuse, ce type d'éclairement est mesuré par un pyranomètre.

### I-11-2. La fraction d'insolation : $\sigma$

C'est le rapport de la durée d'insolation quotidienne sur la durée astronomique du jour (intervalle entre le lever et coucher du soleil),  $\sigma$  est par définition :

$$\sigma_f = \frac{\text{durée d'insolation}}{\text{durée du jour}} \quad (1-10)$$

$$\sigma_f \text{ mensuelle } (\bar{\sigma}_f): \quad \bar{\sigma}_f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_i$$

### I-11. Eclairement solaire sur un plan incliné :

#### I-11-1. Coefficient de conversion géométrique : $R_b$

Le coefficient  $R_b$  permet la conversion de l'éclairement **direct** reçu sur un plan horizontale vers le plan inclinés.

On note :  $I_\beta$  : éclairement solaire reçu sur un plan incliné.

$I_h$  : éclairement reçu sur une surface horizontale.

$$D'où : I_\beta = \frac{\cos \theta}{\sin h} \cdot I_h \quad \text{avec} \quad R_b = \frac{\cos \theta}{\sin h} \quad \text{coefficient de conversion géométrique direct}$$

$$\text{Pour l'éclairement diffue : } R_d = \frac{\text{éclairement diffue sur un plan incliné}}{\text{éclairement diffue sur un plan horizontale}} \quad (\text{ciel claire } R_d=1)$$

#### I-11-2. Estimation de l'éclairement solaire direct :

Il existe deux méthodes pour la détermination de l'éclairement solaire au niveau du sol :

La 1<sup>er</sup> méthode est basée sur les données expérimentales a l'aide des stations radiométriques.

La 2eme méthode est par l'utilisation des modèles mathématiques, pour le reste de notre travail on utilisera le modèles de CAPDEROU qui estime l'éclairement solaire globale et diffue par la relation suivante [5] :

$$I_g = 1080 \cdot \left(1 + 0.033 \cdot \cos\left(\frac{360}{365} \cdot J\right)\right) \cdot \sin h \cdot \left(\frac{\sin h}{0.89z}\right)^{0.22} \quad (1-11)$$

$$I_d = 1.25 \cdot (\sin h)^{0.4} \quad (1-12)$$

$$I_b = I_g - I_d$$

Avec :  $J$  : le numéro du jour

$z$  : l'altitude du lieu

$h$  : la hauteur du soleil

Donc l'éclairement solaire incident sur un plan inclinée par un angle  $\beta$  est donnée par :

$$I_{\beta} = R_b \cdot I_b + R_{dc} \cdot F_{p-c} \cdot I_d + R_{ds} \cdot F_{p-s} \cdot \rho \cdot I_g \quad (1-13)$$

Avec :

$I_{\beta}$  : Éclairement globale sur une surface inclinée par un angle  $\beta$ .

$(R_b \ R_{dc} \ R_{ds})$  : Coefficient de conversion géométrique (direct, diffuse ciel, diffuse sol)

Prendre  $R_{dc}=1$  et  $R_{ds}=1$  [5]

$F_{p-c}$  : Facteurs de forme entre la surface et le ciel, il est donnée par :  $F_{p-c} = \frac{1+\cos\beta}{2}$

$F_{p-s}$  : Facteurs de forme entre la surface et le sol, est donnée par :  $F_{p-s} = \frac{1-\cos\beta}{2}$

### I-11-3. Estimation de l'irradiation solaire :

Mickel CAPDEROU (1987) :

$$\frac{H_{gh}}{H_{cc}} = 0.41 + 0.58 \cdot \bar{\sigma}_f \quad \text{Et} \quad \frac{H_{dh}}{H_{cc}} = 0.53 - 0.35 \cdot \bar{\sigma}_f \quad (1-14) \quad (1-15)$$

$$\frac{H_{gh}}{H_0} = 0.43 + 0.30 \cdot \bar{\sigma}_f \quad (1-16)$$

Avec :  $H_{cc}$  : irradiation solaire par ciel clair

$H_0$  : irradiation solaire hors atmosphère

$H_{gh}$  : irradiation solaire globale sur un plan horizontale

$H_{dh}$  : irradiation solaire diffuse sur un plan horizontale

**Relation de l'irradiation en fonction de l'indice de clarté  $K_t$  :**

$$K_t = \frac{H_{gh}}{H_0} \quad (1-17)$$

CAPDEROU a proposé pour l'Algérie [5] :

$$\frac{H_d}{H_g} = 0.91 - 0.98 \cdot \bar{K}_t \quad (1-18)$$

## Chapitre I : Notions générales sur l'énergie solaire

### **Conclusion :**

Pour une installation solaire, il est nécessaire d'étudier les caractéristiques du site désiré tel que l'irradiation solaire dans ce site pour cette installation.

Les capteurs solaires doivent toujours être orientés vers le sud (pour les pays situés dans l'hémisphère nord).

L'énergie absorbée par un capteur solaire dépend essentiellement de la nature du vitrage ainsi que la nature de la plaque absorbante (matériau + revêtement).

# CHAPITRE 2

## LES CAPTEURS SOLAIRES THERMIQUES

## II-1. Introduction :

Les capteurs solaires plan thermiques sont des systèmes fondamentaux de transformation d'énergie solaire (éclairage) en énergie calorifique (chaleur), ces systèmes sont utilisés principalement pour le chauffage de l'eau sanitaire, les piscines ou bien pour le chauffage des habitats.

Pour un éclairage solaire important, les températures ne peuvent atteindre les 100 °C, pour cela ces systèmes sont appelés système à basse température.

Il existe trois types de capteurs solaires thermiques :

- Capteurs solaires thermiques plan.
- Capteurs solaires thermiques à tubes sous vide.
- Capteurs solaires thermiques à air.

## II-2. Éléments de construction des capteurs solaires plans thermiques :

Les capteurs solaires thermiques sont constitués d'un boîtier en acier galvanisé, à l'intérieur se trouve une plaque absorbante en acier peint en noir mate pour capter le maximum d'énergie solaire, et un échangeur de chaleur entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur.

### II-2-a. Le boîtier :

C'est l'ensemble qui supporte les différentes composantes du capteur, il constitue l'enveloppe du capteur.

Il est généralement en acier inoxydable (éviter problème de rouille) ou bien en aluminium pour augmenter sa durée de vie.

Le boîtier doit être rigide pour supporter le poids de tous les éléments du système.

### II-2-b. L'isolant :

L'isolant sert à réduire les pertes par convection et par conduction à travers la surface du boîtier, sa matière doit satisfaire les conditions suivantes :

- Ne doit pas être toxique ni explosif.
- Il doit résister à la gamme de température utilisée.
- Il doit résister à l'humidité présente dans le capteur.

L'épaisseur de l'isolant doit se situer dans la gamme indiquée ci-dessous :

**Latérale :  $0.035 < e_i < 0.075$  m**

**Arrière :  $0.03 < e_{iarr} < 0.05$  m**

### II-2-c. La plaque absorbante :

Son rôle est de transformé l'éclairement solaire incident sur le capteur en chaleur, puis le transmettre de son tour au fluide caloporteur.

Le choix de la plaque absorbante est basé sur les facteurs suivants :

- Conductivité élevée.
- La durabilité.
- Absorptivité élevée.
- Emissivité relativement faible.

#### *La sélectivité de la plaque absorbante :*

On appelle sélectivité d'une plaque, le rapport du coefficient d'absorption  $\alpha$  sur le coefficient d'émission d'infrarouge  $\epsilon$ .

On appelle couche sélective de la plaque absorbante une couche de peinture noire mate (pour éliminer les réflexions), cette couche doit être très mince et doit supporter des températures de 100 à 110°C.

Dans les applications de chauffage d'eau sanitaire, on cherche toujours a augmenté la sélectivité de la plaque pour augmenter la partie absorber du rayonnement solaire incident et diminuer la partie réfléchi, pour cette raison le revêtement de la plaque absorbante (couche sélective) est très important.

#### *Les différentes couches sélectives :*

Revêtement sélectif	Plaque absorbante	Coefficient d'absorption	Coefficient d'émission
<b>Chrome noir</b>	Cuivre, Acier	0.91 – 0.96	0.07 – 0.16
<b>Cuivre noir</b>	Cuivre, Nickel, Aluminium	0.81 – 0.93	0.11 – 0.17
<b>Nickel noir</b>	Nickel, Acier	0.89 - 0.96	0.07 – 0.17
<b>Oxyde de d'aluminium</b>	Aluminium	0.9	0.1 – 0.4
<b>Oxyde de fer</b>	Acier	0.85	0.08

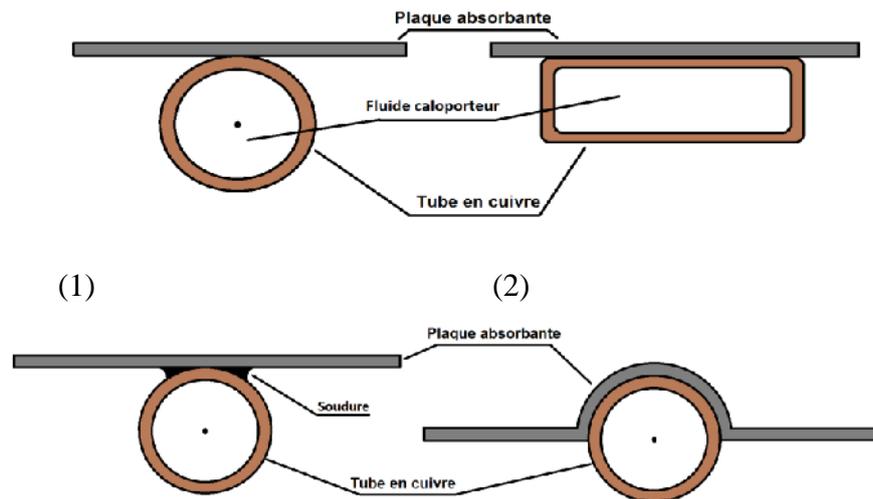
*Tableau (2-1) : Tableaux des différents types de couches sélectives et leurs caractéristiques*

### II-2-d. Le circuit hydraulique :

Le rôle du circuit hydraulique est de récupérer la chaleur obtenue à l'absorbeur et la transmet au fluide caloporteur circulant dans ce dernier, pour cela on doit avoir le meilleur contacte entre la plaque absorbante et notre circuit hydraulique pour éviter toute résistance thermique supplémentaire.

## Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

On peut définir quatre types de contact plaque-circuit :



- (3) (4)
- 1 – contact plaque-tube cylindrique.
  - 2 – contact plaque-tube rectangulaire.
  - 3 – soudure plaque-tube.
  - 4 – forme convexe de la laque absorbante.

Il existe différents configuration pour la réalisation du circuit hydraulique :



*Figure (2-1) : les différentes configurations du circuit hydraulique*

!

### II-2-e. Le fluide caloporteur :

Son rôle est de transporter la chaleur récupérée de la plaque absorbante au stockage ou à l'utilisation suivant le type de circuit utilisé.

On utilise généralement de l'eau contenant un antigel pour éviter le gel à l'hiver et la corrosion dans les canalisations.

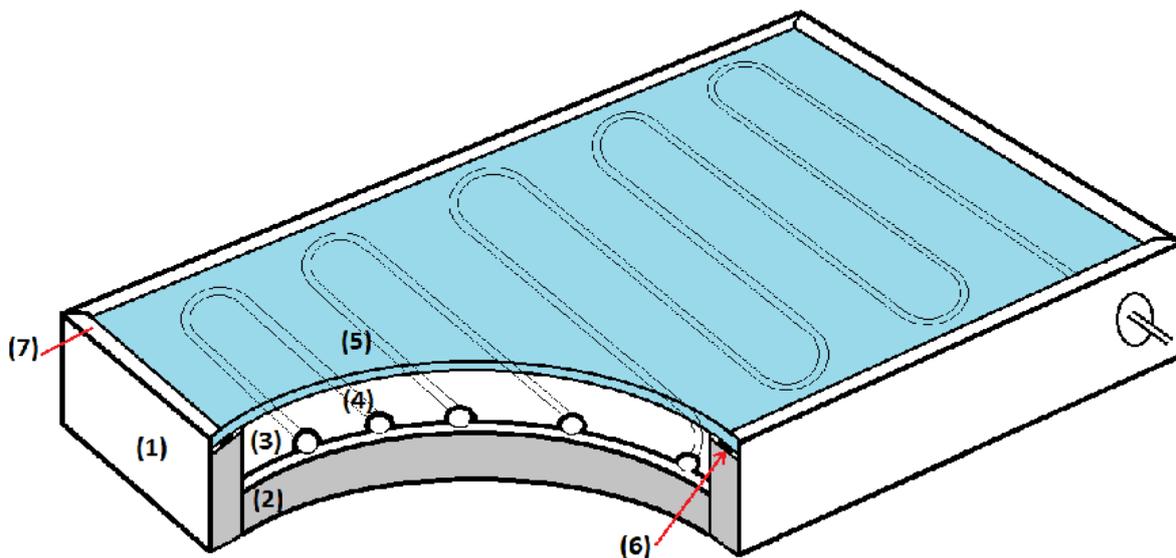
### II-2-f. La couverture transparente :

La couverture transparente est facultative, mais elle peut permettre d'accroître sensiblement le rendement du capteur par la création de l'effet de serre.

L'intérêt d'une couverture transparente peut avoir deux intérêts :

- La protection contre les impuretés et les conditions désagréables de la météo,
- le second rôle est très important c'est la création de l'effet de serre par laisser traverser les rayons solaires à courte longueur d'onde (le visible) et empêcher les rayons à grande longueur d'onde (rayons infrarouge) de sortir, cet effet est appelé effet de serre qui permet l'augmentation du rendement du capteur solaire.

La nature de la couverture peut être en plastique ou en verre, ce dernier présente un grand rendement et une durée de vie très importante par rapport au plastique.



*Figure (2-2) : vue d'ensemble d'un capteur solaire plan à circulation du liquide*

1 – parois du capteur.

5 – couverture transparente.

2 – isolation.

6 – joint d'étanchéité

3 – plaque absorbante.

7 – traverses de fixation.

4 – circuit hydraulique (serpentin).

**II-3. Surface des capteurs nécessaire : [3]**

La surface nécessaire pour une installation solaire de chauffage d'eau est donnée par :

$$\text{surface capteur requis} = \frac{\text{Demande en energie}}{\text{energie solaire par m}^2 * \text{efficacité du capteur}}$$

## II-4. Bilan optique du capteur solaire :

### II-4-1. Définition du rendement optique d'un capteur solaire :

On définit un rendement optique comme étant le rapport entre l'irradiation solaire incidente sur le capteur et celle qui sera absorbée par ce dernier.

#### II-4-2-a. Pour les rayons directs :

##### *Approche mathématique :*

Un éclairage  $I$  passant d'un milieu (1) d'indice du milieu  $n_1$  à un milieu (2) d'indice  $n_2$  subit une transformation décrite par la loi de SNELL :

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$$

Avec :

$I$  est le rayonnement solaire incident sur la surface avec un angle d'incidence  $\theta_1$ , et décomposée en deux rayons  $I_t$  transmis et  $I_r$  réfléchi.

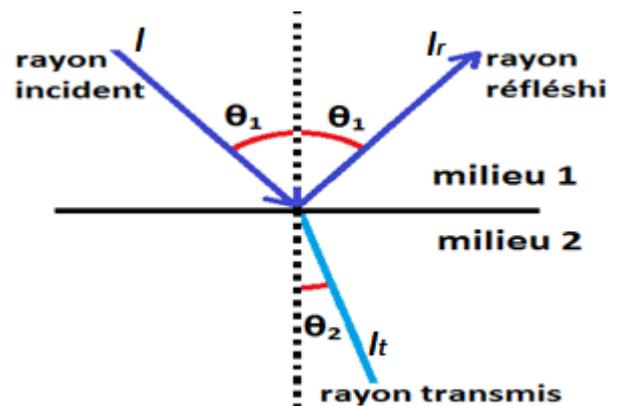


Figure (2-3) : réfraction d'un rayon solaire

##### *Model de Fresnel :*

Une onde électromagnétique est décomposée en deux composantes, parallèle et perpendiculaire.

Chaque composante a le même comportement.

##### *Réflexion globale parallèles et perpendiculaire :*

$$r_{//} = \left[ \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \quad (2-19)$$

$$r_{\perp} = \left[ \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right]^2 \quad (2-20)$$

La réflexion globale d'une interface sera la demi somme de  $r_{//}$  et  $r_{\perp}$  :  $r = \frac{r_{//} + r_{\perp}}{2}$

**Transmittivité parallèle et perpendiculaire :**

$$\tau_{//} = (1 - r_{//})^2 \cdot \tau_a + (1 - r_{//})^2 \cdot \tau_a^3 \cdot r_{//}^2 + (1 - r_{//})^2 \cdot \tau_a^5 \cdot r_{//}^4 + \dots$$

$$\tau_{//} = \frac{(1-r_{//})^2 \cdot \tau_a}{1-r_{//}^2 \cdot \tau_a^2} \quad (2-21)$$

Ou la Transmittivité perpendiculaire est décrite de la même manière.

Avec :  $\tau_a = \exp(-K \cdot l)$  (2-22)

Avec : K : coefficient d'extinction.

l : le chemin optique

$$l = \frac{e}{\cos \theta_2}$$

La Transmittivité globale :  $\tau = \frac{\tau_{//} + \tau_{\perp}}{2}$

**La réflectivité parallèle et perpendiculaire :**

$$\rho_{//} = r_{//} + (1 - r_{//})^2 \cdot \tau_a^2 \cdot r_{//} + (1 - r_{//})^2 \cdot \tau_a^4 \cdot r_{//}^3 + \dots$$

$$\rho_{//} = r_{//} \cdot (1 + \tau_a \cdot \tau_{//}) \quad (2-23)$$

La réflectivité perpendiculaire est décrite de la même manière.

La réflectivité globale :  $\rho = \frac{\rho_{//} + \rho_{\perp}}{2}$

**L'Absorptivité parallèle et perpendiculaire :**

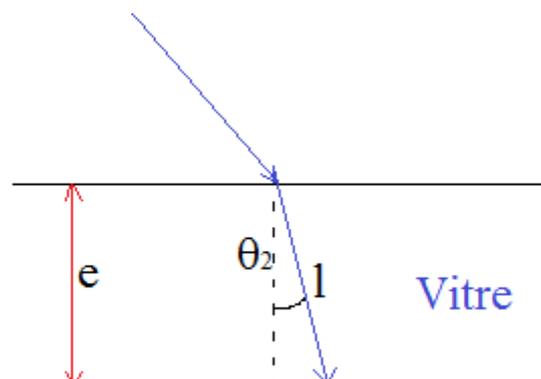
$$\alpha_{//} = \frac{(1-\tau_a)(1-r_{//})}{1-r_{//} \cdot \tau_a} \quad (2-24)$$

L'absorptivité perpendiculaire est décrite de la même manière.

Absorptivité globale :  $\alpha = \frac{\alpha_{//} + \alpha_{\perp}}{2}$

**II-4-2-b. Pour les rayons diffusés :**

Beckmann estime que le rayonnement diffusé se comporte comme le rayonnement direct avec un angle équivalent à 60°



## Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

Selon Diffie & Beckmann [12], l'angle dit effectif du **diffue ciel** est donnée par la relation suivante :

$$\theta_e = 59.68 - 0.1388 \beta + 0.001497 \beta^2 \quad (2-25)$$

Et l'angle effectif du **diffue sol** est donnée par :

$$\theta_e = 90 - 0.5788 \beta + 0.002693 \beta^2 \quad (2-26)$$

Avec :

$\beta$  : l'inclinaison du capteur.

**Le produit effectif  $(\tau\alpha)_{eff}$  :**

Il représente la fraction de l'énergie absorbé par la plaque absorbante de l'énergie incidente :

$$(\tau\alpha)_{eff} = \frac{G}{I_g \beta}$$

Posons :  $G = (\tau\alpha)_{eff} \cdot I_g$  (2-27)

$G$  : énergie absorbé par la plaque absorbante.

**Avec :**

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau\alpha(1 + (1 - \alpha)\rho_d + (1 - \alpha)^2\rho_d^2 + \dots) = \tau\alpha \sum_{i=0}^{\infty} [(1 - \alpha)\rho_d]^i$$

Cette somme peut se mettre à la forme : [12][5]

$$(\tau\alpha)_{eff} = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (2-28)$$

**Avec :**  $\rho_d = \tau_a \cdot (1 - \tau)$  : réflectivité du vitrage pour le rayonnement diffus [12]

Le calcul de  $(\tau\alpha)_{eff}$  se fait pour les trois composantes (Direct, Diffuse ciel et Diffuse sol).

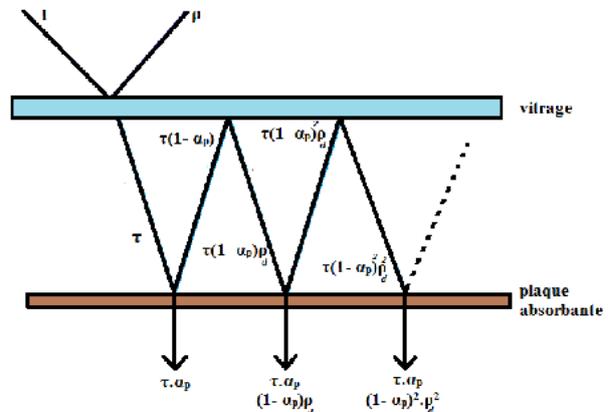


figure (2-4) : Réflexion et transmission entre le couvert et l'absorbeur

### II-5. Le rendement optique du capteur :

C'est le rapport entre l'énergie optique absorber par le capteur et celle incidente.

$$\eta_0 = \frac{\text{éclairement absorber}}{\text{éclairement incident}} = \frac{I_{abs}}{I_{inc}}$$

Avec : [5]

$$I_{inc} = R_b \cdot I_b + \frac{1+\cos\beta}{2} \cdot I_d + \rho_s \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} (I_b + I_d) \quad (2-29)$$

$$I_{abs} = R_b \cdot I_g (\tau\alpha)_{effb} + \frac{1+\cos\beta}{2} \cdot I_d \cdot (\tau\alpha)_{effdc} + \rho_s \cdot \frac{1-\cos\beta}{2} (I_b + I_d) \cdot (\tau\alpha)_{effds} \quad (2-30)$$

Avec :  $\rho_s$  : coefficient de réflexion du sol (Albédo).

### II-6. Conclusion :

On peut conclure que la Transmittivité d'une vitre (couvert) est en fonction de la qualité du couvert et son épaisseur, ainsi son indice du milieu et l'angle d'incidence de la radiation solaire et son coefficient d'extinction.

L'absorptivité d'une plaque dépend des propriétés physico-chimiques de la plaque et de la longueur d'onde de la radiation solaire. Les surfaces noires ont un coefficient d'absorption très élevée et proche de l'unité.

L'énergie reçue par un capteur dépend essentiellement de deux facteurs très importants, la Transmittivité du couvert et l'absorptivité de la plaque absorbante.

## II-7. Bilan énergétique d'un capteur solaire :

### II-7-1. Hypothèses :

- 1- Le régime d'écoulement du fluide est établi.
- 2- L'écoulement est unidirectionnel.
- 3- Le gradient de température à travers le couvert est négligeable.
- 4- Les caractéristiques des matériaux sont constantes dans les plages de température d'utilisation et indépendantes des conditions météorologiques.
- 5- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les grandes longueurs d'onde.
- 6- La température du ciel est supposé uniforme.
- 7- La température près du capteur est uniforme.
- 8- La température de la plaque absorbante est uniforme.
- 9- Le gradient de température à travers le bac du capteur est négligeable.
- 10- L'effet d'ombre est négligé.
- 11- Le couvert est net de toutes saletés.
- 12- La construction du capteur est uniforme et homogène.
- 13- Le capteur est exempt de tous défauts de fabrication.
- 14- Le gradient de température à travers le tube est négligeable (cas de circulation forcée).

### II-7-2. Bilan thermique :

Soit  $\dot{Q}_a$  l'énergie solaire absorbée par un capteur. Une partie de cette énergie est transférée vers le fluide caloporteur, c'est l'énergie utile  $\dot{Q}_u$ . Cette énergie peut être directement utilisée.

Un capteur solaire est face à des pertes thermiques soit par convection, ou par rayonnement.

Une partie de l'énergie absorbée est perdue vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes sont notées  $\dot{Q}_p$ .

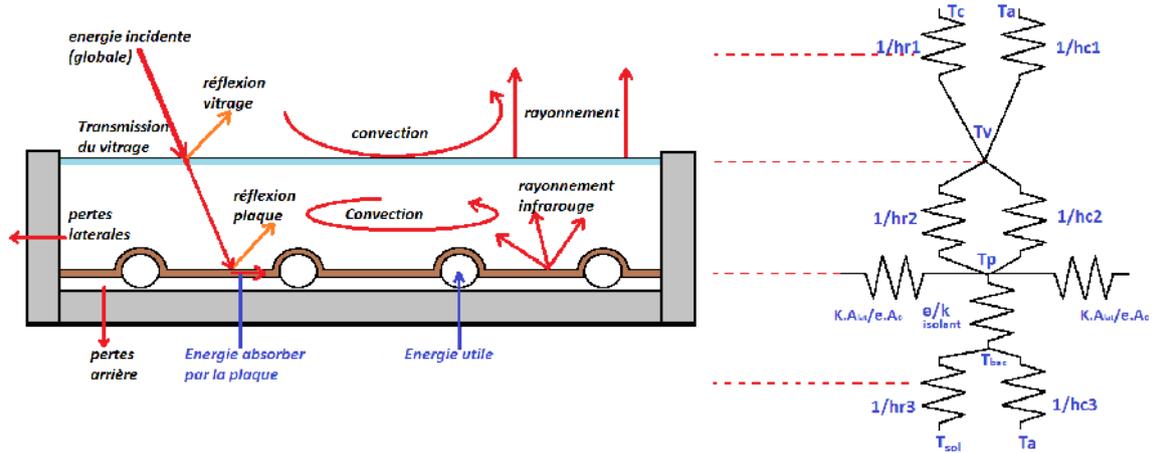
On note  $\Delta U$  la variation de l'énergie interne du système.

$$\dot{Q}_a = \dot{Q}_u + \dot{Q}_p + \Delta U$$

Avec :  $\dot{Q}_u = \dot{Q}_a - (\dot{Q}_p + \Delta U)$

Régime est supposé stationnaire :  $\Delta U = 0$  donc  $\dot{Q}_u = \dot{Q}_a - \dot{Q}_p$  (2-31)

**I-7-3. Les pertes thermiques dans un capteur solaire :**



**Figure (2-5) : Bilan thermique d'un capteur plan**

La resistance de la vitre est negligée.

Avec :

$T_c$  : température du ciel, est donnée par  $T_c = 0.0552 T_a^{1.5}$  [°K] [3] [5] (2-32)

Et

$$6^\circ < T_a - T_c < 12^\circ$$

$T_{sol}$  : température du sol.

$T_a$  : température ambiante.

**II-7-3-a. Pertes thermique vers l'avant du capteur:**

**Au niveau de la vitre :**

Convection (vitre-ambiante) :  $Q_{c1} = \frac{(T_v - T_a)}{\left(\frac{1}{h_{c1}}\right)}$  (2-33)

$T_v$  : Température de la vitre.

$Q_{c1}$  : Pertes thermiques par convection (due au vent).

$h_{c1}$  : Coefficient d'échange convectif entre la vitre et l'ambiance.

$h_{c1} = h_w = 2.8 + 3V$  Avec  $V$  : vitesse du vent.

Rayonnement (vitre-ciel) :  $Q_{r1} = h_{r1}(T_v - T_a)$  (2-34)

$Q_{r1}$  : Pertes thermiques par rayonnement.

$h_{r1}$  : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel.

## Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

$$h_{r1} = \frac{\varepsilon \cdot \sigma (T_v^4 - T_c^4)}{(T_v - T_a)} \quad (2-35)$$

$\varepsilon$  : Émissivité du vitrage.

$\sigma$  : Constante de Stephan Boltzmann ( $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} [W/m^2K^4]$ ).

**Au niveau de la lame d'air :**

$$\text{Rayonnement (plaque-vitre)} : Q_{r2} = h_{r2}(T_p - T_v) \quad (2-36)$$

$Q_{r2}$  : Pertes thermique par rayonnement.

$T_p$  : Température de la plaque absorbante.

$h_{r2}$  : Coefficient d'échange par rayonnement entre la plaque absorbante et la vitre.

$$h_{r2} = \frac{\sigma(T_p^2 - T_v^2)(T_p - T_v)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + \frac{1}{F_{p-v}} + \frac{1 - \varepsilon_p}{\varepsilon_p}} \quad (2-37)$$

Expérimentalement : plan // infini  $F_{p-v} = 1$

$$\text{Convection (plaque-vitre)} : Q_{c2} = \frac{(T_p - T_v)}{\left(\frac{1}{h_{c2}}\right)} \quad (2-38)$$

$Q_{c2}$  : Pertes thermique par convection.

$h_{c2}$  : Coefficient d'échange convectif entre la plaque absorbante et la vitre.

Le coefficient de pertes vers l'avant du capteur s'écrit :

$$U_{av} = \left[ \frac{1}{(h_{r1} + h_{c1})} + \frac{1}{(h_{r2} + h_{c2})} \right]^{-1} \quad (2-39)$$

Le coefficient  $U_{av}$  est estimé par KLEIN 1979 par la relation suivante :

$$U_{av} = \left[ \frac{N}{\frac{c}{T_p} \left( \frac{T_p - T_a}{N + f} \right)^e + \frac{1}{h_w}} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591 N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 \varepsilon_p - N}{\varepsilon_v}} \quad (2-40)$$

**Avec :**  $c = 520(1 - 0.000051 \beta^2)$  pour  $0^\circ < \beta < 70^\circ$

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \cdot \varepsilon_p)(1 + 0.07866 N)$$

$$e = 0.43 \left( 1 - \frac{100}{T_p} \right)$$

$\varepsilon_v$  : Émittance de la vitre (0.88) [12]

$\varepsilon_p$  : Émittance de la plaque absorbante.

## Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

N : nombre de vitres

Conditions :

$$\left\{ \begin{array}{l} h_w = 5.7 + 3.8 V \quad (\text{Mc Adams et Woertz}) \\ 0.95 < \varepsilon_p < 1 \\ 0 < \beta \leq 70^\circ \end{array} \right.$$

### II-7-3-b. Pertes thermique vers l'arrière du capteur :

Les pertes par convection et rayonnement à l'arrière du capteur sont négligeable devant les pertes par conduction, on aura donc :

$$U_{arr} = \frac{K_{is}}{e_{is}} \quad (2-41)$$

Avec :

$K_{is}$  : Conductivité de l'isolant [W/m.K].

$e_{is}$  : Épaisseur de l'isolant [m]

### II-7-3-c. Pertes thermiques latérales du capteur :

Comme précédemment on considère que les pertes per conduction, donc les pertes latérales s'écrivent :

$$U_{lat} = \frac{K_{is} * A_{lat}}{e_{is} * A_c} \quad (2-42)$$

Avec :

$A_{lat}$  : Surface latérale du capteur [m<sup>2</sup>]

$A_{lat} = \text{Hauteur de l'isolant} * \text{perimetre du capteur}$

$A_c$  : Surface globale du capteur [m<sup>2</sup>]

Les pertes thermiques globales du capteur seront la somme des pertes thermiques avant, latérales et arrière du capteur.

$$U_g = U_{av} + U_{arr} + U_{lat}$$

## II-8. Bilan thermique sur l'absorbeur :

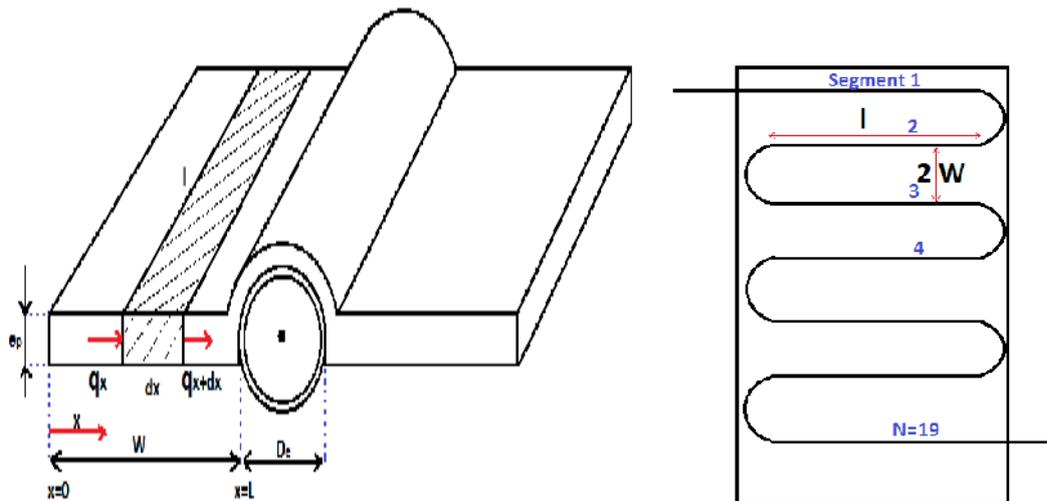


Figure (2-6) : coupe sur l'absorbeur Figure (2-7) : schéma de l'absorbeur avec le serpentin

Avec :

$l$  : largeur de l'ailette.

$W$  : longueur de l'ailette.

$e_p$  : épaisseur de l'ailette.

$D_e$  : diamètre extérieur du tube.

Le bilan thermique sur un élément de surface d'absorbeur donne :

- On néglige le transfert de chaleur à travers l'épaisseur de la plaque absorbante.
- La plaque absorbante est supposé isotherme.
- Flux de chaleur unidimensionnelle.

Après simplification, on obtient :

$$l \cdot dx \cdot G + e \cdot l \cdot q_x = e \cdot l \cdot q_{x+dx} + l \cdot dx \cdot h(T - T_\infty) \quad (2-43)$$

### II-8-1. L'efficacité de l'ailette :

Rendement de l'ailette, est en fonction de la longueur de l'ailette, ça conductivité et son épaisseur : [5]

$$F = \frac{\tanh(bw)}{bw} \quad (2-44)$$

$$\text{Avec : } b = \sqrt{\frac{U_g}{K_p \cdot e_p}}$$

$K_p$  : Conductivité thermique de la plaque absorbante.

### II-8-2. Efficacité de l'absorbeur :

Le rapport entre la résistance thermique entre la plaque absorbante et l'ambiance et la résistance thermique entre le fluide caloporteur et l'extérieur représente l'efficacité de l'absorbeur (rendement de l'absorbeur), est donnée par :

$$F' = \frac{\frac{1}{U_g}}{w \left[ \frac{1}{U_g(D_e+2wF)} + \frac{1}{Ch} + \frac{e}{\pi D_i K_t} + \frac{1}{\pi D_i h_f} \right]} \quad (2-45)$$

#### Remarque :

Le transfert de chaleur par conduction sur le tube est négligé en cas de circulation forcée.

Avec :

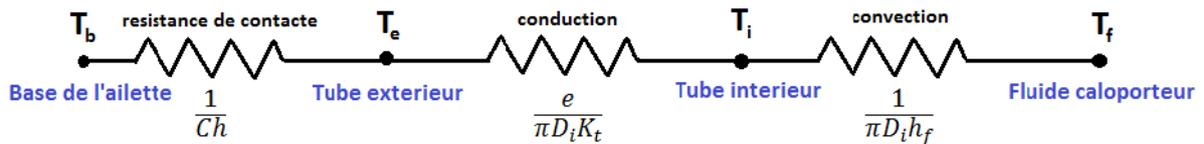
Ch : conductance de la soudure entre la plaque absorbante et le tube [W/mK].

$D_i$  : diamètre intérieur du tube [m].

$K_t$  : conductivité thermique du tube [W/m.K].

$h_f$  : coefficient d'échange thermique par convection entre la paroi intérieur du tube avec le fluide caloporteur [W/m<sup>2</sup>K].

*Schéma électrique des résistances :*



### II-8-3. Le facteur de conductance :

On définit la puissance thermique utile récupérée par le fluide :

$$Q_u = A_c F_r [G - U_g(T_e - T_a)] = A_c F_r [(\tau\alpha)_{eff} I_g - U_g(T_e - T_a)] \quad (2-46)$$

On définit le facteur de conductance  $F_r$  comme étant le rapport de la puissance réelle récupérée et la puissance que l'on aurait obtenue si la température du fluide était égale à la température d'entrée.

$$F_r = \frac{\dot{m} C_p}{A U_g} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{-A F' U_g}{\dot{m} C_p}\right) \right] \quad (2-47)$$

Pour un collecteur de type serpentin, le facteur  $F_r$  est évalué par Zhang & Lavan (1985) en fonction de trois paramètres dimensionnels ( $F_1, F_2$  et  $F_3$ ), est donnée par :

$$\frac{F_r}{F_1} = F_3 \left\{ \frac{2F_5 F_3}{F_6 \exp[-F_3(1-F_2^2)^{0.5}] + F_5} - F_5 \right\} \quad (2-48)$$

## Chapitre 2 : Les capteurs solaires thermiques

Les paramètres  $F_1, F_2, F_3$ , sont définis en fonction des paramètres géométriques ( $w, e_p, D_i, D_e, N$ ), et des paramètres thermiques ( $K_p, U_g, C_p, h_f$ ) et le débit du fluide du capteur.

$$F_1 = \frac{\kappa}{U_g w} \frac{\kappa R(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}{[\kappa R(1+\gamma) - 1]^2 - (\kappa R)^2}$$

$$F_2 = \frac{1}{\kappa R(1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}$$

$$F_3 = \frac{\dot{m} C_p}{F_1 U_g A_c}$$

$$F_4 = \left( \frac{1 - F_2^2}{F_2^2} \right)^{0.5}$$

$$F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1$$

$$F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4$$

$$\text{Avec } \kappa = \frac{(k.e_p U_g)^{0.5}}{\sinh\left[2w \left(\frac{U_g}{k.e_p}\right)^{0.5}\right]}$$

$$\gamma = -2 \cosh\left[2w \left(\frac{U_g}{k.e_p}\right)^{0.5}\right] - \frac{D.U_g}{\kappa}$$

$$R = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_f}$$

### II-9. Le rendement d'un capteur solaire plan :

C'est le rapport entre la puissance absorbée par le capteur solaire avec celle incidente, on note la puissance absorbée :

$$Q_u = A_c \left[ F_r (\tau \alpha)_{eff} I_g - F_r U_g (T_e - T_a) \right] = A_c I_g \left[ F_r (\tau \alpha)_{eff} - F_r U_g \frac{T_e - T_a}{I_g} \right] \quad (2-49)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{Q_i} = \frac{A_c I_g \left[ F_r (\tau \alpha)_{eff} - F_r U_g \frac{T_e - T_a}{I_g} \right]}{A_c I_g} \quad (2-50)$$

$$\eta = F_r (\tau \alpha)_{eff} - F_r U_g \frac{T_e - T_a}{I_g} = \eta_0 - F_r U_g \frac{T_e - T_a}{I_g} \quad (\text{Standard ASHRAE}) \quad (2-51)$$

$\eta$  :  $F_r (\tau \alpha)_{eff}$  : rendement optique du capteur.

$$\eta = \eta_0 - (F_r U_g)_1 \cdot X - (F_r U_g)_2 \cdot X^2 \quad (\text{standard Europeene}) \quad (2-52)$$

$$\text{Avec : } X = \frac{(T_{mf} - T_a)}{I_g}$$

**II-10. Conclusion :**

Les performances d'un capteur solaire plan peut etres influencer par differents parametres.

On peut evaluer la quantite de chaleur utile connaissant les trois parametres suivant :

Le facteur de conductance  $F_r$ , les coefficients de pertes thermique avant, arrier et laterale (globale  $U_g$ ) et le produit effectf  $(\tau\alpha)_{eff}$ .

# CHAPITRE 3

## NORME EUROPÉENNE EN 12975-2

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

Différentes normes et standards ont été mises en place pour le test des capteurs solaires à circulation du liquide, tel que les normes :

- ISO 9806.
- ASHRAE 93-2003.
- EUROPEENNE EN 12975-2 :2006.
- AUSTRALIENNE 2535-198.

Toutes ces normes sont utilisées pour déterminer les performances des capteurs solaires à circulation du liquide, et d'établir des méthodes d'essai et des méthodes de calcul pour la détermination des performances thermiques de ce type de capteur solaire.

Elles définissent aussi les méthodes de réalisation des essais en milieu extérieur dans des conditions de vent et d'éclairement solaire naturelle aussi que dans des milieux intérieurs ou artificiels ou les mêmes conditions sont appliquées (aussi le calcul des différents paramètres).

Pour le test de notre capteur on va se baser sur la norme Européenne En 12975-2 :2006.

### **III-2. La norme européenne EN 12975-2 :2006 : [6]**

La norme Européenne En 12975-2 a été adoptée par la communauté Européenne de normalisation en 2006, elle a été élaborée par le Comité Technique CEN/TC 312 «Installations solaires thermiques et leurs composants», elle remplace l'ancienne norme EN 12975-2 :2001.

La présente norme spécifie les méthodes d'essai permettant de déterminer la capacité d'un capteur solaire à circulation de liquide à résister à l'influence d'agents dégradants. Elle définit des modes opératoires d'essai des capteurs dans des conditions bien définies et répétables.

### **III-3. Conditions d'essai :**

#### **1- Instruments de mesure :**

Les instruments de mesure utilisés lors des tests doivent répondre à des spécifications précises (précision, stabilité et incertitude)

Les instruments de mesure utilisés pour le test des capteurs solaires sont :

- **Les thermocouples :**

Les thermocouples sont utilisés pour la mesure de la température d'entrée et de sortie du capteur.

Il existe plusieurs types de thermocouples et ceci suivant leurs gamme de température, les plus utilisées sont le type K et J.

Ces thermocouples doivent avoir une bonne incertitude selon la norme utilisée.

- **La thermopile :**

C'est une somme de thermocouples en série reliant l'entrée et la sortie du capteur de telle façon d'avoir la valeur de l'écart de température entre l'entrée et la sortie

- **Le pyranomètre :**

C'est un appareil utiliser pour mesurée l'éclairement solaire globale, il peut être utilisée pour la mesure de l'éclairement diffus en ajoutant une bonde qui empêche les rayons solaires direct de traversées.

- **Le débit mètre :**

Il sert à mesurer le débit du fluide circulant dans le circuit du capteur, le débit doit être respecté suivant la norme utilisé.

- **L'anémomètre :**

Il est utilisé pour la mesure de la vitesse du vent.

Tous appareils utiliser dans les mesures doit avoir une incertitude et une précision selon la norme utiliser.

Lors du test des capteurs solaires par la norme Européenne, les instruments de mesures utiliser doivent rependre à certaines spécifications classées sur le tableau si dessous : [11]

<b>Instrument de mesure</b>	<b>Spécification suivant la norme Européenne EN 12975-2 : 2006</b>
<i>Pyranomètre</i>	<i>Classe 1 ou 2</i>
<i>Thermocouples</i>	$\pm 0.1 K$
<i>Débitmètre</i>	$\pm 1 \%$
<i>Thermopile</i>	$\pm 0.1 K$
<i>Anémomètre</i>	$\pm 0.5 m/s$
<i>Débit mètre</i>	$\pm 1 \%$

**Tableau (3-1) : les caractéristiques des instruments de mesure suivant la norme EN 12975-**

### III-4. Déroulement des tests :

Pour que les tests soit considérée comme valables, un régime permanent ou quasi permanent doit être établi en respectant certains conditions.

#### III-4-1. Conditions de teste :

- Avant d'entamer les teste le capteur solaire doit être exposé pendant 3 jours au rayonnement solaire journalier supérieur à  $4722 \text{ Wh/m}^2$  [11], et doit être incliner a la latitude du lieu.
- Le fluide doit circuler au moins 15 min à l'intérieur du capteur à la température d'épreuve pour assurer les conditions du régime quasi-permanent.
- Le débit du fluide doit être de l'ordre de  $0.02 \text{ Kg/s.m}^2$ .

Suivant la norme Européenne, les conditions de teste sont :

- La période de l'essai s'étend du midi, ou  $\theta = \pm 40^\circ$ , la durée du teste est de 30 min.
- Pendant les tests les variables tel que ( $\theta$ ,  $T_s$ ,  $T_e$ ,  $T_a$ ,  $I_g$ ,  $V_{\text{vent}}$ ,  $\dot{m}$ ) doit fluctuerai dans la gamme spécifier dans le tableau (3-2) :

Paramètres	Norme Européenne En 12975-2 : 2006
$\theta$ ( $^\circ$ )	- $40^\circ$ à $+40^\circ$
$(T_s - T_e)$ ( $^\circ\text{C}$ )	1.5 à 15 $^\circ\text{C}$
$T_a$ ( $^\circ\text{C}$ )	5 $^\circ$ à 30 $^\circ$
$I_g$ ( $\text{W/m}^2$ )	$> 750 \text{ W/m}^2$
$\dot{m}$ ( $\text{kg/s.m}^2$ )	$0.02 \pm 10 \%$
$V_{\text{vent}}$ ( $\text{m/s}$ )	1.5 à 5.5
$t$ ( $\text{min}$ )	3 min

**Tableau (3-2) : Tableau des limites des paramètres que doit respecter suivant la norme EN 12975-2**

Durant tout la période des essais du capteur, et pour bien atteindre le régime stationnaire ou quasi-stationnaire dont la variation maximale de certains paramètres doit être dans la gamme spécifié par la norme Européenne.

Le tableau suivant précise la gamme de variation acceptable par la norme En 12975-2 : [11]

Grandeurs	En 12975-2 : 2006
$\Delta T_e$	$\pm 0.1 \text{ K}$
$\Delta(T_a - T_e)$	$\pm 0.05 \text{ K}$
$\Delta T_a$	$\pm 1.5 \%$
$\Delta I_g$	$\pm 50 \text{ W/m}^2$
$\Delta \dot{m} / \dot{m}$	$\pm 1 \%$

**Tableau (3-3) : La gamme de variation des différents paramètres suivant la norme EN 12975-2**

### III-5. Nombre de points de mesure :

Pour le standard européen les mesures sont en fonction de la température moyenne du fluide caloporteur tel que :

$$T_i = T_a$$

$$T_i = T_a + 20^\circ$$

$$T_i = T_a + 40^\circ$$

$$T_i = T_a + 60^\circ$$

Chaque points est relevé quatre fois, deux avant midi et deux après-midi, soit en totale de seize points.

### III-6. La constante du temps :

La constante de temps représente le temps nécessaire pour que le capteur réagisse aux changements des conditions climatiques.

Les tests portant sur la détermination de la constante du temps peuvent être exécuté selon le standard utilisé, soit en phase d'échauffement (standard EUROPEEN) soit en phase de refroidissement (standard ASHRAE)

Le teste de la constante du temps est très important pendant les journées ou les conditions d'éclairément et température ambiante sont variables.

La constante du temps dépend en général de la construction du collecteur, des matériaux utilisés, de la jonction circuit hydraulique-plaque absorbante et du débit du fluide, et de la température ambiante.

Pour le standard Européen, l'éclairément solaire doit être supérieur à  $750 \text{ W/m}^2$  lors du test.

Le fluide caloporteur circule dans le circuit jusqu'à stabiliser la température moyenne du fluide caloporteur à  $T_{mf} = T_a \pm 1^\circ\text{C}$ .

Le capteur étant couvert par une surface réfléchissante (ou tournée plein nord). Une fois cette température stabilisé, le capteur est brusquement découvert (ou tournée rapidement vers le sud) et les températures  $T_s, T_a, (T_s - T_a)$  et  $I_g$  et le temps  $t$  sont enregistrés.

La constante du temps correspond au temps nécessaire pour que l'écart de température  $(T_s - T_a)$  Atteigne 63 % de l'échauffement maximal.

### III-7. Le rendement instantané :

Suivant le standard Européen (norme EN 12975-2), la relation exprimant le rendement instantané du capteur est une parabole qui est rapporté à la surface d'ouverture du capteur, elle est fonction de la température moyenne arithmétique du fluide :

$$T_m^* = \frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \quad \text{Avec} \quad T_{mf} = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (3-53)$$

L'expression du rendement est un polynôme du deuxième degré et s'écrit sous la forme :

$$\eta = \eta_0 - a_1 \cdot T_m^* - a_2 \cdot T_m^{*2} \quad (3-54)$$

$\eta_0$  : Rendement optique du capteur

$a_1$  : Coefficient de pertes thermique au premier ordre (W/m<sup>2</sup>K)

$a_2$  : Coefficient de pertes thermique au deuxième ordre (W/m<sup>2</sup>K<sup>2</sup>)

### Conclusion :

Dans ce chapitre on a montré les différentes conditions à respecter durant le test des capteurs solaires plan à circulation du liquide.

L'expérimentation du capteur a été faite en respectant les conditions de la norme Européenne choisie EN 12975-2, les tests du rendement instantané ainsi que la variation des températures dans l'ensemble ont été déduites.

# CHAPITRE 4

## ETUDE EXPÉRIMENTALE

#### **IV-1. Introduction :**

La réalisation de notre capteur nous a pris deux mois de travail, ce chapitre consiste à tester notre capteur en utilisant les différents instruments de mesure, pour caractériser notre capteur on a mesuré les paramètres suivantes :

Les températures (entrée sortie,...), le débit massique, l'éclairement globale incliné,

#### **IV-2. Description du capteur solaire plan :**

Le capteur a été réalisé au niveau du département de mécanique à l'université Saad Dahleb de Blida.

*Caractéristiques du site de Blida :*

Latitude :  $36.4^\circ$

Longitude :  $2.8^\circ$

Altitude : 272 m

Le capteur réalisé pour l'expérimentation est un capteur solaire thermique à circulation de liquide dans une tuyauterie en cuivre en forme de serpentin. Le liquide utilisé pour notre expérience est une eau naturelle puisée du robinet.

Le capteur est doté d'un support mobile qui lui permet de s'incliner dans un angle variable de  $0^\circ$  à  $45^\circ$ .

Durant toute la période du teste, le capteur était incliné à la latitude de Blida ( $36.4^\circ$ ) et orienté vers le sud pour un meilleur rendement.



*Figure (4-1) : représentation du capteur réaliser*

**IV-3. Réalisation en photos du capteur solaire :**

*Voir Annexe D.*

**IV-4. Caractéristiques du capteur :**

Les caractéristiques du capteur sont données dans le tableau suivant :

<b>Eléments</b>	<b>Dimension</b>	<b>Caractéristiques</b>	<b>Matériaux</b>
<b>Bac</b>	Longueur : 2 m Largeur : 1 m Epaisseur : 1.5 mm	/	<b>Acier ordinaire</b>
<b>Parois latéraux</b>	Longueur : 6 m Hauteur : 106 mm Epaisseur : 42 mm	/	<b>Aluminium</b>
<b>Couverture transparente</b>	Longueur : 1.97 m Largeur : 0.97 m Epaisseur : 4 mm	Transmittivité : 0.84 Indice du milieu (n) : 1.518 Coefficient d'extinction (k) : 30	<b>Verre ordinaire</b>
<b>Absorbeur</b>	Longueur : 1.90 m Largeur : 0.75 m Epaisseur : 0.8 mm	Emissivité : 0.95 Absorptivité : 0.94 Conductivité : 48 W/m.K  Nombre d'empreintes : 19 Revêtement : <i>peinture antirouille noir mat</i>	<b>Acier galvanisé</b>

<b>Circuit hydraulique</b>	Longueur : 19 mètres Diamètre : 16 mm	Nombre de segments : N = 19 Capacité en liquide : 2.9 litres	<b>Cuivre</b>
<b>Isolant</b>	Epaisseur arrière : 4 cm latérale : 4 cm	Conductivité : 0.03 W/m.K	<b>Mousse polyuréthane</b>
<b>Fluide caloporteur</b>	/	$20^{\circ} < T_{\text{eau}} < 70^{\circ}$ $C_p = 4.183 \text{ KJ/Kg.K}$	<b>Eau naturelle</b>

*Tableau (4-4) caractéristiques techniques des éléments du capteur solaire.*

<b>Caractéristiques</b>	<b>Données</b>
<i>Longueur</i>	<i>1.995 m</i>
<i>Largeur</i>	<i>0.997 m</i>
<i>Hauteur</i>	<i>106 mm</i>
<i>Poids</i>	/
<i>Surface brute</i>	<i>1.989 m<sup>2</sup></i>
<i>Surface d'ouverture</i>	<i>1.744 m<sup>2</sup></i>
<i>Capacité au liquide</i>	<i>2.9 L</i>

*Tableau (4-5) caractéristiques techniques du capteur solaire.*

#### **IV-5. Instruments utilisés :**

##### **IV-5-1. Le circulateur :**

Dans nos testes la circulation du fluide a l'intérieur du capteur doit être forcée à cause des pertes de charges due au coude du circuit, pour cela on a utilisé un circulateur de débit maximale de 20 L/min (figure (4-2)).



*Figure (4-2) : Le circulateur électrique*



*Figure (4-3) : vanne de réglage du débit*

Pour obtenir le débit désiré on a placé une vanne de réglage à l'entrée du capteur pour le contrôle du débit à l'intérieur du capteur (figure (4-3)).

#### **IV-5-2. La résistance de chauffage :**

Pour varier la température d'entrée du fluide on a utilisé une petite résistance électrique (figure (4-4)).



*Figure (4-4) : résistance de préchauffage*

#### **IV-5-3. Clapet anti-retour :**

On a utilisé un clapet anti-retour à la sortie du capteur (figure (4-5)) pour empêcher l'air de se retourner dans le capteur surtout en arrêtant le circulateur.



*Figure (4-5) : clapet anti-retour*

**IV-6. Les instruments de mesure utilisés lors du test du capteur :**

Pour déterminer les performances instantanées des chauffe-eau solaire, un certains nombre de paramètres doivent être mesurés. Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont décrits dans le tableau :

<b>Paramètre</b>	<b>Instruments</b>	<b>Caractéristiques</b>
<i>Température</i>	<i>thermocouple</i>	<i>Type K</i>
<i>Eclairement (incliné à 36,4°)</i>	<i>Solarimètre</i>	<i>Kipp et Zonen</i>
<i>Débit massique du fluide</i>	<i>Méthode directe</i>	<i>/</i>

*Tableau (4-6) caractéristiques des différents instruments de mesures*

**IV-6-1. Mesure des températures :**

Pour la mesure de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur ainsi la température de la plaque absorbante, huit (8) thermocouples de type K (Cromel-Alumel) (figure (4-7)) sont utilisées dont leurs disposition sur le capteur est montrée dans la figure (4-6).

- Deux thermocouples à l'entrée et sortie du capteur.
- Deux thermocouples implantés sur la plaque absorbante.
- Deux thermocouples à la cuve de stockage.
- Un thermocouple pour la température ambiante (mis à l'ombre).
- Un thermocouple pour la température de puisage.

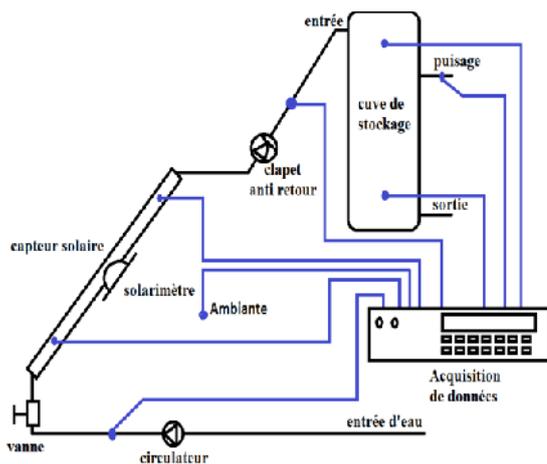


Figure (4-6) : thermocouple type K

Figure (4-7) : schéma des dispositions des thermocouples dans le circuit

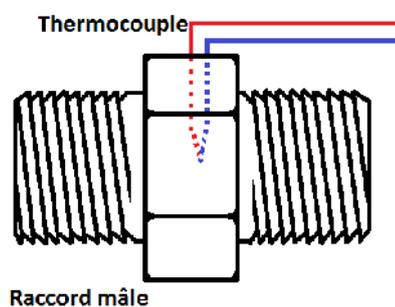


Figure (4-8) : emplacement des thermocouples d'entrée et sortie du capteur

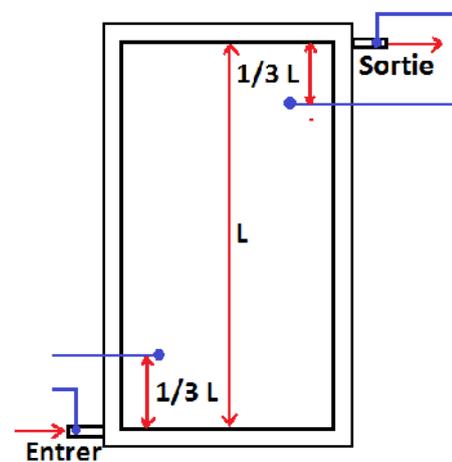


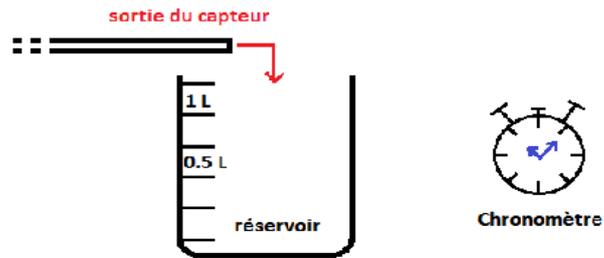
Figure (4-9) : disposition des thermocouples dans le capteur

#### IV-6-2. Mesure du débit :

Pour mesurer le débit du fluide à la sortie du capteur on a suivi une méthode artisanale à l'aide d'un chronomètre.

La méthode est basée sur le calcul du temps nécessaire pour remplir un réservoir de 1 L (figure (4-10)).

- On suppose que 1 L d'eau est équivalent à 1 Kg, le débit de sortie est calculer en Kg/s.



*Figure (4-10) : mesure du débit massique*

#### **IV-6-3. Mesure de l'éclairement solaire :**

Pour la mesure de l'éclairement solaire globale sur le plan inclinée on a utilisé un Solarimètre de type Kipp et Zonen comme le montre la figure (4-11).

Le Solarimètre est fixé sur une base coller parallèlement sur le capteur, cette base permet l'inclinaison du Solarimètre avec le capteur.

Le Solarimètre a une sensibilité égale a  $5.32 * 10^{-6}$  V/W.m.



*Figure (4-11) : positionnement du Solarimètre.*

#### **IV-6-4. Acquisition des données :**

Pour l'enregistrement des données tels que les températures et l'éclairement, on a utilisé un enregistreur de type HYDRA SERIES II de 20 entrée (figure (4-12)).

L'enregistreur a été utilisé pour la lecture des températures d'entrée et de sortie du capteur, ainsi pour les températures de la plaque absorbante et la cuve de stockage et la température ambiante et l'éclairement solaire (figure (4-7))



*Figure (4-12) : appareil d'acquisition (enregistreur de données)*

#### **IV-7. Le support du capteur :**

Pour la facilité du déplacement du capteur et pour la variation de l'inclinaison de ce dernier, on a réalisé un support en acier qui permet le déplacement du capteur et l'inclinaison de ce dernier du 0° à 45°, aussi la bonne circulation de l'air à l'avant et à l'arrière du capteur (voir Annexe A)

Le support est fixé sur une inclinaison à la latitude du lieu de Blida et orienter plein sud pour le maximum d'énergie.

Le capteur étant positionné tel qu'aucune ombre ne tombe sur lui pendant toute la période des essais de ce dernier.

Le capteur n'est influencé par tous rayonnements ou perturbation thermique des alentours.

#### **IV-8. Déroulement des tests expérimentaux :**

##### **IV-8-1. Détermination expérimentale de la contenance en fluide :**

Pour déterminer la contenance en eau du capteur on calcule le volume intérieur de tout le circuit hydraulique.

La contenance en eau est calculée de l'entrée à la sortie du capteur.

Après calcul on trouve que la contenance en eau de notre capteur est de **2.9 L**.

#### **IV-8-2. Régulation expérimentale du débit massique :**

Le débit massique imposé par la norme est de  $0.02 \text{ Kg/s.m}^2$ , pour notre capteur la surface globale est de  $2 \text{ m}^2$ , le débit pour les tests est de :

$$\dot{m} = 2 \text{ m}^2 * 0.02 = 0.04 \text{ Kg/s}$$

#### **IV-8-3. Calcul des pertes de charge dans le capteur :**

Après calcul des pertes de charge linéaire et singulière on trouve

Pertes de charge =  $\sum \text{Pert es (linéaires et singulières)}$

$$\text{Pertes de charge} = 0.211 \text{ [bar]} = 2.11 \text{ mCE}$$

#### **IV-8-4. Variation expérimentale de la température d'entrée du fluide :**

La température d'entrée de l'eau est réglée par une résistance électrique, de telles façons de respecter le standard Européenne.

La température d'entrée soit en fonction de la température ambiante :

$$T_i = T_a$$

$$T_i = T_a + 20^\circ$$

$$T_i = T_a + 30^\circ$$

Pour le teste de la température  $T_i = T_a + 60^\circ$ , la résistance électrique que nous avons utilisé n'a pas pu atteindre cette températures.

#### **IV-8-5. Calcul expérimentale de la constante du temps :**

Le teste de la constante du temps a été exécuter suivant le standard Européenne en phase d'échauffement du capteur.

Pour réaliser le teste de la constante du temps, le capteur été tournée plein nord jusqu'à ce que l'éclairement solaire soit supérieur à  $750 \text{ W/m}^2$ .

L'eau doit circuler dans le capteur pour s'assurer que la température de l'eau à l'entrée est stable à  $\pm 1\text{C}^\circ$  de la température ambiante.

Le capteur est tourné brusquement vers le sud, la température à l'entrée et à la sortie du capteur, la température ambiante ainsi que l'éclairement solaire globale inclinée son relevées.

Un tableau de données est réaliser (Tableau (5-1)).

#### IV-8-6. Testes expérimentaux du rendement instantané :

Le calcul du rendement instantané et les tests concernant ce dernier ont été conforme au standard Européenne par la norme EN 12975-2.

Les tests des rendements instantané ont débuté le 17/07/2012.

La température d'entrée du fluide a été effectuée comme suite :

- $T_i = 30^\circ$
- $T_i = 50^\circ$
- $T_i = 65^\circ$

Pour chaque température d'entrée, quatre points doivent être relevé, deux avant midi et deux après-midi. Ce qui fait douze en total.

Le rendement instantané est calculé par rapport à la surface d'ouverture du capteur.

Suivant le standard ASHRAE, le facteur X sera exprimé par la relation suivante :

$$X = (T_i - T_a)/I_g \quad (4-55)$$

Suivant la norme Européenne EN 12975-2, X est exprimer en fonction de la température moyenne du fluide tel que :

$$X = U_0(T_m - T_a)/I_g \quad (4-56)$$

Avec :  $T_m = \frac{T_e + T_s}{2}$ , Température moyenne du fluide

Ou  $U_0$  Coefficient de transfert de référence pris a 10.

#### **IV-9. Conditions à respecter avant d'entamer les tests :**

Les étapes suivantes doivent être respectées avant de démarrer les tests du capteur :

1. S'assurer qu'il n'existe aucune détérioration ou fuite au niveau du capteur.
2. La couverture du capteur (vitre) doit être nettoyée.
3. Il faut s'assurer qu'il n'existe aucune forme de perturbation externe (sources de chaleur supplémentaire, effet d'ombre per des arbres ou obstacle...etc.)
4. Le capteur doit être orienté vers le sud pour capter le maximum d'énergie.
5. Le débit du fluide a l'intérieur du capteur doit être régler suivant la norme utilisée (dans notre cas  $\dot{m} = 0.02 \text{ Kg/s.m}^2$ ).
6. Le capteur doit être exposé aux conditions naturelles de ciel claire et température ambiante dans la gamme spécifié par la norme utilisé pour la détermination réelles des performance du capteur.
7. Pendant toute la période de l'essai du capteur, l'éclairement solaire doit être conforme à la norme utilisé.
8. Dans notre cas la norme EN 12975-2 nous oblige de faire un rodage du capteur pendant 3 jours aux conditions d'éclairement et température ambiante naturelle.

#### **Conclusion :**

Dans le présent chapitre on a montré les différentes caractéristiques du capteur réalisé ainsi les différentes dimensions des composants du capteur.

Nous avons aussi développé les étapes préalables aux essais tels que les instruments de mesures et l'acquisition des données mesurées ainsi que les appareilles utiliser lors des tests du capteur suivant la norme EN 12975-2.

Les tests du capteur sont réalisés en circuit ouvert et fermée.

# CHAPITRE 5

## RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

### **V-1. Introduction :**

Les résultats présentés dans ce chapitre sont relatif aux caractéristiques du capteur plan et celle du système (cuve-capteur).

Plusieurs mesures ont été effectuées sur le système réalisé sur le site de Blida. Parmi les tests nous avons choisis une journée type (17/07/2012).

Ces mesures ont été prise chaque pas de temps de 5 minutes, de 10:00 jusqu'à 14:00 de la journée.

Les tests sur le capteur suivent les conditions la norme EN 12975-2 :

- Eclairement solaire globale  $> 750$  [W/m<sup>2</sup>].
- Température ambiante  $< 30^{\circ}\text{C}$ .
- Vitesse du vent  $< 5.5$  m/s.

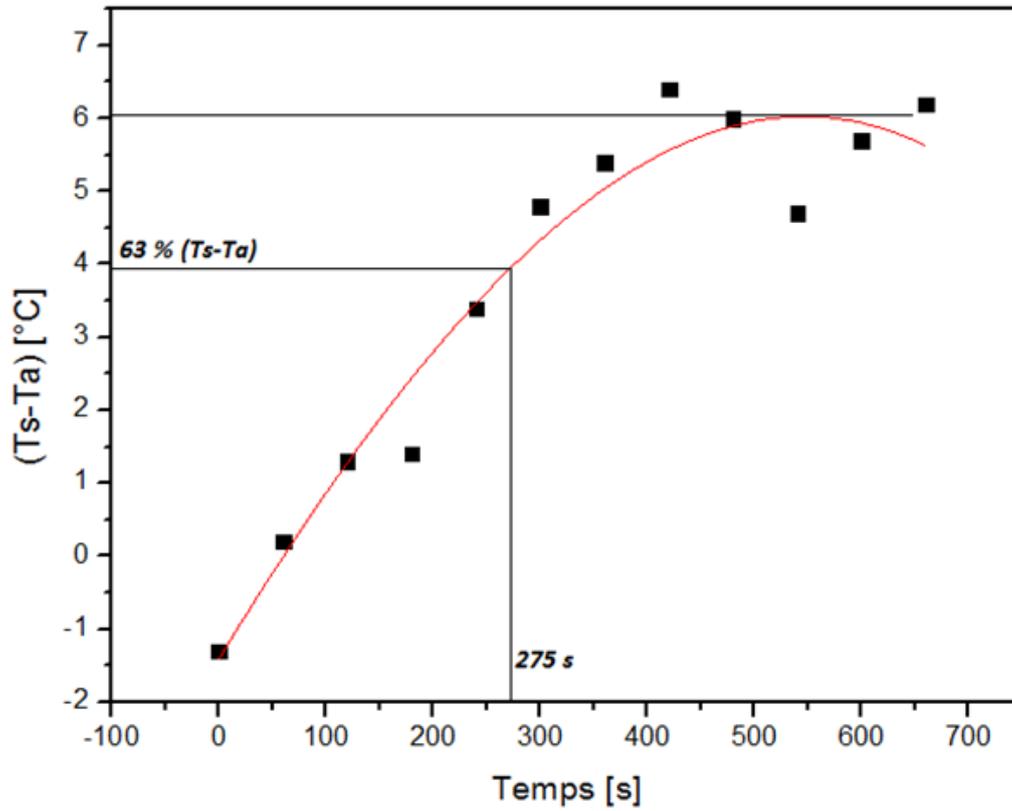
### **V-2. Résultats expérimentaux :**

#### **V-2-1. Calcule de la constante du temps :**

Pour le calcul de la constante du temps, le capteur a été orientée plein nord jusqu'à atteindre un éclairement solaire  $> 750$  W/m<sup>2</sup>, on oriente le capteur plein sud et on relève les températures d'entrée, sortie et ambiante en fonction du temps.

Le tableau (5-1) montre la variation des températures en fonction du temps.

La variation de la différence de température ( $T_s - T_a$ ) en fonction du temps est illustrée dans la figure (5-1) :



*Figure (5-1) : constante du temps*

La constante du temps représente le temps nécessaire pour que le capteur atteigne 63% de l'échauffement maximale du capteur.

La constante du temps est de 4 minutes et 58 seconds, ce qui explique le bon fonctionnement de notre capteur.

### V-3. Interprétation des résultats :

La figure (5-3) représente l'éclairement solaire global incident sur la surface inclinée du capteur pour la journée du 17/07/2012, la courbe à la forme d'une cloche dont le maximum  $\approx 960$  [W/m<sup>2</sup>] se situe autour du midi local.

La figure (5-4) représente l'évolution de la température d'entrée, sortie et ambiante en fonction du temps, on remarque que la température ambiante varie entre 25 et 32 °C.

On constate que les courbes de température d'entrée et ambiante ont la même allure à 2 °C près.

La température de sortie du fluide augmente jusqu'au midi local, ensuite elle se stabilise pour le reste de la journée. On remarque aussi que le gradient de température au début de la journée entre la température d'entrée et celle de sortie est faible, et devient plus important à partir du midi local ( $\Delta T \approx 10^\circ\text{C}$ ).

La figure (5-5) représente l'évolution de la température de la plaque absorbante en fonction du temps pour les deux positions (supérieur et inférieur, voir figure (4-9)).

La température de la plaque absorbante augmente en fonction du temps jusqu'à arriver au maximum (70 °C) autour du midi local, puis elle se stabilise.

Le gradient de température entre la position supérieur et inférieur de la plaque absorbante est de  $\approx 2^\circ\text{C}$ , on remarque que la température de la plaque absorbante est presque la même quel que soit le positionnement des thermocouples.

#### V-4. Circuit fermé :

Pour le teste du capteur en circuit fermé on a ajouté un petite cuve de stockage a une capacité de 40 litres, le circuit réaliser est montrer dans la figure :

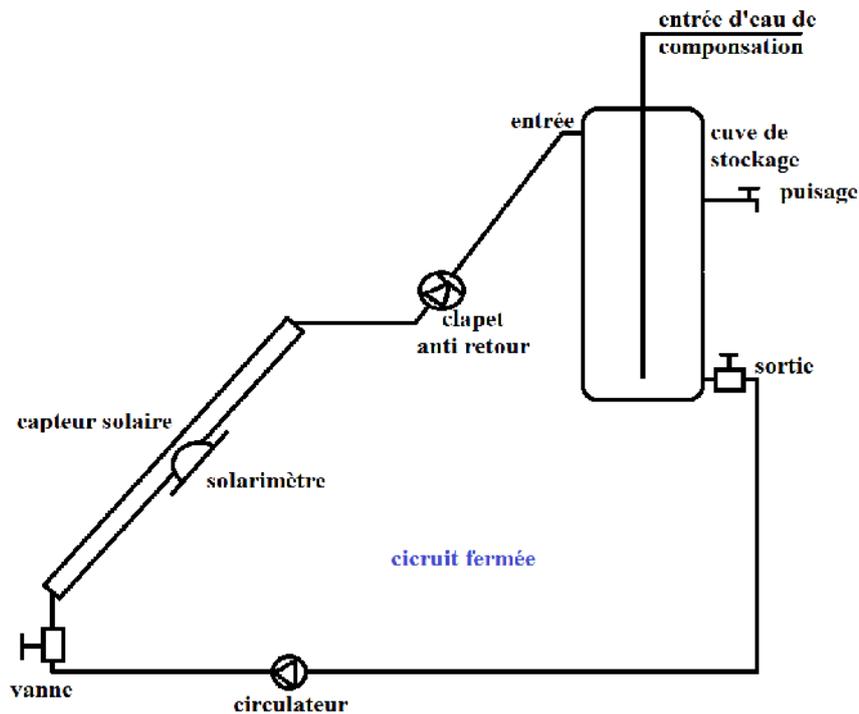


Figure (5-2) : circuit fermé de la journée du 19/07/2012

On a choisit la journée type (ciel claire) du 19/07/2012, le capteur est mis en marche a 09 :15 jusqu'à 16 :00 avec un pas de temps de 15 minutes

Conditions initiales :

- ✓ Le débit de circulation du fluide est fixé de 0.04 Kg/s.
- ✓ La température à l'intérieur de la cuve était environ de 25 °C.
- ✓ La température ambiante  $T_a = 24^\circ\text{C}$ .

#### **V-4-1. Interprétation des résultats :**

La figure (5-6) représente l'évolution de l'éclairement solaire globale sur la surface du capteur en fonction du temps. Elle est sous forme d'une cloche avec un maximum de  $\approx 870$  [W/m<sup>2</sup>].

La figure (5-7) représente la variation des températures d'entrée, sortie et ambiante en fonction du temps, on remarque que le gradient de température entre l'entrée et la sortie du capteur reste faible ( $\approx 4^\circ\text{C}$ ) tous le long du fonctionnement, ceci est due à la capacité de stockage choisis. On sait qu'un chauffe-eau solaire de 2m<sup>2</sup> de surface de capteur a une capacité de stockage de l'ordre de 110 litres.

On remarque à la fin de la journée une intersection entre la courbe de température d'entrée du capteur et celle de sortie, celui-ci est due à la diminution de l'éclairement. À ce moment il est préférable d'installer un système de régulation. [10]

La figure (5-8) montre la variation de la température de la plaque absorbante en fonction du temps, on remarque que les deux courbes ont la même allure et presque confondue. La courbe a la forme d'une cloche d'où il existe une différence de température de  $\approx 4^\circ\text{C}$  entre la position supérieure et inférieure de la plaque absorbant, cette différence apparait seulement au début de fonctionnement.

L'évolution de la température au niveau supérieur et inférieur de la cuve de stockage est représenté dans la figure (5-9). Les deux courbes ont la même allure, on remarque une présence du phénomène de stratification à l'intérieur de la cuve.

On peut décomposer la courbe de température de la cuve en deux phases :

- 1) Phase de charge : dans ce cas la température dans la cuve augmente et sa courbe présente une droite avec une pente très importante. Autrement dit en espace d'un période relativement court.  
Ceci explique la bonne performance de notre système.
- 2) Phase de stockage : dans cette phase le système étant à l'arrêt, on remarque une stabilité de température, ensuite une légère diminution à cause des pertes de la cuve de stockage.

**V-4-2. Détermination du rendement journalier du capteur :**

Pour la journée du 19/07/2012, le circuit de liquide été fermée et le rendement pour cette journée est décrit par : [3] [5]

$$\eta = \frac{\int \dot{m} \cdot C_p (T_s - T_e) dt}{\int A_c \cdot I_g dt} = \frac{\dot{m} \cdot C_p \int (T_s - T_e)}{A_c \int I_g dt}$$

Après calcul on trouve :  $\eta = 0.4116 = 41.16 \%$

V-5. Représentation des courbes de résultats :

Journée 17/07/2012 ( $T_e = T_a \pm 1^\circ\text{C}$ )

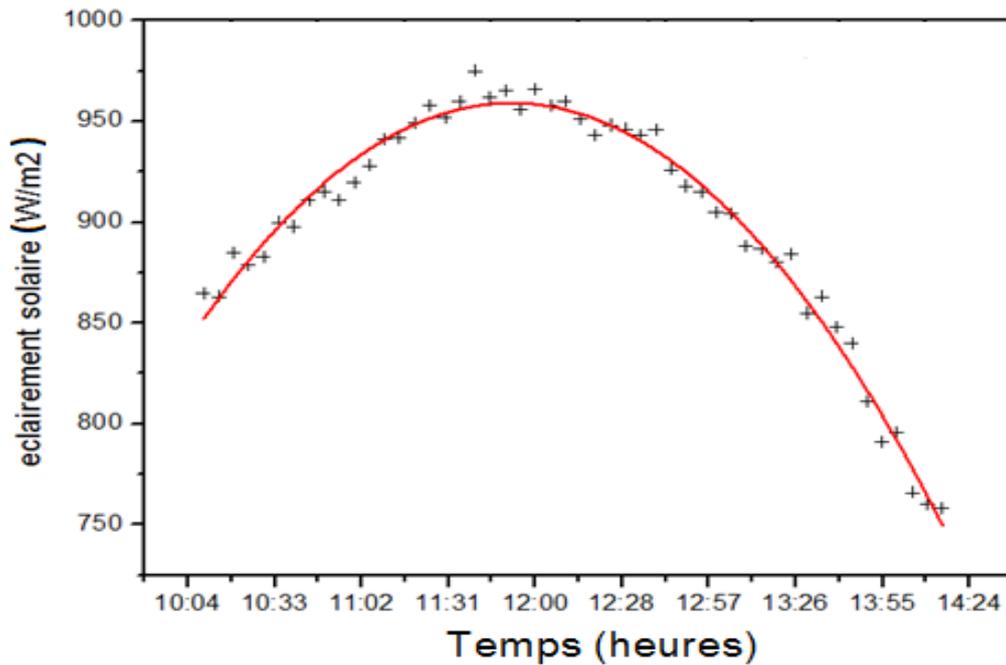


Figure (5-3) : variation de l'éclairement globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012

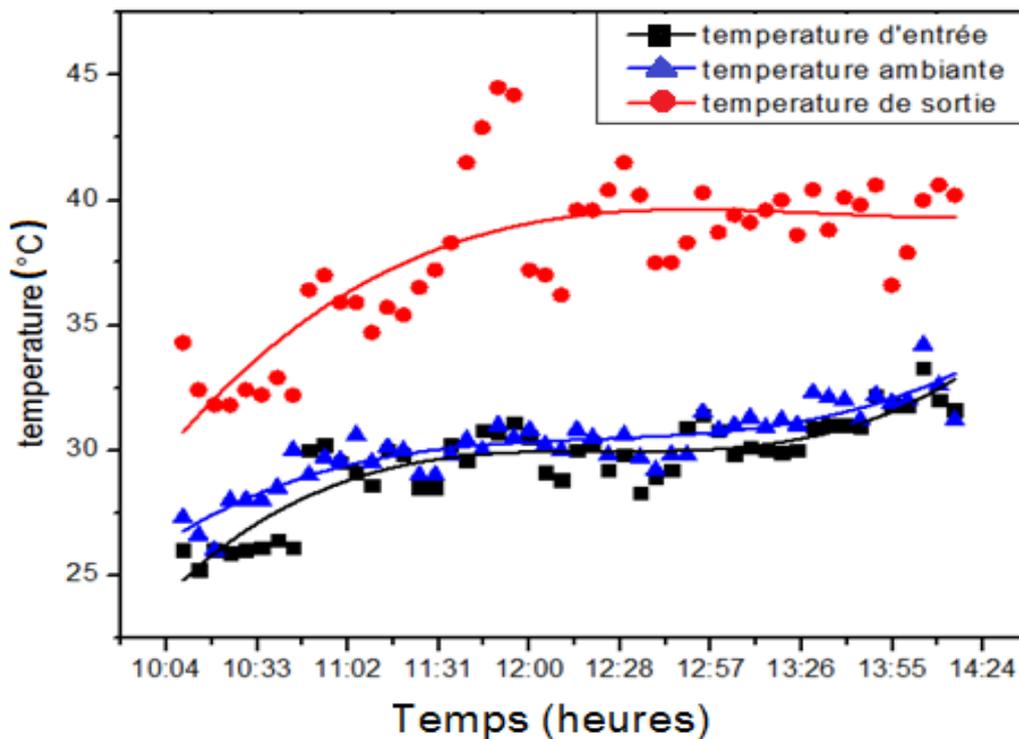
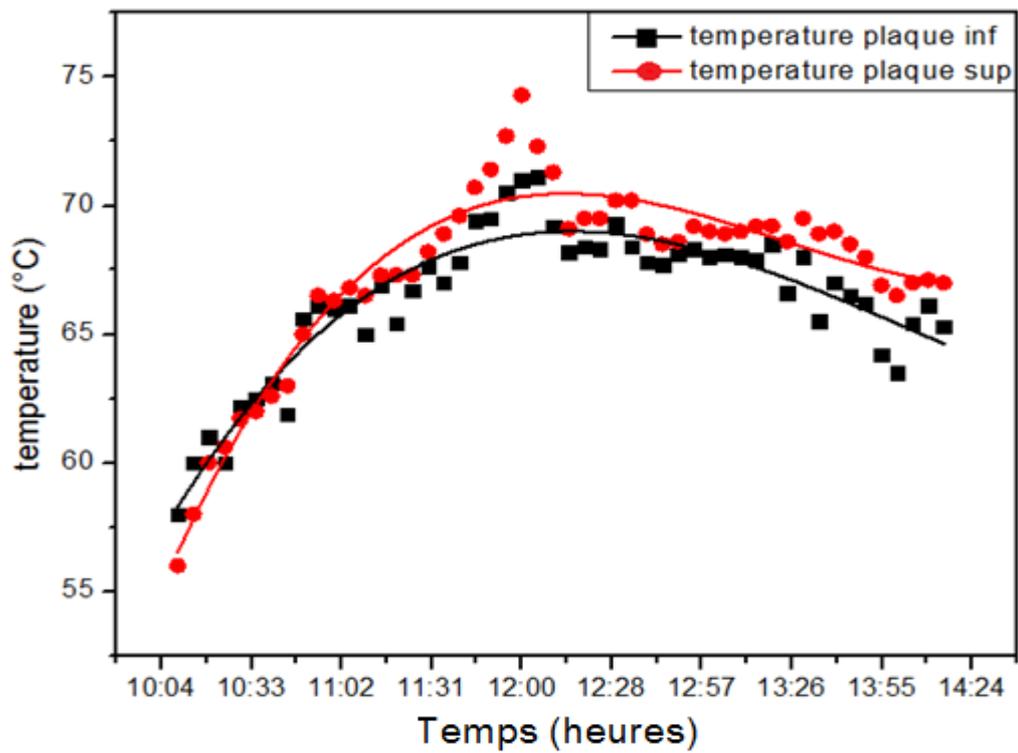


Figure (5-4) : variation des températures d'entrée et sortie et ambiante en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012



*Figure (5-5) : variation de la température supérieure et inférieure de la plaque absorbante en fonction du temps pour la journée du 17/07/2012*

Pour la journée du 19/07/2012 : circuit fermée

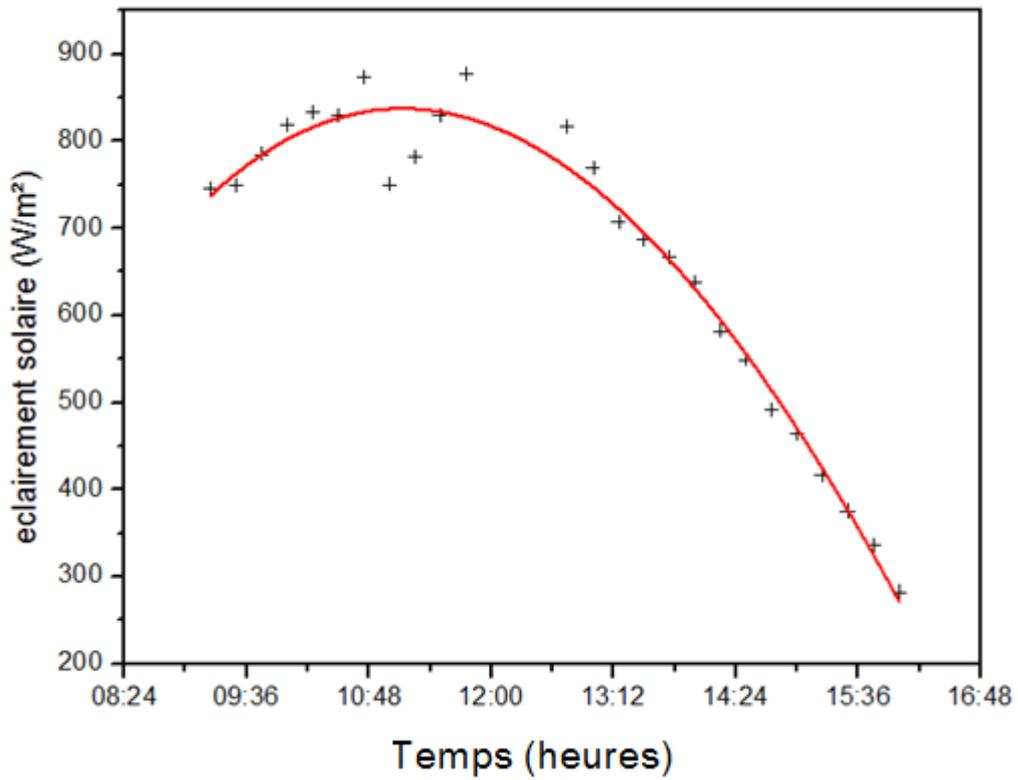


Figure (5-6) : Variation de l'éclairement solaire globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 19/07/2012

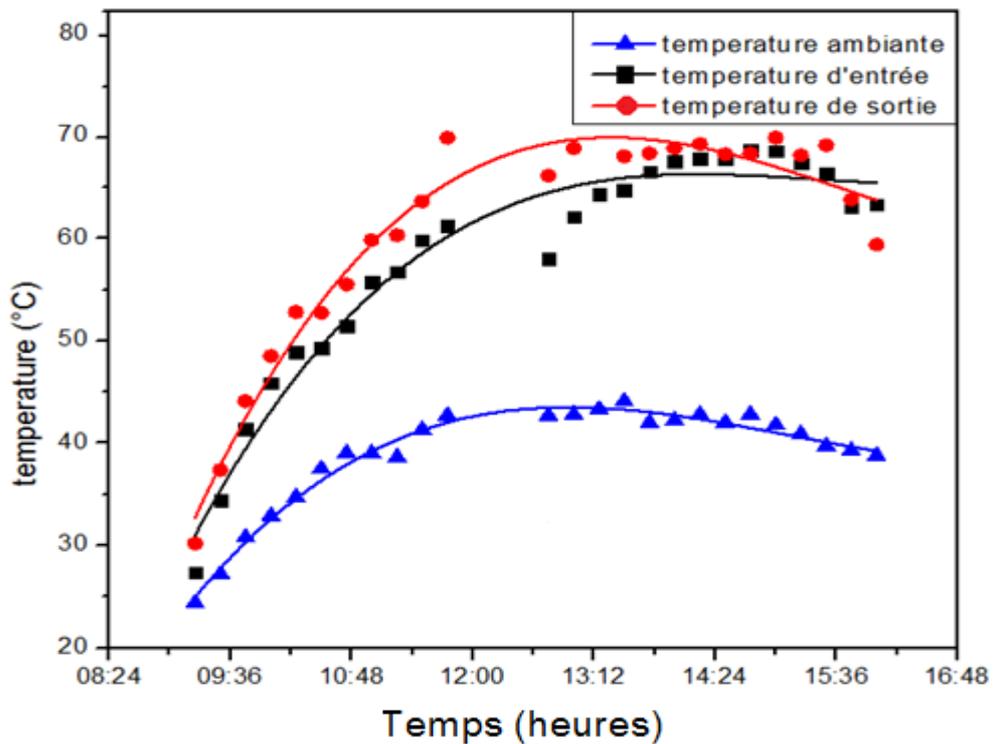


Figure (5-7) : Variation des températures d'entrée et sortie et ambiante en fonction du temps pour la journée du 19/07/2012

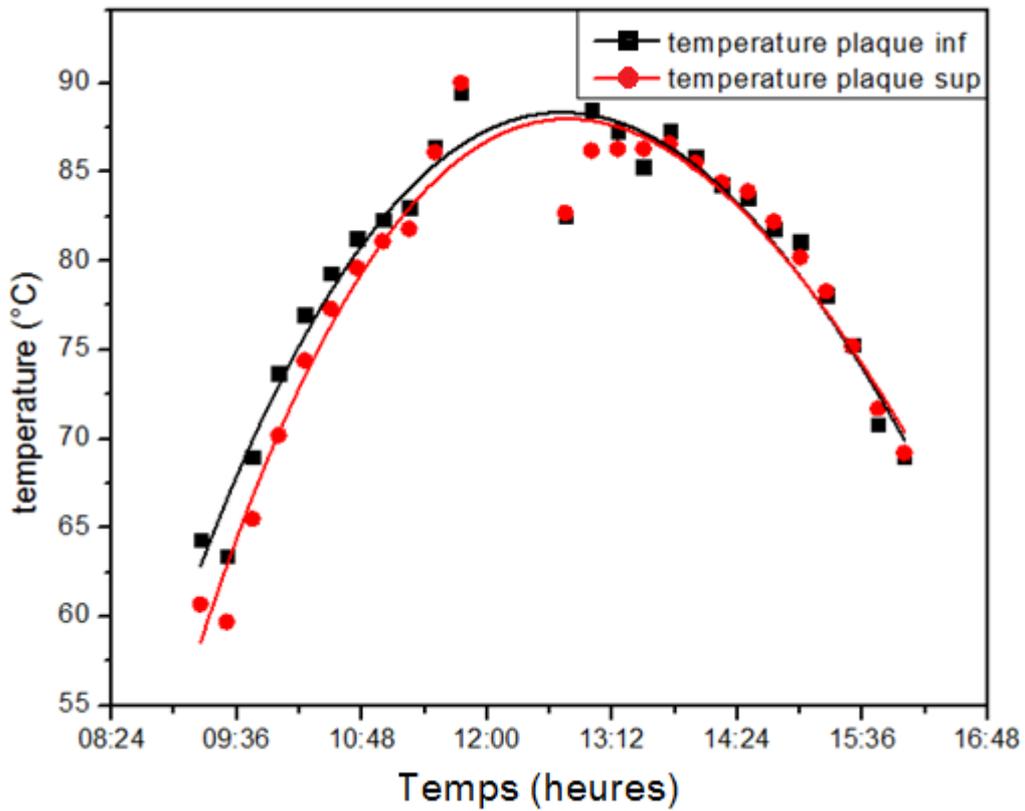


Figure (5-8) : Variation de la température supérieure et inférieure de la plaque absorbante pour la journée du 19/07/2012

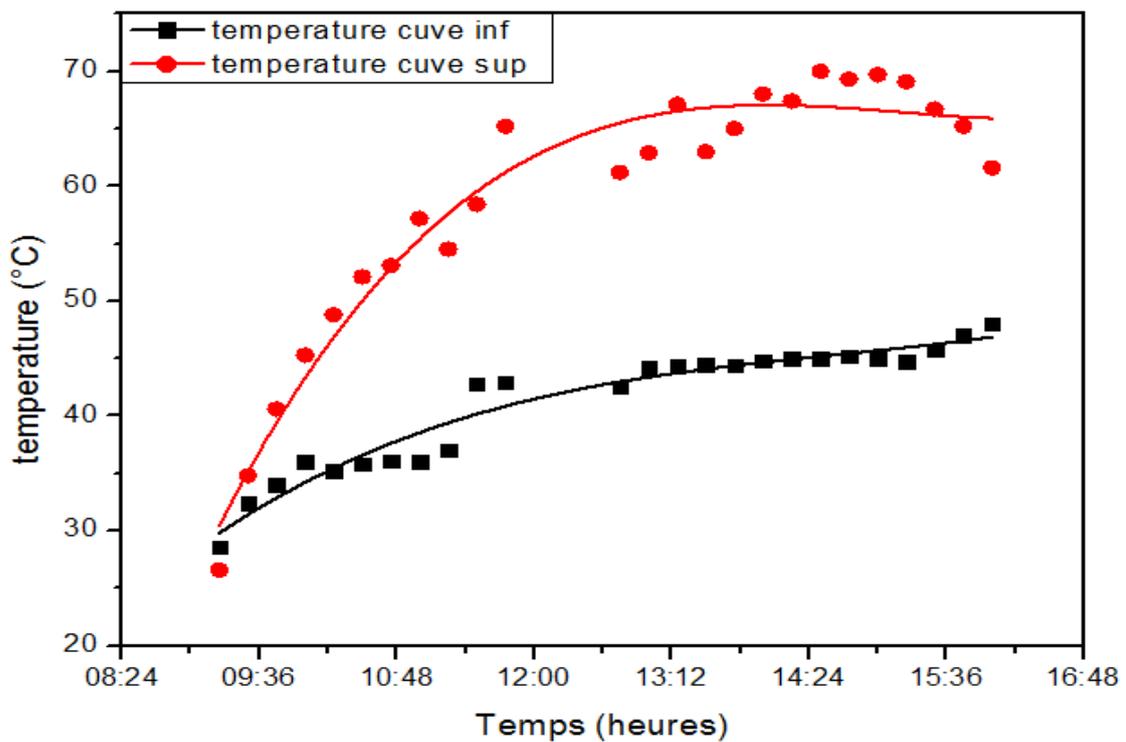


Figure (5-9) : Variation de la température supérieure et inférieure de la cuve pour la journée du 19/07/2012

**V-6. Tableaux de calculs :**

**V-6-1. Pour le calcul de la constante du temps :**

<b>Temps [s]</b>	<b>T entrées [°C]</b>	<b>T sorties [°C]</b>	<b>T ambiante [°C]</b>	<b>Eclairement W/m<sup>2</sup></b>	<b>Ts - Ta</b>
<b>0</b>	<b>28</b>	<b>28.5</b>	<b>29.8</b>	<b>778</b>	<b>-1,3</b>
<b>60</b>	<b>28.5</b>	<b>29.2</b>	<b>29.0</b>	<b>782</b>	<b>0,2</b>
<b>120</b>	<b>28.8</b>	<b>30.5</b>	<b>29.2</b>	<b>792</b>	<b>1,3</b>
<b>180</b>	<b>29</b>	<b>30.9</b>	<b>29.5</b>	<b>796</b>	<b>1,4</b>
<b>240</b>	<b>29.2</b>	<b>31.5</b>	<b>28.1</b>	<b>797</b>	<b>3,4</b>
<b>300</b>	<b>30</b>	<b>33.5</b>	<b>28.7</b>	<b>801</b>	<b>4,8</b>
<b>360</b>	<b>29.9</b>	<b>35.4</b>	<b>30</b>	<b>807</b>	<b>5,4</b>
<b>420</b>	<b>30.1</b>	<b>35.0</b>	<b>28.6</b>	<b>806</b>	<b>6,4</b>
<b>480</b>	<b>30.0</b>	<b>35.0</b>	<b>29</b>	<b>801</b>	<b>6</b>
<b>540</b>	<b>29.8</b>	<b>34.5</b>	<b>29.8</b>	<b>800</b>	<b>4,7</b>
<b>600</b>	<b>29.9</b>	<b>35.2</b>	<b>29.5</b>	<b>799</b>	<b>5,7</b>
<b>660</b>	<b>30</b>	<b>35.6</b>	<b>29.4</b>	<b>797</b>	<b>6,2</b>

*Tableau (5-1) : calcul de la constante du temps*

**V-6-2. Tableau des relevés pour le calcul du rendement instantané :**

(Le rendement instantané est porté à la surface d'ouverture du capteur)

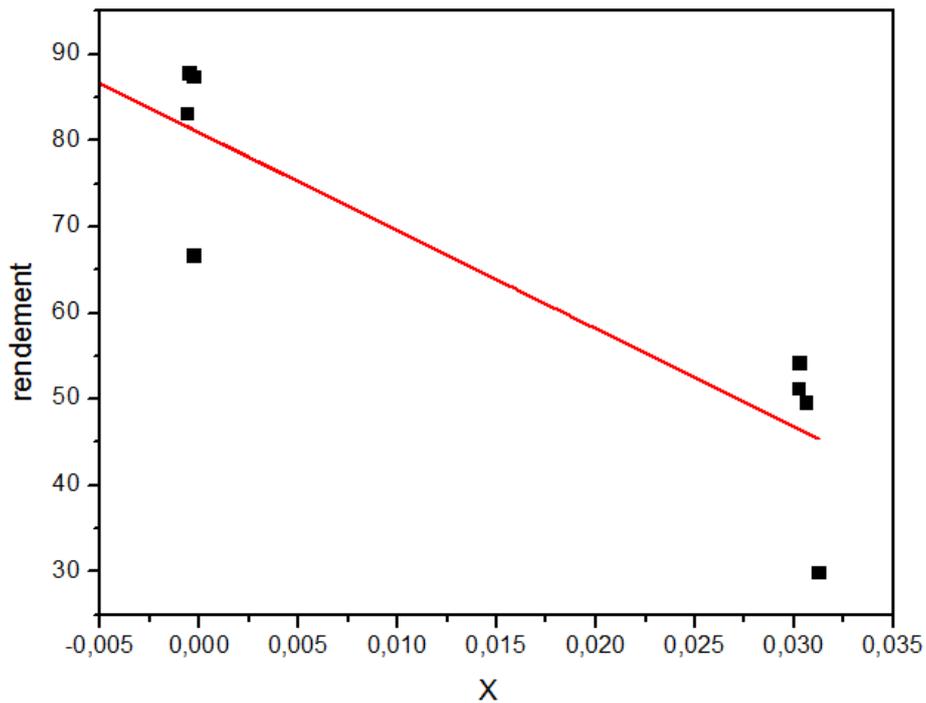
Date	heure	Te [°C]	Ts [°C]	Ta [°C]	$\Delta T$ [°C]	Ig [W/m <sup>2</sup> ]	Qu [W]	$\chi$	$\eta$ %
17/07	11 :30	28.5	37.2	29	8.7	952	1455,684	-0,00052	87.87
17/07	12 :00	30.5	37.2	30.8	6.7	966	1121,044	-0,00031	66.69
17/07	12 :25	29.2	37.4	29.8	8.2	948	1873,984	-0,00063	83.17
17/07	12 :40	28.9	37.5	29.2	8.6	946	1438,952	-0,00031	87.41
18/07	11 :55	65	70.3	36.6	5.3	939	886.796	0,03024	54.27
18/07	12 :00	66.2	71.2	37.9	5	937	836.6	0,03020	51.31
18/07	13 :28	65.8	70.4	38.6	4.6	880	769.672	0,03056	49.70
18/07	13 :32	66.1	68.9	38.0	2.8	900	468.496	0,03122	29.91

*Tableau (5-2) : relevés de tests pour le calcul du rendement instantané*

Par lissage des point mesurer et calculés en utilisant la méthode des moindre carrée à l'aide du logiciel OriginPro, on aboutit à la courbe caractéristiques du rendement instantané en fonction de X suivant le standard utilisée.

La figure (5-10) montre l'évolution du rendement instantané du capteur.

**V-7. Représentation du rendement du capteur suivant le standard ASHRAE :**



*Figure (5-10) : évolution du rendement instantané suivant le standard ASHRAE*

$$\text{Avec : } X = \frac{T_e - T_a}{I_g}$$

L'équation caractéristique du rendement instantané du capteur au premier ordre selon la norme ASHRAE est :

$$\eta = 80.90 - 11.39 X$$

Le rendement optique est de l'ordre de 80 % et le coefficient de pertes thermiques globales est de 11 W/m<sup>2</sup>K.

Remarque :

Cette courbe de rendement ne peut être considérée comme correcte que dans le cas de plusieurs tests et plusieurs points de fonctionnement.

**Conclusion :**

Dans le présent chapitre on a présenté les principaux résultats des différents comportements des températures de chaque élément du capteur (plaque, entrée, sortie...). On a surtout présenté le rendement instantané suivant le standard ASHRAE.

Un calcul de la constante du temps est effectué afin de déterminer la performance, le temps de réponse de notre système.

## **Conclusion générale :**

Le présent travail peut être décomposé en trois parties différentes :

- Une étude théorique sur l'énergie solaire et les capteurs plans.
- Une partie de réalisation d'un capteur solaire plan thermique.
- Une partie expérimentale.

Notre but est la réalisation d'un capteur solaire plan à circulation du liquide et le tester suivants la norme Européenne EN 12975-2, les résultats obtenues nous ont permis de déterminer les performances du capteur ainsi l'évaluation du rendement instantané et journalier du capteur,

Le temps de repense du capteur (constante du temps = 5minutes) nous a donné une idée sur la bonne conception de notre capteur.

Une modélisation théorique du capteur solaire plan a été développée, ce qui a permis de déterminer l'expression générale du coefficient de pertes thermiques globale, de la quantité de rayonnement transmise par le vitrage et absorbée par la plaque absorbante, et la quantité de chaleur transmise au fluide caloporteur. Ainsi que l'expression du rendement instantané pour une incidence normale selon les deux standards (ASHRAE, EUROPEENNE).

Par ailleurs, elle a été suivie par une description détaillée du capteur solaire réalisé, les éléments et les instruments de mesure utilisés lors de la mise au point du capteur,

Une étude des différentes normes les plus utilisées a été présentée, afin de montrer la différence qui existe entre ces normes en termes de précision et de facilité des tests.

Le présent travail est suivi par Cinq annexes détaillées.

## **Bibliographie :**

[1] Thierry CABIROL, Albert PELISSOU, Daniel ROUX, « L'isolateur plan à effet de serre et Le chauffe-eau solaire », 1979, pp 30-36.

[2] R.BERNARD G.MENGUY M.SCHWARTZ, « le rayonnement solaire conversion thermique et applications » 2<sup>E</sup> Edition, paris 1980

[3] Jacques BERNARD, « Energie solaire calculs et optimisation », ellipses France 2004, pp 100.

[4] Michel CAPDEROU « Atlas solaire de l'Algérie modèles théoriques et expérimentaux » Tome 1, Office des publications universitaires Alger 1987.

[5] Mr Merzouk Mustapha « cours de master 2 options : conversion thermodynamique » université de Blida, 2011/2012.

[6] CEN (comité européenne de normalisation) « NORME EUROPEENNE EN 12975 », Mars 2006.

[7] Lafri Djamel «cours de master 2 : Normes et standards » 2011/2012.

[8] Abdi Hamid, Thèse : « contribution à la détermination des performances de capteurs plans a contact direct eau-plaque d'absorption », 1999, université de Blida

[9] BARANYIZIGITYE William Thèse : « optimisation d'un capteur solaire plan a eau » juin 1990, Boumerdes.

[10] O-Ketfi, S-Khaled, mémoire « étude d'un système de régulation par chauffe-eau solaire », 2010, chapitre 4.

[11] M-Merzouk, « protocole et banc d'essais pour l'étude expérimentale des capteurs solaires plans ».

[12] John A.Duffie and William A.Beckman, « solar engineering of thermal processes », by John wiley & sons, 2<sup>nd</sup> ed New york, 1991.

## **Annexe A**

### **Conception**

#### **A-1. Introduction :**

Le capteur a été réalisé au niveau de l'atelier de soudage au département de mécanique à l'université de Blida.

Le temps de réalisation du capteur est estimé de deux mois.

#### **A-2-a. Fabrication du support du capteur :**

Pour la réalisation du support du capteur on a utilisé comme matériaux :

- deux barres de cornières de 3.5 cm, et de 6 m de longueur.
- deux tubes en Acier de longueur de 110 cm.
- Deux tubes en Acier de longueur de 20 cm.
- 4 Rous métalliques.

#### **A-2-a-1. Les étapes de réalisation du support :**

- On a commencé par couper les cornières en morceaux de 4\* 2 m et 4\* 1 m.
- souder les morceaux de telle façon d'obtenir deux cadres de 2 m\* 1 m.
- les deux cadres son relier par deux paumelles, par deux barres de soutien pour la variation d'angle d'inclinaison.
- le cadre supérieur maintien le capteur fixe et permet le changement de l'angle d'inclinaison.

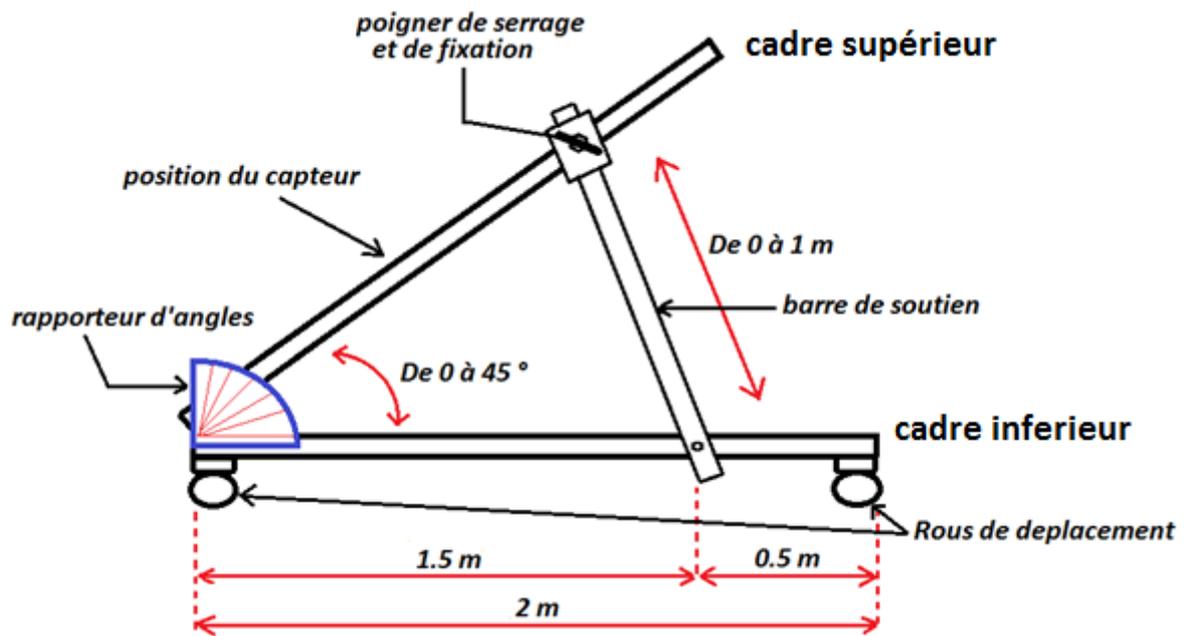


Figure (A-1) : schéma du support du capteur



Figure (A-2) : photo de l'ensemble du support du capteur

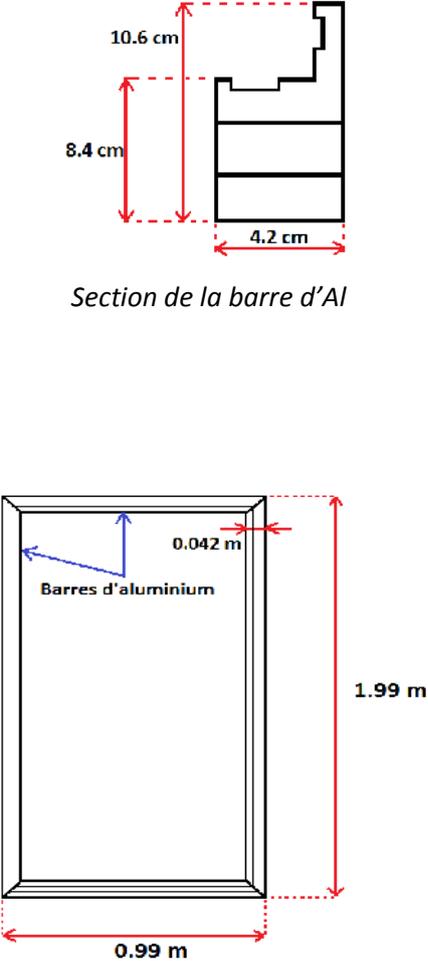
**A-2-b. Fabrication du capteur :**

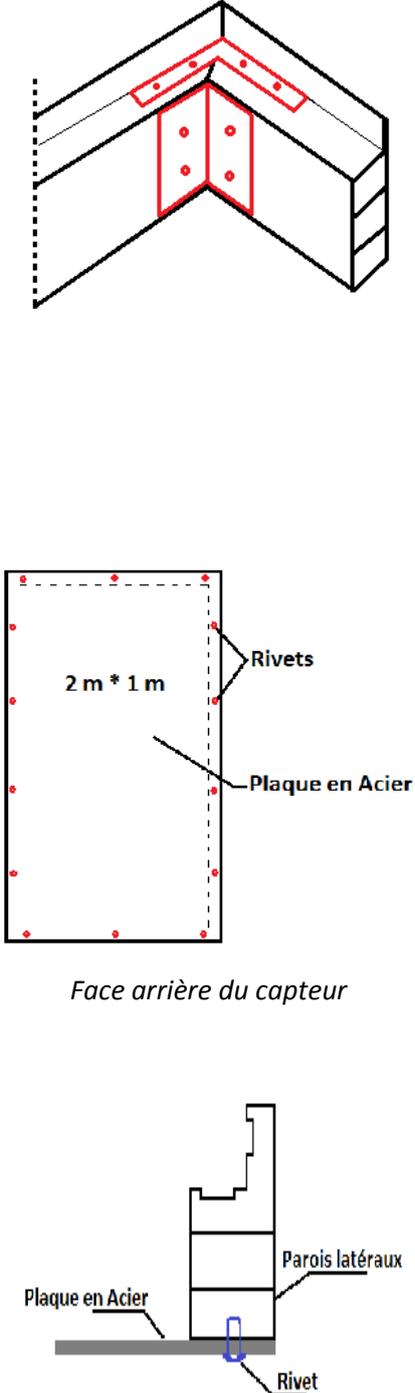
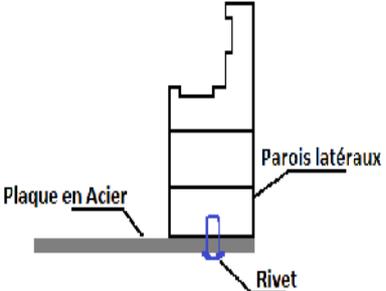
Pour la réalisation du capteur, on a utilisé les matériaux suivants :

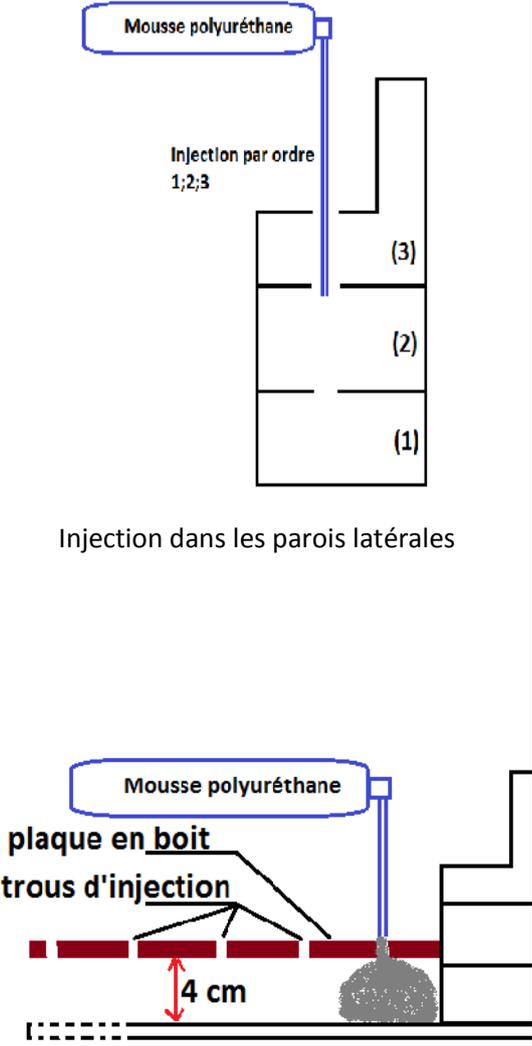
- Une traverse en Aluminium (parois latéraux).
- Une cornière en aluminium 3.5 \* 3.5 cm et 40 cm de long.
- Une barre en aluminium (parclose) pour la fixation du vitrage.
- Une tôle en Acier de 1.5 mm
- Une tôle en Acier galvanisé de 0.8 mm d'épaisseur
- Mousse polyuréthane (isolation arrière et latérale).
- Tube en cuivre de 16 mm de diamètre
- Vitre (verre blanc) de 2 m<sup>2</sup> de surface et de 4 mm d'épaisseur
- Joins de 12 m de long (pour le vitrage).

**A-3. Processus détaillé de réalisation du capteur :**

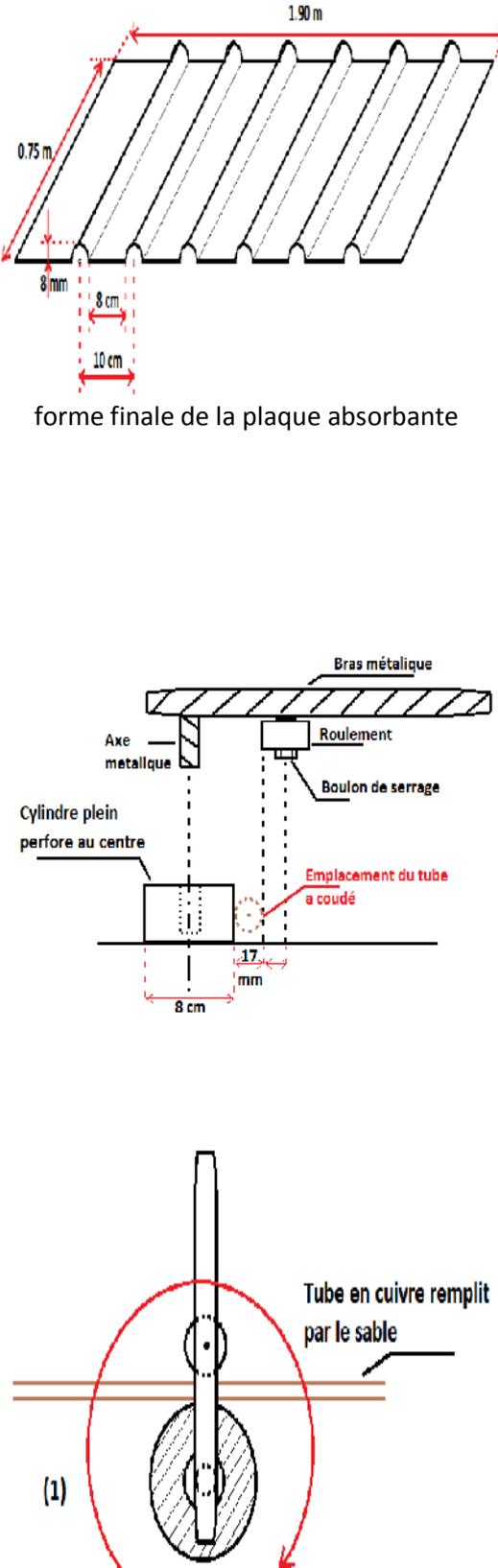
Tous les détails de fabrication du capteur sont mentionnés dans le tableau suivant :

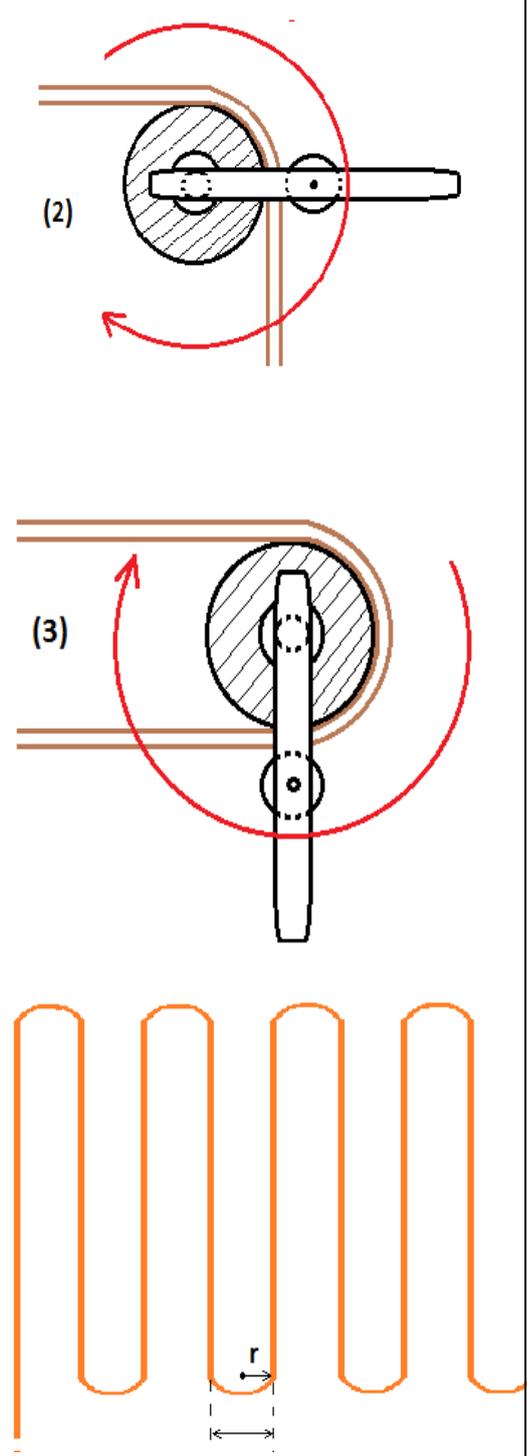
Étapes	Matériaux et Operations	outillages	Dessins techniques
<p><b>Étape 1</b> Construction du boîtier</p> <p><b>Opération 1</b></p> <p><b>Opération 2</b></p> <p><b>Opération 3</b></p>	<p>Barre d'Aluminium de 6m</p> <p>- Découper la barre en 4 morceaux d'angle de 45° sur chaque côté (2*2m et 2*1m)</p> <p>- 4 morceaux de cornières (3*3 cm) de 8 cm de longueur sont riveter dans les quatre côtés internes</p> <p>- 4 pièces de formes « L » sont riveter sur la face supérieure des barres</p>	<p><b>Découpage</b> (Meule à couper pour Aluminium)</p> <p><b>Assemblage par Rivetage</b> (Riveteuse)</p>	 <p><i>Section de la barre d'Al</i></p> <p>0.99 m</p> <p>1.99 m</p> <p>0.042 m</p> <p>Barres d'aluminium</p>

<p><b>Opération 4</b></p>	<p>- Montage de la tôle d'Acier de <b>1.5 mm</b> au bas des parois latéraux</p>	<p><b>Rivetage (Riveteuse)</b></p>	 <p>The diagrams illustrate the riveting process for the back of the receiver. The top diagram is a 3D perspective view of the corner where the side walls meet, showing a red outline of the steel plate being attached with rivets. The middle diagram is a 2D plan view of a rectangular steel plate measuring 2 m by 1 m, with red dots representing rivets along its perimeter. Labels include 'Rivets' and 'Plaque en Acier'. Below it is the caption 'Face arrière du capteur'. The bottom diagram is a cross-sectional view showing the 'Plaque en Acier' (steel plate) being attached to the 'Parois latéraux' (side walls) using a 'Rivet'.</p>
<p><b>Étape 2</b> Isolation</p>	<p>Injection de la mousse polyuréthane dans les parois latérales</p>	<p><b>Mousse polyuréthane</b></p>	 <p>This diagram shows a cross-sectional view of the side wall assembly. It labels the 'Parois latéraux' (side walls), the 'Plaque en Acier' (steel plate) at the base, and a 'Rivet' used for attachment.</p>

<p><b>Etape 3</b> Réalisation d’empreinte</p> <p><b>Opération 1</b></p>	<p>Injection de la mousse polyuréthane à l’arrière</p> <p>Le plaque en bois de 4 mm d’épaisseur maintient la mousse dans sa forme d’épaisseur 4 cm</p> <p>Plaque absorbante en Acier galvaniser 0.8 mm et de 2 m<sup>2</sup></p> <p>Découper la tôle de <b>(1*2) m en (0.75*2) m</b></p>	<p><b>Cisailleuse</b></p>	 <p>Injection dans les parois latérales</p> <p>Injection de la mousse à l’arrière du capteur</p>
---	--	---------------------------	---

<p><b>Opération 2</b></p> <p>Réalisation de la matrice d'emboutissage pour la forme Convexe</p> <p>La forme convexe de la plaque absorbante est réalisée à l'aide d'une presse comme le montre le schéma</p> <p>L'opération est répétée 19 fois, la distance entre le centre de chaque empreinte est de 10 cm.</p> <p>Toutes les dimensions sont montrées dans le schéma</p>		<p><b>Poste à souder</b></p> <p><b>Presse hydraulique</b></p>	<p>Schéma du principe de la presse hydraulique</p>
--	--	---	--

<p><b>Etape 4</b> Circuit hydraulique (Serpentin)</p>	<p>Réalisation d'une cintreuse pour un rayon de 4 cm</p> <p>* coincer le tube en cuivre plein de sable dans la cintreuse.</p> <p>* faire tourner le bras de la cintreuse de 180°</p> <p>* respecter la direction montrée dans le schéma</p>		 <p>The diagram illustrates the final shape of the absorbent plate and the assembly of the bending mechanism. The top part shows a perspective view of the absorbent plate with dimensions: a total length of 1.90 m, a height of 0.75 m, and a spacing of 8 mm between the tubes. The bottom part shows a cross-sectional view of the bending mechanism, including a metal arm (Bras métallique), a metal axle (Axe métallique), a roller (Roulement), and a tightening bolt (Boulon de serrage). A central perforated cylinder (Cylindre plein perforé au centre) is shown with an 8 cm diameter. The location of the bent copper tube (Emplacement du tube a coudé) is marked with a 17 mm offset. The bottom part shows a cross-section of the copper tube (Tube en cuivre rempli par le sable) being bent around a 4 cm radius, labeled (1).</p> <p>forme finale de la plaque absorbante</p>
---	---	--	--

<p><b>Etape 5</b> Assemblage des éléments</p> <p><b>Opération 1</b></p>	<p>La forme finale du serpentín est montrée dans la figure en face</p> <p>Assemblage du serpentín avec la plaque absorbante</p>	<p><b>Riveteuse</b></p>	 <p>(2)</p> <p>(3)</p> <p>Forme finale du serpentín</p> <p>The diagram illustrates the riveting process in two steps. Step (2) shows a rivet being inserted into a hole in a metal plate, with a red arrow indicating the direction of rotation. Step (3) shows the rivet being driven through the hole, with a red arrow indicating the direction of rotation. Below these steps, the final serpentine shape of the metal plate is shown, with a dimension 'r' indicating the radius of the curve.</p>
---	---	-------------------------	--

<p><b>Opération 2</b></p>	<p>*L'assemblage se fait à l'aide de colliers pour maintenir le bon contact entre la plaque et le circuit hydraulique</p> <p>*Les colliers sont fixés par des rivets</p>		
<p><b>Opération 3</b></p>	<p>Fixer l'ensemble serpentín-plaque dans le capteur</p> <p>L'ensemble est fixé par des boulons.</p>		
<p><b>Opération 4</b></p>	<p>Montage de jointure interne.</p>		<p>Vue d'ensemble du capteur</p>
<p><b>Opération 5</b></p>	<p>Montage de jointure externe.</p>		<p>1 – parois du capteur  2 – isolation  3 – plaque absorbante  4 – circuit hydraulique  5 – vitrage  6 – join interieur  7 – barre de fixation du vitrage (parclose)  8 – join exterior</p>

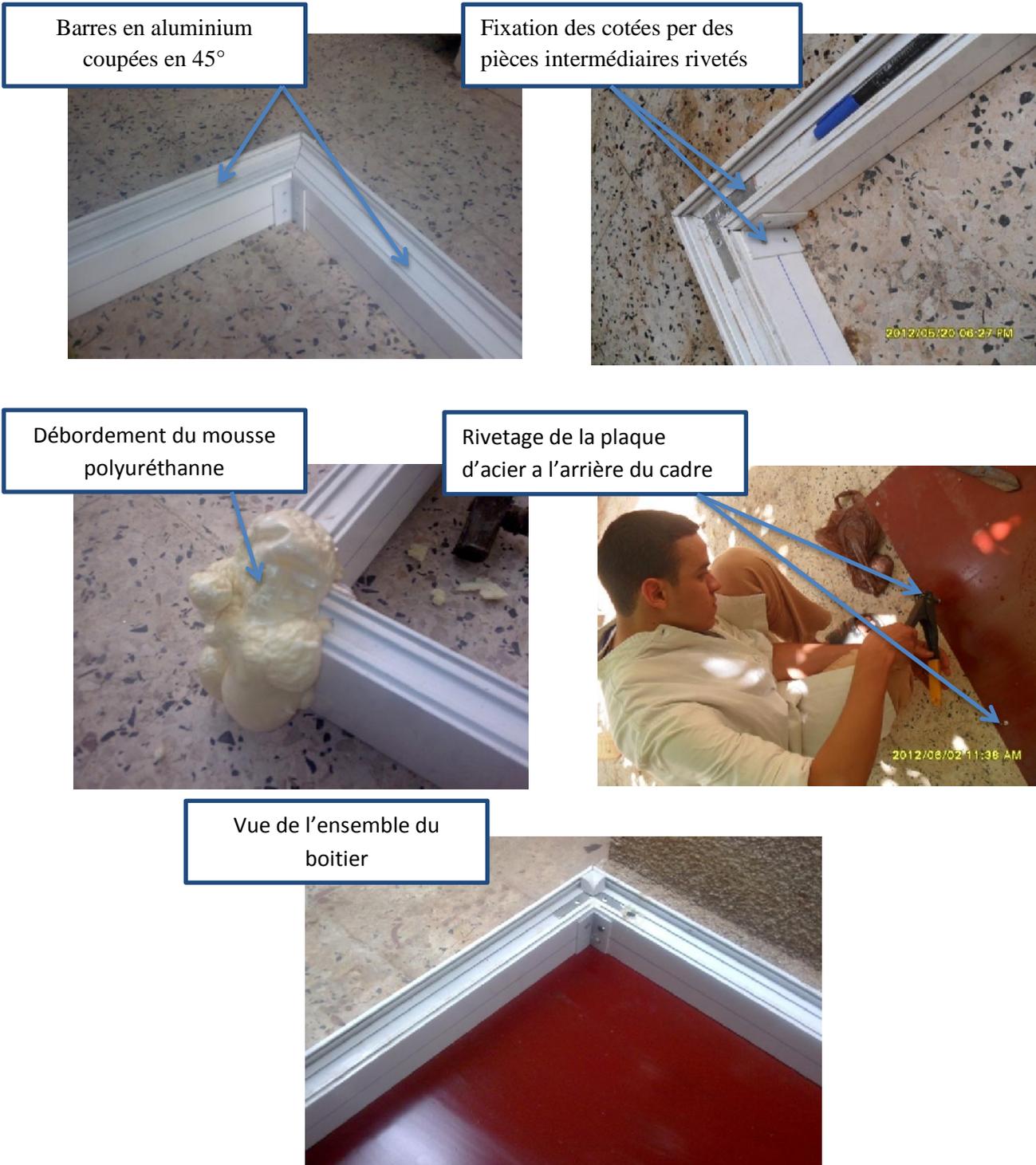
**A-4. Estimation du cout du capteur :**

Le tableau suivant donne les différents matériaux achetés pour la réalisation du capteur :

<i>matériau</i>	<i>quantité</i>	<i>cout</i>
<i>Traverses d'aluminium</i>	<i>1</i>	<i>3800 DA</i>
<i>Cornière d'aluminium</i>	<i>1</i>	<i>1000 DA</i>
<i>Tube en cuivre</i>	<i>20 mètres</i>	<i>8200 DA</i>
<i>Verre ordinaire</i>	<i>1</i>	<i>1300 DA</i>
<i>Mousse polyuréthane</i>	<i>5</i>	<i>3500 DA</i>
<i>Peinture</i>	<i>2</i>	<i>700 DA</i>
<i>Raccords et vannes en cuivre</i>	<i>/</i>	<i>1000 DA</i>
<i>Clapet anti retour</i>	<i>1</i>	<i>300 DA</i>
<i>Cuve en plastique de 40 L</i>	<i>1</i>	<i>500 DA</i>
<i>Des Rous</i>	<i>4</i>	<i>800 DA</i>
<b><i>TOTALE</i></b>	<i>/</i>	<b><i>21100 DA</i></b>

Annexe B

Réalisation en photos du capteur solaire plan :



## Annexe B

Plaque en bois de 4 mm pour maintenir l'épaisseur de l'isolant



Injection de la mousse polyuréthane à l'arrière



Réalisation de la couche sélective de la plaque absorbante



Cintrage du tube de cuivre par une cintruse artisanale



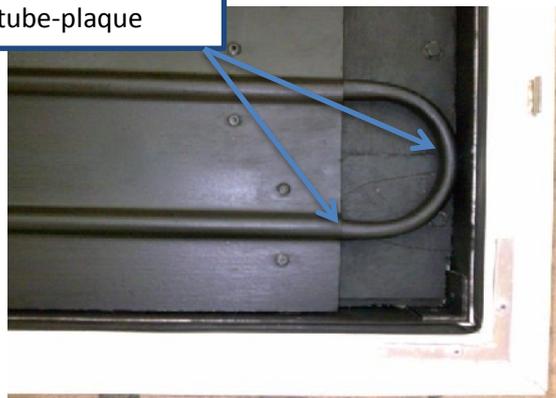
Fixation du serpentin avec la plaque absorbante par des colliers



Vue d'ensemble du capteur sans vitrage



Vu du coude 180°, et du contact tube-plaque



Annexe B

Soudage des supports de Rous pour le support capteur



Vue d'un support de Rous



Boulons de blocage



Perçage des tubes de soutien du capteur



Vue du système d'inclinaison



Vue de l'ensemble du support du capteur



Annexe B



Système de réglage d'angle d'inclinaison



Vanne de réglage du débit à l'entrée du capteur



Thermocouple à l'entrée du capteur pour la température d'entrée



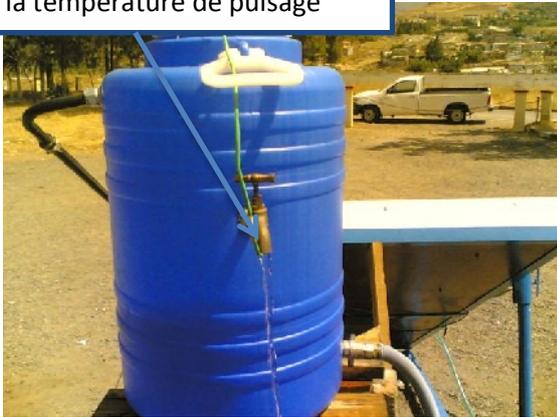
Sortie du capteur



Plaque d'informations



Cuve de stockage avec thermocouple pour la température de puisage



Acquisition des données



Traitement des informations



Branchement des fils a l'arrière de l'acquisition



## Annexe C

## Calculs supplémentaires

## C-1. Introduction :

Le teste du capteur pour  $T_e \approx T_a + 20^\circ\text{C}$  pour la journée du 18/09/2012 est conforme aux conditions de calcul de rendement instantané ( $I_g$  variable entre le matin et le soir)

Pour la journée du 18/07/2012 : ( $T_e \approx T_a + 20^\circ\text{C}$ )

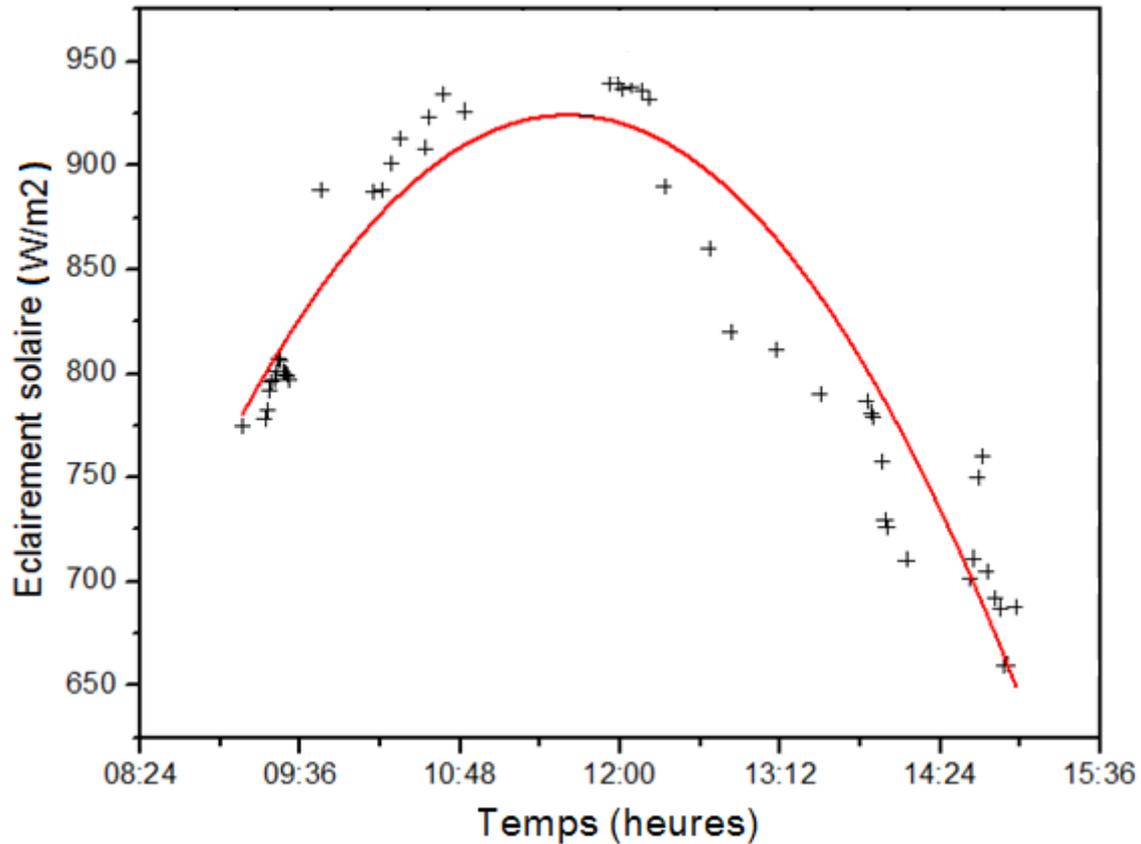
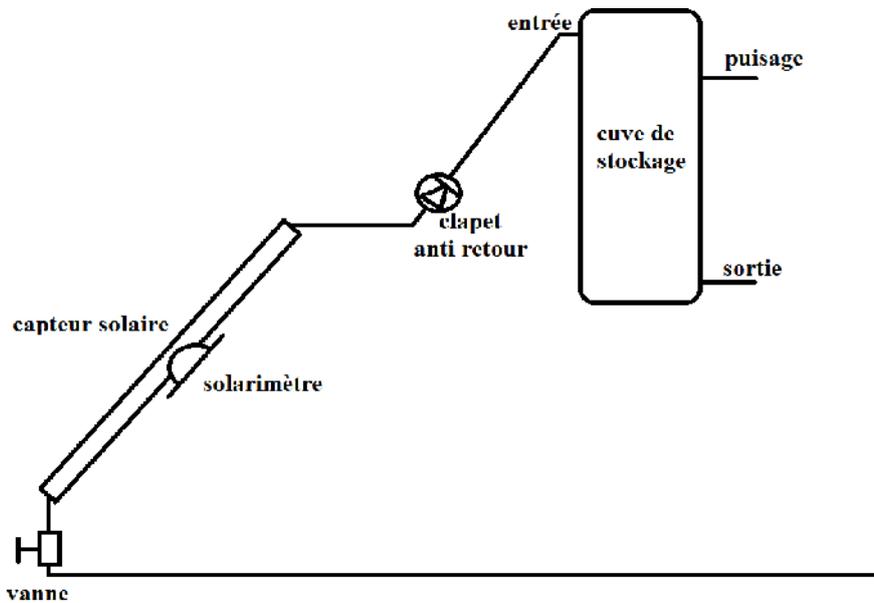


Fig. (C-1) : variation de l'éclairement solaire globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 18/07/2012

### C-2. Circuit ouvert :

Pour le premier jour de teste du capteur (16/07/2012) on a laissé le circuit de circulation ouvert (voir fig. (C-2)).



*Fig. (C-2) : schéma du circuit ouvert utiliser pour la journée du 16/07/2012*

Les courbes de variation des différentes températures en fonction du temps sont mentionnées dans cette annexe. Les mesures sont prises à un pas de temps de 15 minutes, et à un débit massique constant (0.04 Kg/s).

La température d'entrée du capteur est prise égale à la température du réseau  $\approx 25$  °C.

C-3. Courbes de résultats :

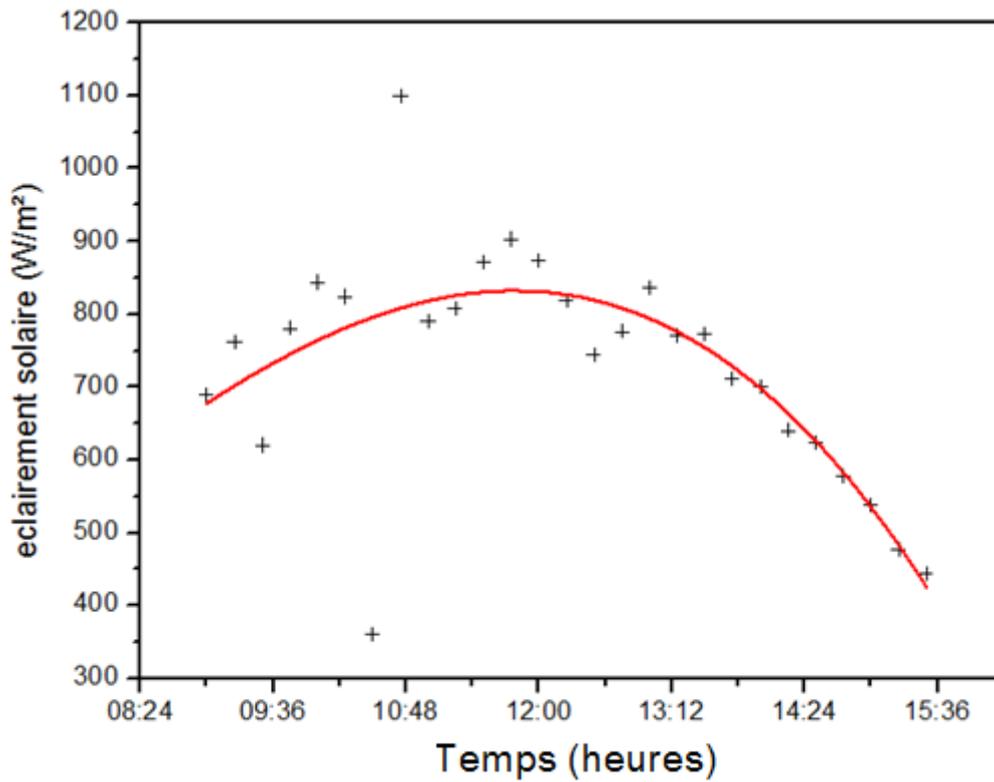


Fig. (C-3) : Variation de l'éclairement solaire globale inclinée en fonction du temps pour la journée du 16/07/2012

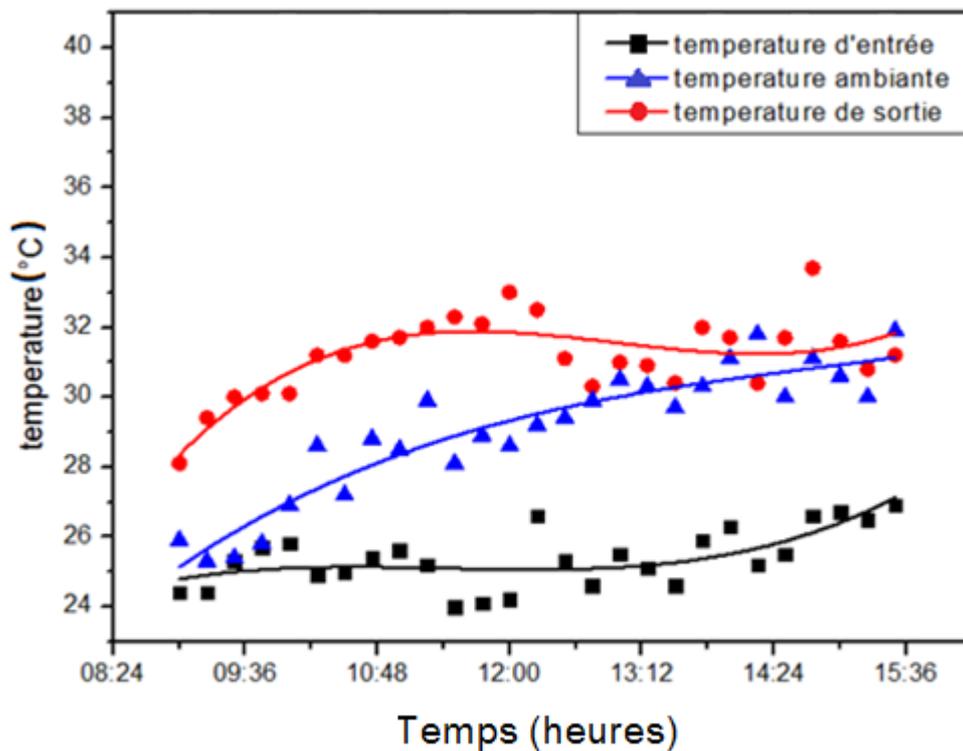
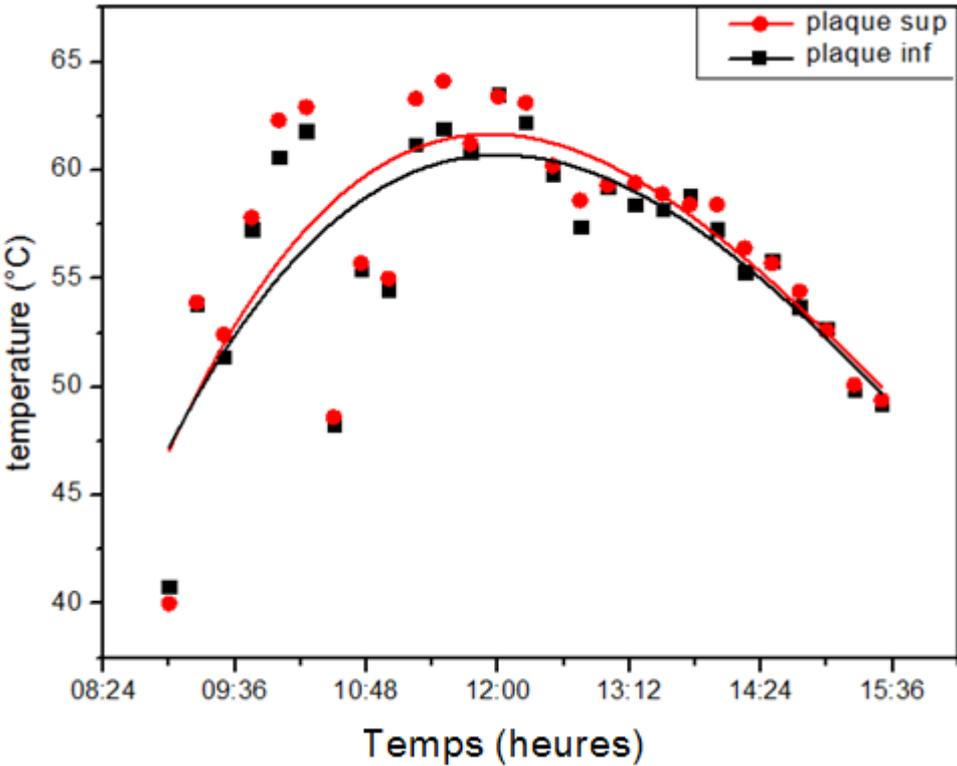


Fig. (C-4) : Variation de la température d'entrée et de sortie et ambiante en fonction du temps pour la journée du 16/07/2012



*Fig. (C-5) : variation de la température inferieur et supérieur de la plaque absorbante en fonction du temps pour la journée du 16/07/2012*

**C-4. Calcule des pertes de charges dans le capteur solaire :**

1- Détermination de la vitesse moyenne du fluide dans le circuit :

$$V = \frac{Q}{S}$$

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{Q}{\left(\frac{\pi D^2}{4}\right)}$$

Avec :

V : vitesse du fluide.

Q : débit du fluide.

S : section de la conduite.

D : diamètre de la conduite.

$$V = 0.27 \text{ m/s}$$

**C-4-1. Calcule des pertes de charges linéaires « r » :**

$$r = Fa. \frac{1}{D} \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad [Pa/m]$$

$$r = 1301 \quad \left[ \frac{Pa}{m} \right]$$

En multipliant « r » par la longueur de la conduite (sans les coudes) on trouve :

$$r = 0.208 \text{ [bar]}$$

**C-4-2. Calcule des pertes de charges singulière « z » : (pour coude de 180°)**

$$z = \xi \cdot \rho \cdot \frac{V^2}{2} \quad [Pa]$$

$$z = 15.31 \quad [Pa] = 1.531 \cdot 10^{-4} \text{ [bar]}$$

En multipliant par le nombre de coudes :

$$z = 29.07 \cdot 10^{-4} \text{ [bar]}$$

**C-5. Pertes de charge globale dans le serpentin :**

$$\sum \text{Pert es} = r + z = 0.211 \text{ [bar]} = 2.11 \text{ mCE}$$

**C-6. Détermination de la pompe nécessaire pour notre capteur :**

Pour trouver la pompe parfaite pour notre capteur on doit calculer la hauteur manométrique totale ***Hmt*** :

$$Hmt = H_g + \sum pertes = 1.19 + 2.11 = 3.3 \text{ mCE}$$

Caractéristiques de la pompe :

$$\begin{cases} Q = 0.04 \text{ [l/s]} = 0.144 \text{ [m}^3\text{/h]} \\ Hmt = 3.3 \text{ mCE} \end{cases}$$

## Annexe D

### Les normes et les standards

#### D-1. Historique :

Le premier standard portant sur la normalisation des capteurs solaires a été publié par le : nationale bureau of standardisation (NBS) en 1974 sous N-74-635.

Standard suivi par :

- Standard **ASHRAE** 93-77 en 1977.
- Les recommandations **EUROPEENNE** pour les capteurs solaires plans.  
Testes méthodes for fluides liquide en 1980.
- Le standard **AUSTRALIEN**.

Les méthodes d'essai permettent de déterminer la capacité d'un capteur solaire a circulation de liquide à résister à l'influence d'agent dégradant, il définit des modes opératoires d'essai des capteurs dans les conditions bien définies.

Ces méthodes d'essai permettent également de déterminer les performances thermiques des capteurs solaires à circulation du liquide.

Le tableau suivant montre les différentes caractéristiques d'essai de chaque standard :

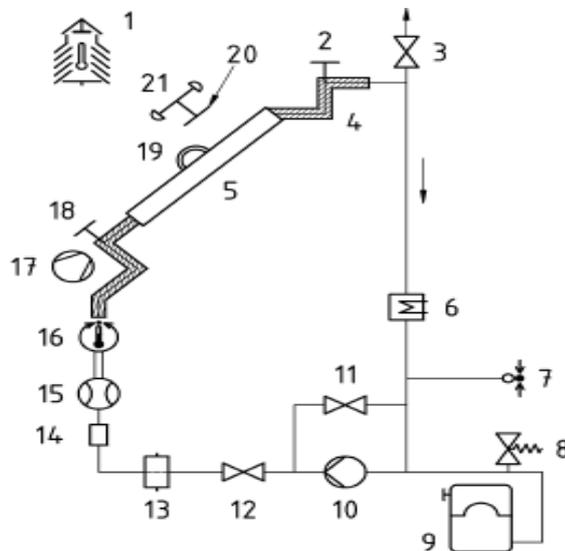
Le standard ASHRAE	Le standard EUROPEENNE	Le standard AUSTRALIEN
<p><b>Le nombre de points de mesure :</b> les points de mesures sont choisis telle que <math>\Delta T : (T_e - T_a)</math> soit égale a :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 10 % de <math>(T_s - T_a)</math></li> <li>• 30 % de <math>(T_s - T_a)</math></li> <li>• 50 % de <math>(T_s - T_a)</math></li> <li>• 70 % de <math>(T_s - T_a)</math></li> </ul> <p>Avec <math>T_s</math> : La température de stagnation.</p> <p>Chaque point est relever 4 fois 2 avant midi et 2 après midi soit totale de 16 points</p> <p><b>Le rendement instantané :</b></p> $\eta = \frac{A_a}{A_g} F_r \left[ (\tau\alpha)_{eff} - \frac{U_L(T_e - T_a)}{I_g} \right] = \frac{mC_p(T_s - T_e)}{I_g A_g}$ <p><math>A_a</math> : surface actif. <math>A_g</math> : surface globale.</p>	<p><b>Le nombre de points :</b> les points de mesures sont choisis tel que :</p> $T_e = T_a$ $T_e = T_a + 20^\circ C$ $T_e = T_a + 40^\circ C$ $T_e = T_a + 60^\circ C$ <p>Chaque point est relever 4 fois 2 avant midi et 2 après midi soit totale de 16 points</p> <p><b>Le rendement instantané :</b> Il est représenté par une parabole exprimer par :</p> $\eta = \eta_0 - a_1 T_m^* - a_2 G (T_m^*)^2$ <p>Avec : <math>\eta_0</math> rendement optique <math>T_m</math> : température arithmétique du fluide caloporteur <math>a_1</math> : coefficient de pertes thermiques de 1<sup>er</sup> ordre <math>a_2</math> : coefficient de pertes thermiques du 2<sup>eme</sup> ordre</p>	<p><b>Le nombre de points :</b> /</p> <p><b>Le rendement instantané :</b></p> $\eta = \eta_{ob}(1 - F_d) - \eta_{od}F_d - (a + bv)x - (c + dv)(T'_f - T_a)x - (e + fT''_f) \frac{(T'_f{}^4 - T_c^4)}{(T'_f - T_a)}$ <p>Avec :</p> $x = \frac{T'_f - T_a}{I_g} \quad \text{et}$ $T'_f = T_s - T_e - \frac{T_e + T_s}{\ln \frac{T_s}{T_e}}$ <p><math>T'_f</math> : Tempe moyenne arithmétique <math>T'_f</math> : est en (°K) <math>T_c</math> : température du ciel <math>V</math> : vitesse du vent <math>F_d</math> : rapport de la radiation diffuse sur la radiation globale <math>\eta_{ob}</math> : rendement optique de l'irradiation direct. <math>\eta_{od}</math> : rendement optique de l'irradiation diffuse. <math>A, b, c, d</math> et <math>f</math> paramètres caractérisant les pertes thermique.</p>

Tableau (D-1) : caractéristiques des différents standards

Les instruments de mesures :	ASHRAE	EUROPEENNE	AUSTRALIEN
Le pyranomètre	Classe I	Classe I ou II	Classe II
Les thermocouples	$\pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.05 \text{ K}$
La thermopile	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$	$\pm 0.07 \text{ K}$
Le débit mètre	$\pm 1 \%$	$\pm 1 \%$	$\pm 0.5 \%$
L'anémomètre	$\pm 0.8 \text{ m/s}$	$\pm 0.5 \text{ m/s}$	/

*Tableau (D-2) : caractéristiques des instruments de mesures suivant les différents standards*

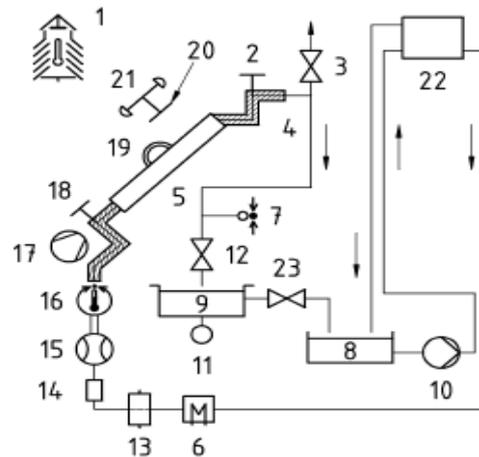
### D-2. Les différents types de boucles d'essai de capteur :



#### Légende

- |   |  |
|---|--|
| 1 Sonde de température de l'air environnant                             | 12 Soupape de régulation de débit              |
| 2 Sonde de température ( $t_g$ )  | 13 Filtre (200 $\mu\text{m}$ )                 |
| 3 Évent   | 14 Voyant                                      |
| 4 Tuyau isolé   | 15 Débitmètre                                  |
| 5 Capteur solaire   | 16 Régulateur de température secondaire        |
| 6 Soupape de sûreté   | 17 Ventilateur (générateur de vent artificiel) |
| 7 Manomètre   | 18 Sonde de température ( $t_n$ )              |
| 8 Chauffage/refroidisseur pour la régulation de la température primaire | 19 Pyrgéomètre                                 |
| 9 Vase d'expansion  | 20 Pyranomètre                                 |
| 10 Pompe  | 21 Anémomètre                                  |
| 11 Clapet de dérivation   |  |

*Figure (D-1) : Exemple de boucle d'essai fermée*



## Légende

- |    |  |    |                                      |
|----|--|----|--------------------------------------|
| 1  | Sonde de température de l'air environnant                          | 12 | Soupape de régulation de débit       |
| 2  | Sonde de température ( $t_e$ )                                     | 13 | Filtre (200 $\mu$ m)                 |
| 3  | Évent  | 14 | Voyant                               |
| 4  | Tuyau isolé  | 15 | Débitmètre                           |
| 5  | Capteur solaire  | 16 | Régulateur de température secondaire |
| 6  | Réservoir  | 17 | Ventilateur                          |
| 7  | Manomètre  | 18 | Sonde de température ( $t_n$ )       |
| 8  | Chauffage/refroidisseur pour régulation de la température primaire | 19 | Pyrogéomètre                         |
| 9  | Récipient de pesage  | 20 | Pyranomètre                          |
| 10 | Pompe  | 21 | Anémomètre                           |
| 11 | Balance  | 22 | Réservoir à niveau constant          |

**Figure (D-2) : exemple de boucle d'essai ouverte**

### D-3. Particularité des bancs d'essai selon les différentes normes :

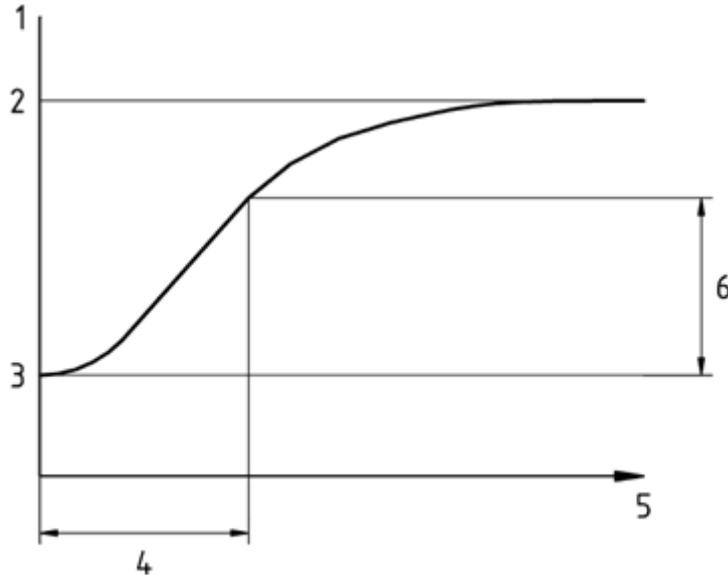
Les deux standards (standard ASHRAE et Européenne) sont presque identiques dans ce qui concerne les conditions d'essai. Il reste une légère différence sur la position du pyranomètre par rapport au capteur (l'un au milieu et l'autre au niveau le plus haut). Un ventilateur artificiel est imposé uniquement par le standard européen.

Le standard Australien propose une installation quelque peu différent des précédent, l'innovation étant le réservoir tampon et la mesure globale du paramètre ( $\dot{m}C_p$ ) tel que  $C_p = f(T)$ .

Ce dernier permet le teste des capteurs solaires à haute température (capteurs sous vide).

**D-4. Calcul de la constante du temps :**

La différence entre la température du fluide a la sortie du capteur et la température de l'air environnant ( $T-T$ ) doit faire l'objet d'une courbe établie en fonction du temps. En commençant par la condition d'état stationnaire initiale ( $t-t$ ) et en poursuivant le tracé jusqu'à l'obtention de la seconde condition d'état stationnaire a une température plus élevée ( $t-t$ )<sub>2</sub> voir figure 2



*Figure (D-3) : constante de temps du capteur*

Légende :

- 1-  $t_e - t_a$
- 2-  $(t_e - t_a)_2$
- 3-  $(t_e - t_a)_0$
- 4-  $\tau_0$
- 5- Temps
- 6-  $0.632((t_e - t_a)_2 - (t_e - t_a)_0)$

La constante du temps  $\tau_0$  du capteur est définie comme le temps écoulé entre le démarrage de la couverture et de la point où la température de sortie du capteur augmente de 63.2 % de l'augmentation totale entre  $(t_e - t_a)_0$  et  $(t_e - t_a)_2$ .

Si le temps de repense des sondes de température est significatif comparé au temps de repense mesuré du capteur, il doit alors être pris en compte dans le calcul des résultats d'essai.

## Annexe E : Article

# Tests des capteurs solaires à circulation liquide et des chauffe-eau solaires

Centre de Développement des Energies Renouvelables

Division Solaire Thermique et Géothermie

www.cder.dz

E-mail : thermique@cder.dz

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) propose son expérience et son expertise pour caractériser et évaluer les performances thermiques, mécaniques et la fiabilité des capteurs solaires thermiques plans.

Les tests respectent la norme EN 12975-2 et sont réalisables sur un banc d'essais spécialement conçu et réalisé à cet effet au niveau de la division solaire thermique et géothermie du CDER à Bouzaréah sur les hauteurs d'Alger.

Sur la plate-forme d'expérimentation, les chauffe-eau solaires individuels à thermosiphon sont installés dans l'objectif de les soumettre à des essais d'évaluation des performances thermiques, de fiabilité et de durabilité.

Les essais sur le capteur solaire à circulation de liquide sont effectués sur les bancs de tests suivants

- Banc de tests des performances thermiques, de résistance à une température élevée et aux chocs thermiques interne et externe;
- Banc de tests de pression sur l'absorbeur;
- Banc de tests d'étanchéité.

### **Banc de tests des performances thermiques, résistance à une température élevée et chocs thermique interne et externe :**

Tests des performances thermiques :

- Les tests d'évaluation des performances thermiques du capteur solaire en régime stationnaire sont réalisés à l'extérieur selon des conditions d'éclairement solaire de températures et de vent spécifiés par la norme.
- Les caractéristiques déterminées sont les suivantes:
  - La constante du temps ;
  - L'angle d'incidence modifié ;
  - Le rendement instantané ;
  - Les pertes de charges dans le capteur.

Tests de résistance à une température élevée :

- Une fois le capteur installé, pour une quelconque défaillance, celui-ci peut être vidé de son fluide caloporteur. Dans ce cas et sous l'effet des niveaux élevés de l'éclairement solaire, le niveau de stagnation peut être atteint.



**Le banc des performances thermiques, CDER, Bouzaréah - Alger**

- Cet essai a pour objectif de déterminer la capacité du capteur à résister à des niveaux élevés de températures présentant une proportionnalité avec les éclairagements solaires correspondants sans présenter de défaillances.
- L'essai est réalisé pendant une heure au minimum selon les conditions environnementales spécifiées par la norme.

### **Banc de tests de pression sur l'absorbeur**

- Le test de pression a pour objectif d'évaluer le niveau potentiel de pressions de service auxquelles le capteur peut résister.
- Le banc d'essai est composé essentiellement de sources de pression hydraulique et pneumatique, d'équipements de sécurité et surtout de sondes de pression.
- Le test consiste à maintenir pendant 15 minutes le radiateur sous des niveaux de pressions ascendant jusqu'à atteindre 1,5 fois la pression de service spécifiée par le fabricant.
- Après le test le capteur doit faire l'objet d'un contrôle afin de déterminer la moindre fuite ou déformation.



***Le banc de mise sous pression du capteur solaire, CDER - Alger***

### **Banc de tests d'étanchéité du capteur**

- Le banc d'essais étanchéité a été réalisé selon la norme EN 12975 et consiste à asperger sur toutes ses faces le capteur pendant 4 heures pour une température et un débit spécifiés par la norme.
- Ce banc a pour objectif d'évaluer les performances du capteur en matière d'aptitude à résister à une quelconque pénétration de la pluie.
- Une inspection après le test, permet de déterminer s'il y'a une pénétration d'eau qui se manifeste par une condensation d'eau apparente sur la face intérieure du vitrage.



***Le banc de tests d'étanchéité du capteur solaire, CDER, Bouzaréah – Alger***