

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Université Abou Bekr Belkaid
Tlemcen Algérie



جامعة أبي بكر بلقايد

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abou Bekr Belkaid - Tlemcen
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire pour l'Obtention du Diplôme de Master en Génie Mécanique
Spécialité : Génie thermique et énergies renouvelables

Thème :

ETUDE ET REALISATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN A EAU

Présenté par :

Bouguima Adel Abdelhadi
Abbou Kamel

Devant le Jury composé de :

Mr. M.A Ghernaout
Mr . B Rostan
Mr . K Benmansour
Mr . K Aliane
Mr . M Henaoui

Président
Examineur
Examineur
Encadreur
Co-encadreur

Année universitaire
2014-2015

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail en guise de respect et de reconnaissances à :

♥ Mes très chers parents, en témoignage et en gratitude de leur soutien permanent durant toutes mes années d'études leurs sacrifices illimités, leur réconfort moral et tous les efforts qu'ils ont consentis pour mon instruction et pour me voir réussir un jour, sans oublier ma grande mère.

.....que DIEU me les garde.....

♥ Mon frère et ma sœur pour leurs aides et leur soutien morale pendant toute l'année.

♥ Mes cousines AMINA et INAAM, mes tantes et leur maris pour leur réconfort et leur soutien.

♥ Mon cousin Zakaria et mes deux oncles avec leurs fils et filles et la famille DJENNATI et la famille BOUGUIMA.

♥ Une pensée particulière à mes très chères amis et frères, HADJADJ AOUEL MOHAMED et HAKEM ABDELKRIM, qui n'ont pas cessés de me rapporter un quelconque soutien dans la vie de tous les jours. Je demande DIEU de les bénir car ils sont précieux pour moi.

♥ Et sans oublier tous mes camarades de classe la promotion M2 GTER 2015 et M^r BENSOUNA RACHID d'être toujours là pour moi, et Mr Brahim 505.

♥ Mon binôme ABBOU KAMEL.

BOUGUIMA ADEL ABDELHADI.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse ; qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite, à me donner l'aide et à me réussite, à ma mère.

- ♥ A mon père, qui a été mon ombre durant toutes les années d'étude, et qui a veillé tout au long de ma vie à me donner l'aide et me protéger.

.....que DIEU me les garde.....

- ♥ A tous les autres membres de ma famille, plus particulièrement à mes frères Abdelhalim, Abdelhakim, Ahmed, Youcef et leurs femmes et leurs enfants avec une grande pensée à mon frère Djamel, à tous mes cousins (zaki, kamel, hmidouch, Rafik el maknin) et toute la famille ABBOU et la famille BEKKOUCH

A tous mes amies avec qui j'ai eu la chance de partager des moments uniques et formidables qui seront gravés à jamais dans ma mémoire

- ♥ Une pensée particulière à mes très chères amis et frères, BELAIDOUNI MOHAMED et HAROUAT RACHAD, qui n'ont pas cessés de me rapporter un quelconque soutien dans la vie de tous les jours. Je demande DIEU de les bénir car ils sont précieux pour moi.
- ♥ Et sans oublier tous mes camarades de classe la promotion M2 GTER 2015 et M^r BENSOUNA RACHID d'être toujours là pour moi, et Mr Brahim 505.
- ♥ Mon binôme BOUGUIMA ADEL.

ABBOU KAMEL.

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon DIEU, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons toutes nos profondes reconnaissances à notre cher encadreur Mr. ALIANE KHALED et Mr HENAOUI Mustapha pour le temps qu'ils nous ont accordé, de leurs confiance et leurs orientations efficace durant l'évolution de ce travail.

Egalement, nous sommes très honorés que Monsieur GHERNAOUT MOHAMED AMINE, ait accepté de juger et d'assurer la présidence du jury. Qu'il trouve ici le témoignage de notre reconnaissance et de notre respectueuse gratitude.

Nos remerciements, s'adressent aussi aux membres du jury M^r BENMANSOUR KARIM et Mr. ROSTANE BRAHIM, qui nous font l'honneur d'accepter d'examiner ce travail.

Nous tenons à remercier tous nos enseignants qui nous ont assuré tout notre cursus, ainsi que les responsables de l'administration du département génie mécanique.

Ainsi, un grand et spécial remerciement à M^r AMARA SOFIANE, qui grâce à lui, nous avons pu finaliser ce travail.

A mes très chers camarades SEBAA REDA et RACHEDI FETHALLAH qui n'ont pas cessés d'être à nos cotées.

Enfin nous remercions également tous ceux qui ont de loin ou de près contribué à finaliser ce modeste travail, parmi eux les étudiants de Maser1 GTER en particulier: DERRICHE Rafika Imane, DJELLOULI Nacera, MAHI Rami Hamza, BENTAALLAH Mohamed.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire	
I-Introduction.....	3
I-1-Le potentiel solaire en Algérie	3
I-1-1-Présentation du soleil.....	5
I-1-2-Le système terre-soleil.....	7
I-2-Types d'énergies renouvelables	8
I-2-1-Énergie éolienne	8
I-2-2-Énergie hydraulique.....	10
I-2-3-Énergie géothermique.....	12
I-2-4-Énergie Biomasse	14
I-2-5-Énergie solaire	16
I-3- Les différents types de capteurs solaires.....	17
I-3-1-Les capteurs thermiques	17
I-3-2- capteur solaire photovoltaïque.....	25
I-4- conclusion.....	27
Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan	
II-1-Introduction.....	28
II-2-Description d'une installation thermique.....	28
II-2-1-L'échangeur de chaleur et la tuyauterie isolée	29
II-2-2-Le réservoir de stockage d'eau chaude.....	30
II-2-3-Principe de fonctionnement d'un capteur solaire a eau	30

II-3-Différent modes de transfert de chaleur dans un capteur solaire thermique plan.....	31
II-3-1 Notions sur la conduction thermique.....	31
II-3-2-notion sur la convection thermique	33
II-3-3-Notion sur le rayonnement	34
II-3-4-Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide	35
• Corps noir (le tube du capteur).....	36
II-4- Modélisation du chauffe-eau solaire.....	36
II-4-1-Détermination des facteurs FR ($\tau\alpha$) et (Ug)	36
II-5-Le Rendement du capteur thermique plan	39
II-6-Orientation et Inclinaison d'un capteur :	40
II-7-Loi de conservation de l'énergie.....	41
Réflexion des radiation	41
II-8-Les pertes thermiques d'un capteur	42
II-8-1-Pertes thermiques vers l'avant du capteur.....	45
II-8-2-Pertes thermiques vers l'arrière d'un capteur.....	46
II-8-3-Pertes thermiques vers les côtés d'un capteur	46
II-9-Cas de pertes de charge.....	46
II-9-1-Les pertes de charge linéaires.....	47
II-9-2-Les pertes de charge singulière	47
Bilan thermique d'un capteur solaire.....	48
II-10-Conclusion	49

Chapitre III : Etude expérimentale du capteur solaire

III-Introduction :.....	50
III-1-Description du dispositif expérimental :	50
III-1 Les composants du capteur :.....	51
III-1-1 Une couverture transparente :	51
III-1-2- Une plaque absorbante :.....	53
Caractéristiques de l'aluminium :	54
III-1-3- L'échangeur :	55
Caractéristiques du cuivre :.....	55
III-1-4- L'isolation :.....	56
III-1-5-le boîtier :	57
III-1-6-Le support en acier :.....	57
III-3-Instrumentation du capteur :.....	61
III-3-1-Mesure de l'éclairement :.....	61
III-3-2-Mesure des températures :	61
III-4-Les différents paramètres d'un capteur	65
III-4-1-Paramètres externes :	65
III-4-2-Paramètres internes :.....	65
III-4-3-Paramètres de fonctionnement :.....	65
III-5-Déroulement des expériences :.....	65
III-6-Résultats et interprétation :.....	66
III-6-1-Les pertes vers l'avant	67

III-6-2- Les pertes vers l'arrière:.....	68
III-6-3- Les pertes vers les côtés:.....	68

Nomenclature

ϕ	Latitude d'un lieu	$^{\circ}$
δ	La déclinaison	$^{\circ}$
I_0	La constante solaire	$W.m^{-2}$
I_c	L'irradiation solaire	w/m^2
A	La surface de captation du système	m^2
dQ	énergie élémentaire	Joul
λ	Conductivité thermique du matériau en	$W.m^{-1}K^{-1}$
S	Section en	m^2
dt	temps élémentaire en	S
$\frac{dT}{dx}$	gradient de température en x en	$K.m^{-1}$
φ	la densité de chaleur en	W/m^2
ξ	L'épaisseur de la couche	m
h	Coefficient de convection en	$w.m^{-2}K^{-1}$
α	Absorptivité moyenne	
ρ	Réflectivité moyenne	
τ	Transmissivité moyenne	
Q_u	L'énergie utile récupérée	w
A_g	Surface de la glasse en	m^2
$\tau\alpha$	Le rendement optique	
I_g	L'irradiation globale	w/m^2
U_g	Les pertes globales	w/m^2K
\dot{m}	Le débit massique dans le serpentin	g/l
η	Le rendement instantané du capteur	
C_p	La chaleur spécifique de l'eau	Kj/KgK
F'	fonction de la qualité du transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide	
T_a	température de l'air ambiant	K

T_m	température moyenne du fluide caloporteur	K
G	rayonnement solaire globale	W/m ²
λ_{cond}	Conductivité thermique du tube en cuivre	w/mK
N_u	Le nombre du Nusselt	
Re	Le nombre de Reynolds	
L_{is}	c'est la largeur de l'isolant	m
λ_{is}	la conductivité thermique de l'isolant	w/m K
N	Nombre de vitrage	
h_w	le coefficient de transfert due au vent	w/m K

Abreviations :

CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelable
URER/MS	Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien
EnR	Energies renouvelables

Liste des figures

Chapitre I : Généralité sur l'énergie solaire

<i>Fig I.1 : les zones les plus chaudes au nord de l'Afrique</i>	<i>5</i>
<i>Fig I.2: Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons.....</i>	<i>8</i>
<i>Fig I.3 : Un champ d'éoliennes.....</i>	<i>10</i>
<i>Fig I.4 : schéma de production d'électricité par l'hydraulique</i>	<i>12</i>
<i>Fig I.5 : la répartition de la température dans le globe terrestre</i>	<i>14</i>
<i>Fig I.6 : Un schéma Illustrant la biomasse.....</i>	<i>16</i>
<i>Fig I.7 : Schéma montrant le fonctionnement des panneaux thermiques</i>	<i>18</i>
<i>Fig I.8 : Des panneaux thermiques cylindro-parabolique.....</i>	<i>20</i>
<i>Fig I.9: capteur thermique sans vitrage.....</i>	<i>22</i>
<i>Fig I.10 : Un capteur thermique plan vitré.....</i>	<i>23</i>
<i>Fig I.11: Un capteur thermique sous vide</i>	<i>24</i>
<i>Fig I.12 : Un réseau électrique photovoltaïque</i>	<i>27</i>

Chapitre II : Etude théorique d'un capteur solaire plan

<i>Fig II.1 :les éléments d'une installation solaire thermique.....</i>	<i>29</i>
<i>Fig II.2 : Propagation de la température dans un milieu cylindrique.....</i>	<i>32</i>
<i>Fig II.3 : schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide.....</i>	<i>35</i>
<i>Fig II.5 : Analogie électrique des pertes thermiques vers l'ambiance.....</i>	<i>37</i>
<i>Fig II.6 : rendement du capteur en régime STATIQUE pour $G=1000 \text{ W/m}^2$</i>	<i>40</i>
<i>Fig II.7: Schéma montrant l'inclinaison du capteur.....</i>	<i>41</i>
<i>Fig II.8: Reflex ion des radiations</i>	<i>42</i>
<i>Fig II.9: Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré</i>	<i>43</i>

Chapitre III : Etude expérimentale du capteur solaire

<i>Fig III.1 : Atelier de mécanique où le capteur solaire a été réalisé.....</i>	<i>50</i>
<i>Fig III.2 : photographie du capteur avec vitrage</i>	<i>51</i>
<i>Fig III.3 : photographie montrant la vitre</i>	<i>52</i>
<i>Fig III.4 : joint d'étanchéité utilisé entre la vitre et le cadre</i>	<i>53</i>
<i>Fif III.5 : les plaques en aluminium sans peinture(a) et avec peinture (b)</i>	<i>54</i>
<i>Fig III.6 : Réalisation de l'échangeur.....</i>	<i>55</i>
<i>Fig III.7 : l'échangeur peint en noir</i>	<i>56</i>
<i>Fig III.8 : l'emplacement de l'isolant</i>	<i>56</i>
<i>Fig III.9 : Le boîtier en bois.....</i>	<i>57</i>
<i>Fig III.10 : les étapes de fabrication du support</i>	<i>58</i>
<i>Fig III.11.A : Circuit hydraulique.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig III.11.B : pompe centrifuge utilisée.....</i>	<i>60</i>
<i>Fig III.12 : photographie du solarimètre.....</i>	<i>61</i>
<i>Fig III.13 : photographie d'un thermocouple Type K</i>	<i>62</i>
<i>Fig III.14.A : l'emplacement des thermocouples</i>	<i>62</i>
<i>Fig III.14.B : Perçage de l'échangeur</i>	<i>63</i>
<i>Fig III.15 : Photographies du tube lors de la colle des thermocouples</i>	<i>63</i>
<i>Fig III.16 : Le thermomètre type TESTO</i>	<i>64</i>
<i>Fig III.17 : évolution de la température au cours du temps</i>	<i>71</i>
<i>fig III.18 : Evolution de la température de l'entrée jusqu'au milieu du capteur .</i>	<i>72</i>
<i>fig III.19 : l'évolution de la température du milieu jusqu'à la sortie du capteur</i>	<i>74</i>

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie solaire reçue par la terre vaut, en chiffres ronds, environ 10.000 fois la quantité totale d'énergie consommée par l'ensemble de l'humanité. En d'autres termes, capter 0,01% de cette énergie nous permettrait de nous passer de pétrole, de gaz, de charbon et d'uranium.

En Algérie bien que les conditions (géographiques, climatiques et météorologiques) soient très favorables, l'énergie solaire n'a pas encore percé et ce marché demeure encore presque vierge.

Notre pays a un des gisements solaires des plus élevés au monde, en effet de par sa position géographique dispose de plus de 2500 heures d'ensoleillement en moyenne par an sur une très grande partie de son territoire, se pendant l'Algérie a lancer le plan national solaire qui a pour objectif de développer la technique du solaire notamment installer des chauffe-eau solaire. Toute une série d'actions est prisent pour développer l'utilisation du solaire pour la production d'eau chaude sanitaire dans le logement collectif et le chauffage des piscines.[1]

L'objectif de notre travail est de faire une étude et une réalisation d'un capteur solaire thermique à eau pour pouvoir déterminer ces performances thermiques notamment sa conductance globale et voir son indépendance au fonctionnement, sa puissance et son rendement et comment varient ces derniers en fonction de l'irradiation solaire et vis-à-vis des déperditions qui doivent suivre cette irradiation.

Le présent travail est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre contient une brève présentation sur le gisement solaire Algérien plus des généralités sur les énergies renouvelables, les différents types des capteurs thermiques et leurs caractéristiques.

le deuxième chapitre est consacré à la partie théorique d'un capteur thermique a eau en mentionnant les calculs du bilan thermique, les pertes thermiques, les pertes de charge dans la canalisation, la puissance et le rendement.

Le dernier chapitre contient deux parties, dont la première est consacrée aux différentes étapes de la réalisation du capteur. La seconde expose la partie expérimentale qui enveloppe les essais menés sur le capteur, suivie d'une présentation et dépouillement des résultats obtenus.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie solaire

I-Introduction

Dans ce chapitre nous allons voir les différents types d'énergies renouvelables et leurs diverses utilisations dans les différents niveaux (industriels et particuliers). Et nous allons nous intéresser plus spécialement sur l'énergie solaire thermique et les différents capteurs solaires thermiques et photovoltaïques et leurs performances

I-1-Le potentiel solaire en Algérie

Dans leurs étude, N. Yamani et al. ont indiqué que Le potentiel solaire algérien figure parmi l'un des plus importants au monde [2]. Il résulte de cette étude que plus de 2.000.000 km² du pays reçoivent un ensoleillement de l'ordre de 2500 kwh/m²/an. L'exploitation de ce potentiel solaire permettra de compléter les programmes d'électrification rurale, est-il précisé.

Le taux d'électrification de notre pays est aujourd'hui de 95 %, l'utilisation des énergies renouvelables permettra d'atteindre, en particulier, les régions isolées et très éloignées du réseau électrique national.

On désigne par "solaire thermodynamique" l'ensemble des techniques qui visent à transformer l'énergie rayonnée par le soleil en chaleur à température élevée, puis celle-ci en énergie mécanique (et électrique) à travers un cycle thermodynamique.

Les technologies solaires à concentration permettent, quant à elles, de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et 2000°C, avec un rendement supérieur à 70 %.

Le document retient que cette chaleur primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie

en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène. Ces techniques sont encore, pour l'essentiel, à un état expérimental.

La même source a souligné que "la centrale solaire à tour est constituée de nombreux miroirs concentrant les rayons solaires vers un récepteur situé au sommet d'une tour" et d'ajouter que l'avantage de la tour solaire par rapport aux capteurs cylindro-paraboliques est que les pertes à l'ambiance sont inférieures car la surface exposée est limitée. Les miroirs uniformément répartis sont appelés héliostats. Chaque héliostat traque le soleil individuellement et le réfléchit en direction d'un récepteur au sommet de la tour solaire.

Les chercheurs, par ailleurs, font savoir que "ce travail consiste à étudier et simuler les performances de deux types de ces centrales pour le site de Tamanrasset : une centrale utilisant un récepteur à air".

Selon eux les centrales solaires à concentration sont d'excellentes alternatives aux centrales conventionnelles surtout dans les pays qui se situent dans la ceinture solaire. Parmi ces centrales solaires, il y a les centrales à tour qui ont montré leur capacité.

Dans cette étude les chercheurs proposent la simulation d'une centrale solaire à tour avec deux configurations de récepteur : une avec un récepteur à air, l'autre avec un récepteur à eau.

La centrale solaire peut être divisée en deux sous-systèmes : le champ solaire et le cycle de puissance (cycle de Rankine). Un modèle numérique du champ solaire et du cycle de puissance a été établi en utilisant la bibliothèque STEC sous le logiciel TRNSYS.

"Le site qui a été retenu pour la simulation est celui de Tamanrasset situé dans l'extrême sud algérien" a ajouté l'étude Pour transformer le rayonnement solaire en chaleur, il suffit en principe de le réceptionner sur un absorbeur, mais un tel capteur même s'il est parfaitement absorbant est sujet à des pertes. Ces pertes sont en première approximation proportionnelles à son propre échauffement et à la surface développée, [2].

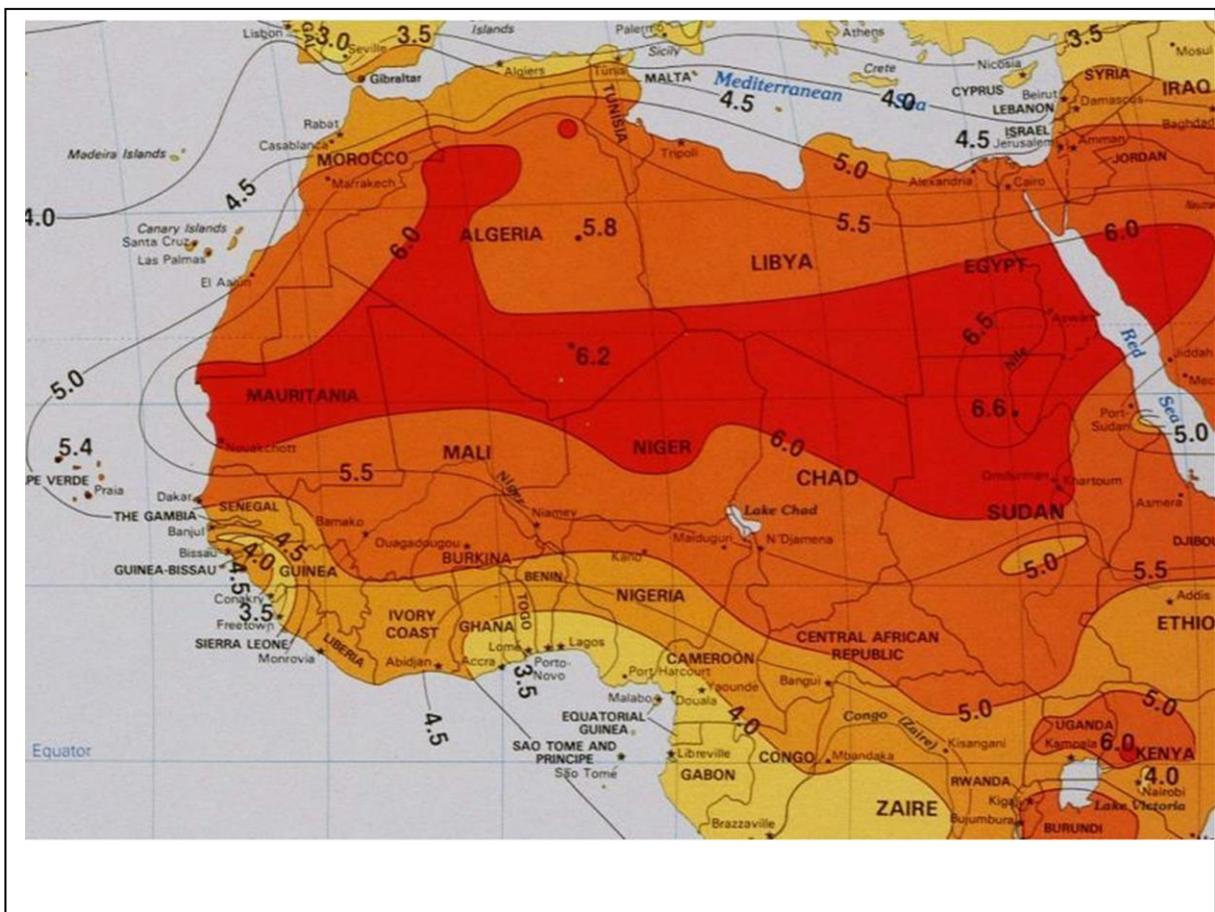


Fig I.1 : les zones les plus chaudes au nord de l'Afrique

I-1-1-Présentation du soleil

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de

19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil.

Le soleil n'est pas une sphère homogène, il est constitué de :

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, elle présente les caractéristiques suivantes :

- Une température de 15.106 °C.

- Une densité est de 1015 kg/m³.

- Une pression de 109 ATM.

- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes :

- Une épaisseur de 244160 km.

- Une température variant de 10.106 °C à 50.104 °C.

- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection Turbulente, elle présente les propriétés suivantes

- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.

- Une épaisseur de 500 km.

- Une pression de 1/100 ATM.

- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmentant de 4200 °C à 104 °C.
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont :
 - Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 106 °C à 2.106°C.

I-1-2-Le système terre-soleil

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint environ 1.4 million de km.

La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil Occupe l'un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation De $\pm 1.7\%$.

La terre traverse le grand axe de l'ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de 0.5°.

L'axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de 23° 27' par rapport au plan de l'écliptique (plan de l'orbite terrestre). On appelle déclinaison l'angle forme par l'axe terre soleil, avec le plan de l'équateur a un moment donne de l'année. La déclinaison 'd' vaut donc

+ 23°27' au solstice d'été, – 23°27' au solstice d'hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans

L'approximation d'une trajectoire circulaire, la déclinaison s'écrit, pour chaque jour de

L'année : $\sin \delta = 0.4 \sin t$

Où : t désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l'équinoxe de printemps pour Origine.

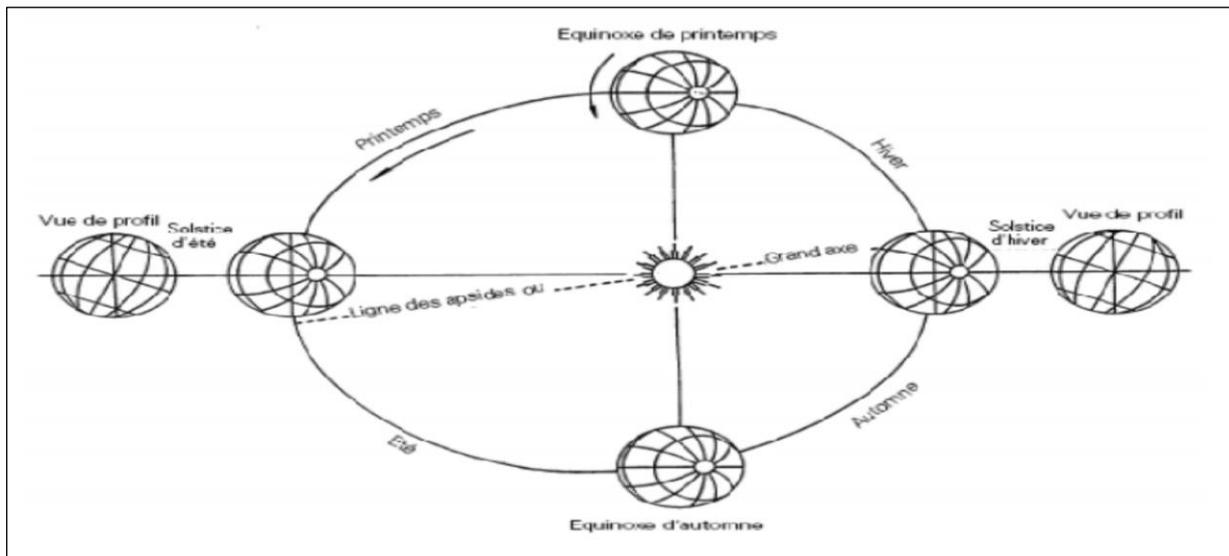


Fig I.2: Plan de l'écliptique L'orbite terrestre et les saisons

I-2-Types d'énergies renouvelables

Les **énergies renouvelables (EnR)** en abrégé) sont des sources d'énergies dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. L'expression *énergie renouvelable* est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique

I-2-1-Énergie éolienne [3]

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masses d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masses d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique.

Des voiliers ont été utilisés dès l'Antiquité, comme en témoigne la Barque solaire de Khéops. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, l'essentiel des déplacements nautiques à moyenne et longue distance se sont faits grâce à la force du vent. Un dérivé terrestre n'ayant d'usage que sportif a été rendu possible par les techniques modernes : le char à voile.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile, comme ceux que l'on peut voir aux Pays-Bas ou encore ceux mentionnés dans *Don Quichotte*. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les moulins des Pays-Bas actionnent directement des pompes dont le but est d'assécher ou de maintenir secs les polders du pays. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains.

Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisée sur place (site isolé de réseau de distribution). Pour résoudre le problème d'espace, elles sont de plus en plus souvent placées en mer : voir éolienne offshore.

L'éolien se développe également à l'échelle individuelle. Le petit éolien est généralement utilisé pour produire de l'électricité qui sera consommée directement sur place. De nombreux problèmes sont apparus pour des éoliennes installées en zones bâties sans étude préalable sérieuse sur les vitesses de vent et les turbulences. L'Association Française des Professionnels du Petit Éolien (AFPPE) déconseille les installations sur les sites improductifs trop turbulents, en pignon ou en toiture.

Des concepts d'éolienne aéroportée sont à l'étude pour aller chercher les vents d'altitude, plus puissants, plus réguliers : Magenn, et Skywindpower conçus pour

s'élever à 300 m, 1 200 m ou 5 000 m avec l'espoir de produire jusqu'à 100 fois plus d'électricité qu'une éolienne actuelle. [3]



Fig I.3 : Un champ d'éoliennes

I-2-2-Énergie hydraulique

À l'instar de l'énergie éolienne, les énergies hydrauliques (à l'exception de l'énergie marémotrice) ont leur origine principale dans les phénomènes météorologiques et donc l'énergie solaire. Le soleil provoque l'évaporation de l'eau, principalement dans les océans et en libère une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements. L'eau (en fait, la vapeur d'eau) possède, en altitude, une énergie potentielle de pesanteur ; cette énergie peut être captée et transformée dans des barrages hydroélectriques, lors du retour de l'eau vers les océans. Avant l'avènement de l'électricité, les moulins à eau permettaient de capter cette énergie mécanique pour entraîner des machines ou des outils (machines à tisser, moulins à moudre le blé...).

Depuis l'invention de l'électricité cette énergie mécanique est transformée en énergie électrique ; l'hydroélectricité est après la biomasse la deuxième énergie

renouvelable : selon l'Agence internationale de l'énergie, elle fournit 2,3 % de l'énergie primaire produite dans le monde en 2011, sur un total de 13,3 % d'énergies renouvelables.

D'autres énergies hydrauliques existent et proviennent généralement de sources marines :

- Énergie des vagues : elle est produite par le mouvement des vagues et peut être captée par des dispositifs tels le Pélamis, sorte de ver en métal articulé, Leur puissance correspond à celle d'une petite éolienne.
- Énergie marémotrice : elle est produite par le mouvement de l'eau créé par les marées (variations du niveau de la mer, courants de marée),
- Énergie hydrolienne : elle est issue de l'utilisation des courants sous-marins.
- Énergie thermique des mers : elle est produite en exploitant la différence de température entre les eaux superficielles et les eaux profondes des océans,
- Énergie osmotique : elle a pour origine la diffusion ionique qui a lieu lors de l'arrivée et du mélange d'eau douce dans l'eau salée de la mer. L'idée remonte aux années 1970, elle consiste à tirer parti du phénomène d'osmose qui se produit lors du mélange d'eau de mer et d'eau douce (grâce à leur salinité différente). La première centrale osmotique a été ouverte en 2009 à Hurum en Norvège par la société Statkraft à l'embouchure du Fjord d'Oslo au bord de la Mer du Nord. Il s'agit encore d'un prototype de 3 kW destiné à tester la fiabilité du processus et à en améliorer le rendement, mais l'objectif est d'atteindre 25 MW en 2015. Depuis, une centrale a été construite au Japon, et une autre est en construction aux États-Unis. D'après Statkraft, le potentiel technique

mondial de l'énergie osmotique serait de 1 600 TWh par an, soit 50 % de la production électrique de l'Union Européenne.[3]

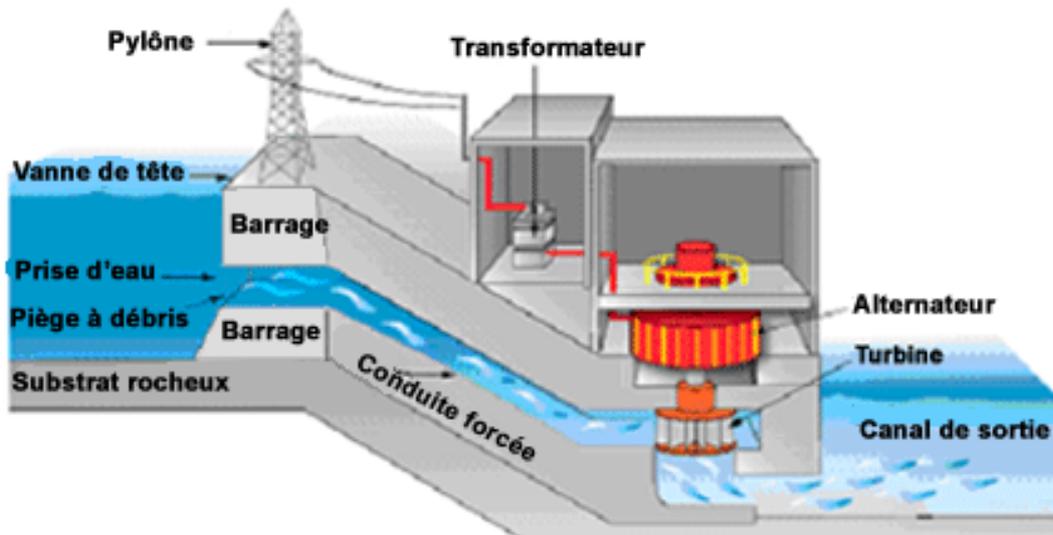


Fig I.4 : schéma de production d'électricité par l'hydraulique

I-2-3-Énergie géothermique

Un des témoignages les plus anciens date de 2 000 ans avant Jésus-Christ, avec dans les îles Lipari (Italie) l'exploitation d'eau naturellement chaude pour les thermes.

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches du noyau et de la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent).

En 2012, les trois premiers producteurs sont les États-Unis (27,9 %), les Philippines (14,6 %) et l'Indonésie (11,2 %) et quatre autres pays ont une production importante : la Nouvelle-Zélande, le Mexique, l'Italie et l'Islande. L'Indonésie possède le plus grand potentiel (27 gigawatts, soit 40 % des réserves mondiales).

Pour autant le géothermique comporte lui aussi des risques au niveau humain. Les techniques évoluent et permettent de chercher la chaleur à de plus grandes profondeurs. Il a été montré que la modification des pressions dans les sous-sols avait un impact sur l'activité sismique. La fréquence des tremblements de terre mais aussi leur puissance peut être augmentée à cause de l'exploitation de cette énergie.

La géothermie très basse énergie exploite la chaleur de la couche superficielle du sol, qui provient non pas des profondeurs de la croûte terrestre, mais du soleil et du ruissellement de l'eau de pluie ; elle est utilisée pour :

- la climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal, le puits canadien, etc....
- le chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique, qui se développe en particulier en Allemagne, en Suède et en France ; ces pompes à chaleur sont considérées comme exploitant une énergie partiellement renouvelable car une grande partie de l'énergie qu'elles fournissent provient de l'énergie solaire emmagasinée chaque été dans la terre par le soleil, et comme des systèmes efficaces de production de chaleur car elles assurent une production d'énergie thermique très supérieure à l'énergie électrique consommée.

En France, la programmation pluriannuelle des investissements de production de chaleur a fixé des objectifs très ambitieux pour la géothermie : une

multiplication par 6 de la production de chaleur à partir de géothermie entre 2006 et 2020.[3]

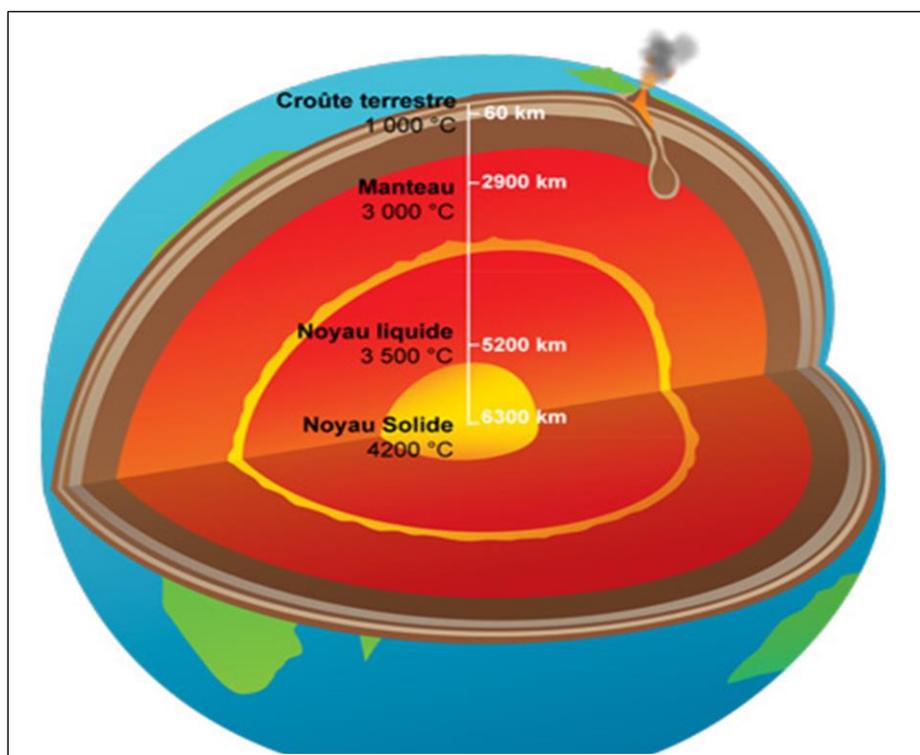


Fig I.5 : la répartition de la température dans le globe terrestre

I-2-4-Énergie Biomasse

Indirectement, il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion ou métabolisation. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le bois et les biocarburants.

Jusqu'au XVIII^e siècle, la biomasse était la principale ressource énergétique utilisée par l'humanité, en particulier sous forme de bois ; c'est encore aujourd'hui, et de loin, la principale énergie renouvelable : selon l'Agence

internationale de l'énergie, la biomasse et les déchets fournissent 10 % de l'énergie primaire produite dans le monde, sur 13,3 % d'énergies renouvelables. Mais cette ressource produit de nombreux polluants et a l'inconvénient majeur d'exiger des surfaces considérables pour sa production, du fait de la faible efficacité énergétique de la photosynthèse : 3 à 6 % contre, par exemple, 14 à 16 % pour une cellule photovoltaïque en silicium monocristallin ; et surtout, sa production sous forme d'agro carburant entre en conflit avec la production vivrière ; l'utilisation énergétique de la biomasse restera donc toujours limitée par ces multiples contraintes.

Des cyanobactéries modifiées pourraient convertir de l'énergie solaire en carburant et consommer du CO₂. Cette technique et l'utilisation de ce carburant équilibreraient la production et la consommation de CO₂. Par génie génétique, une entreprise a créé et améliore peu à peu cette technique.

Une équipe de recherche de l'université Stanford a montré que la production d'électricité à partir de la biomasse serait plus rentable économiquement et écologiquement que leur transformation et leur utilisation dans les transports en tant que bio-carburant. Pour ce faire, Elliott Campbell et ses collègues ont comparé l'impact et le rendement de la production de l'électricité et de l'éthanol, de leur utilisation mais aussi du cycle de vie des voitures électriques et à moteur thermique. D'après eux, l'option électrique émet deux fois moins de CO₂ que l'option bio carburant et 1 hectare de culture permet de parcourir 52 000 km à l'électricité contre 31 000 km à l'éthanol. Pourtant ce constat ne rassure en rien sur les problèmes d'utilisation des sols et d'alimentation mondiale, [3].

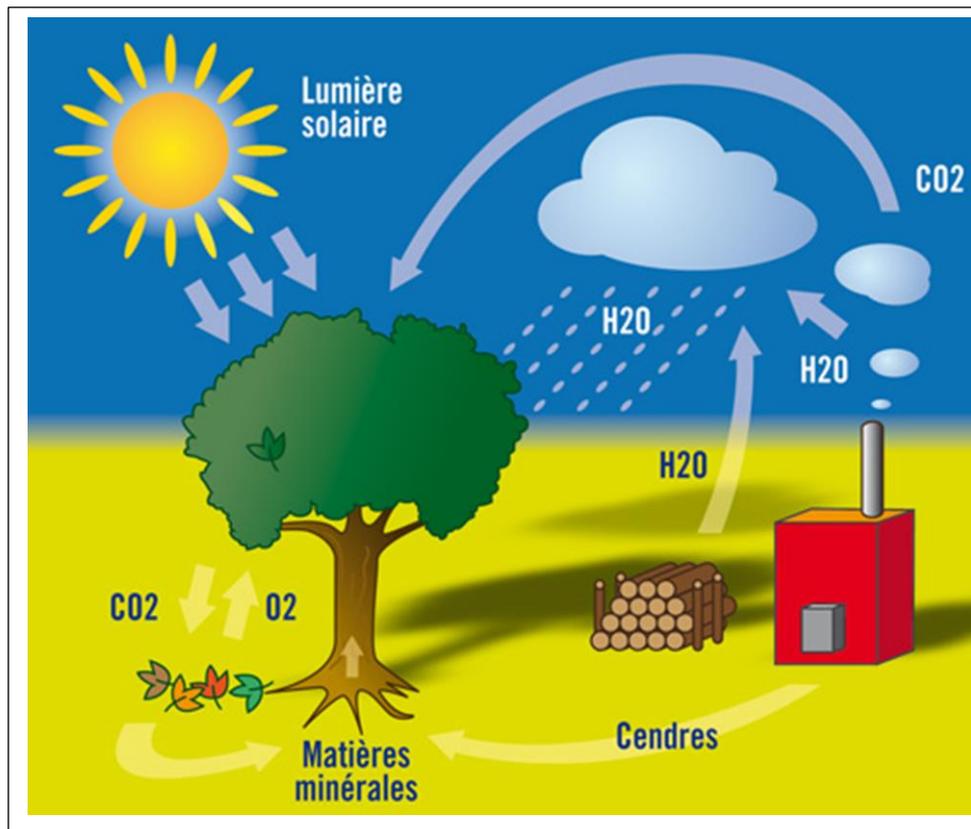


Fig I.6 : Un schéma Illustrant la biomasse

I-2-5-Énergie solaire

Elle est renouvelable et écologique, elle peut être exploitée pratiquement partout sur la planète, contrairement aux combustibles fossiles, et elle n'est pas à la merci des hausses des prix de l'énergie. Elle est polyvalente, et produit de la chaleur, la lumière, l'énergie mécanique et l'électricité.

L'énergie solaire est l'énergie radiante produit par le soleil par réactions nucléaires de fusion, qu'arrive à la Terre à travers de l'espace en Quant d'énergie (Photons), ceux qui réagissent avec l'atmosphère et la surface terrestre. Mais l'intensité de l'énergie réellement disponible dans la surface terrestre est plus faible que celle qui arrive à l'extérieur de l'atmosphère, par l'absorption et la dispersion produit par l'interaction entre photons et l'atmosphère.

L'intensité d'énergie dans un point déterminé est fonction, d'une façon un peu prévisible, du jour de l'année, de l'heure, de la latitude, et en plus pour notre cas concret de l'orientation du dispositif récepteur, entre autre.

Une donnée intéressante est que pendant un an, le soleil émettra sur la surface terrestre quatre mille fois plus d'énergie de celle qu'on consommera. Le soleil émet sur La Terre pendant une heure la même quantité d'énergie que l'humanité consomme pendant un an.

Pour l'énergie solaire il faut profiter de la radiation pour l'obtention d'énergie directe sous forme de chaleur, ou par conversion en électricité.

Celle qui est utilisé sous forme de chaleur est l'énergie solaire thermique, il s'agit de bien profiter la radiation du soleil pour la production d'eau chaude, pour la consommation domestique ou industrielle, climatisation des piscines, chauffage des maisons, hôtels, écoles, usines, etc.

L'autre est l'énergie solaire photovoltaïque, il s'agit de transformer en électricité la radiation solaire par le biais de cellules photovoltaïques ou plaques solaires, [3].

I-3- Les différents types de capteurs solaires

I-3-1-Les capteurs thermiques

Principe des panneaux solaires thermiques

Le solaire thermique actif permet de récupérer la chaleur du rayonnement solaire au sein d'un fluide, parfois de l'air, le plus souvent de l'eau, par la mise en œuvre de capteurs solaires. Ces techniques peuvent assurer la production d'eau chaude sanitaire ou d'eau distillée, le chauffage des piscines et des habitations ainsi que le séchage de céréales, par exemple. Un capteur solaire est composé des éléments suivants :

- Le corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant,
- Un système de refroidissement par le fluide caloporteur.

- Un isolant thermique (dos et côtés non exposés),
- Une couverture transparente (face avant, exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre,
- Subsidiairement un coffrage étanche à l'eau et un système de support mécanique de l'ensemble.

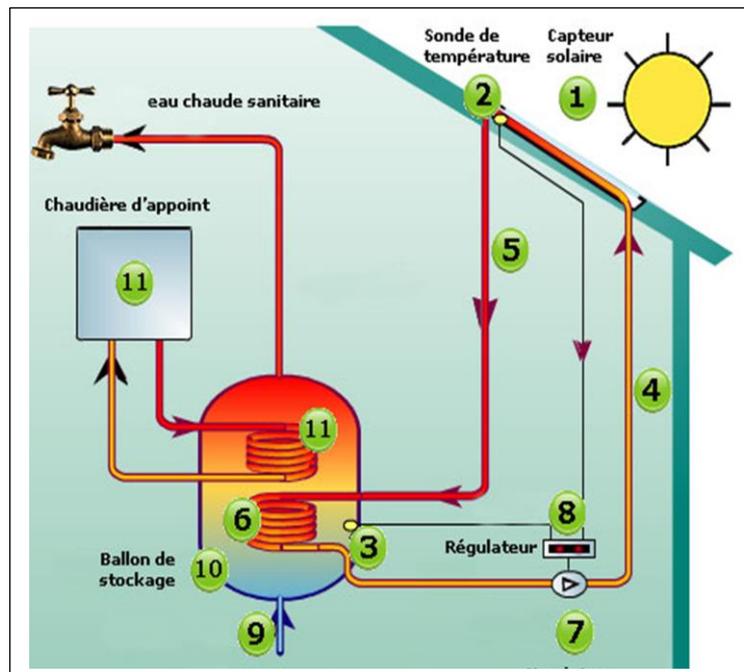


Fig I.7 : Schéma montrant le fonctionnement des panneaux thermiques

Le fonctionnement d'une installation solaire ensemble plusieurs missions :

Captage (1) de l'énergie solaire en permettant de transformer le rayonnement solaire en eau chaude.

Transfert de la chaleur des capteurs, de manière naturelle ou forcée (5) vers l'eau chaude sanitaire stockée dans le ballon (10).

Distribution de l'eau chaude (10) vers les points de consommation (6). Si la Température du ballon n'arrive pas à la Température de consigne, l'appoint (12) (Une chaudière au gaz, au fioul ou au bois ou une PAC)

I-3-1-1-Les capteurs solaires à concentration

Les systèmes solaires à concentration offrent la possibilité de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant aisément dépasser les 500 °C et le rendement de conversion est élevé généralement. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations. La majorité des systèmes utilise des miroirs de verre pour réfléchir la radiation solaire. Des recherches sont en actuellement en cours avec comme objectif d'améliorer les propriétés physiques des matériaux réflecteurs, (réflectivité, résistance aux chocs, etc.)

Un aspect très important des systèmes à concentration et que seule la radiation directe peut être mise à profit, la radiation diffuse ne pouvant pas être focalisé par le concentrateur. La centrale solaire ne peut donc fonctionner que si le ciel est dégagé et que la radiation directe n'est pas diffusée par la couverture nuageuse. L'irradiation solaire globale est constituée de l'irradiation directe et de l'irradiation diffuse. L'énergie solaire peut être utilisée pour un usage thermique direct, par exemple pour le chauffage, la cuisson, pour produire de l'électricité à partir des systèmes photovoltaïques (utilisation de l'irradiation directe et diffuse), et finalement pour produire de la chaleur puis de l'électricité à partir des systèmes thermiques à concentration. Ces derniers systèmes utilisant seulement l'irradiation directe, ils ne peuvent être installés que dans des zones fortement ensoleillées. Ainsi, un ensoleillement de 1 800 kWh/m²/an est le seuil minimum estimé nécessaire pour obtenir un rendement suffisant.

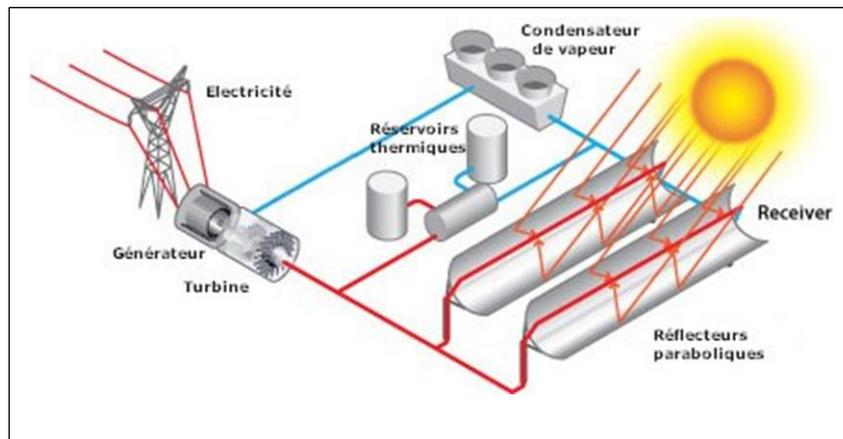


Fig I.8 : Des panneaux thermiques cylindro-parabolique

I-3-1-2-Les capteurs solaires thermiques plans[4]

On distingue 3 familles de capteurs solaires thermiques plans :

- Les capteurs plans non vitrés ou souples : simples et peu onéreux, ils sont bien adaptés pour le chauffage de l'eau d'une piscine.
- Les capteurs plans vitrés : les plus répandus aujourd'hui.
- Les capteurs sous vides : plus performants mais plus onéreux, particulièrement adaptés pour une utilisation en région froide ou qui bénéficie d'un ensoleillement moins important.

Performance

Le rendement d'un capteur solaire est caractérisé par les coefficients de conversion optique et de déperdition thermique. Il dépend aussi de l'irradiation solaire, donc influencé par l'environnement extérieur (masque solaire, orientation et inclinaison du capteur...).

Durabilité

La durée de vie des capteurs dépasse 20 ans. Cette durée de vie est conditionnée par le correct dimensionnement des équipements, la qualité de leur mise en œuvre et de leur maintenance.

Résistance

Les capteurs sont prévus pour résister à la grêle, à la foudre dans le cadre des dispositifs de protection du bâtiment, aux vents violents par l'intermédiaire de leur système d'accroche.

Choix du type de capteurs (plan ou sous vide)

Le rendement d'un capteur sous vide est supérieur à celui d'un capteur plan, pour une surface d'absorbeur égale. Dans la pratique, cet avantage est limité au captage solaire en hiver et surtout pour des climats rigoureux. Dans notre région, les facteurs à prendre en compte seront plutôt : le prix, la facilité de remplacement d'un élément, l'impact visuel des capteurs et leur capacité d'intégration au bâtiment.

Fixation et intégration

Les panneaux peuvent être fixés en surimposition (placés à même la paroi) ou en intégration (en remplacement de la paroi). Ils peuvent prendre place en toiture, en toiture-terrasse, en façade ou au sol, [4].

I-3-1-2-A- Capteurs Solaires sans vitrage

Ce sont des capteurs dont généralement, les tuyaux ou la zone de circulation du fluide correspondent à l'absorbeur du capteur. Ils sont nommés aussi : « moquette solaire » ou « tapis solaires ». Leur rendement est très petit en dehors de la période d'été quand le soleil est plus haut et donc, l'ensoleillement est plus fort. De ce fait, normalement son utilisation est plutôt consacrée à l'échauffement des piscines en été. De conception très simple et d'un coût relativement peu élevé (100 - 150 €/m², fourni et posé), ils créent un réchauffement de l'eau en la faisant circuler au travers de petits tuyaux

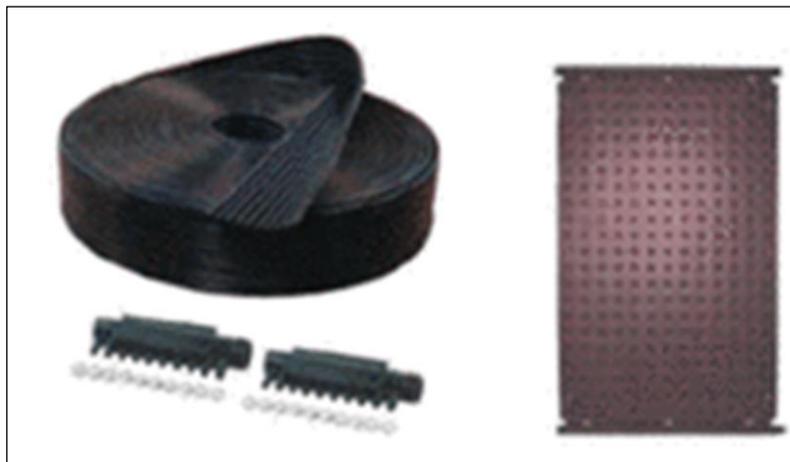


Fig 1.9: capteur thermique sans vitrage

I-3-1-2-B- Capteurs solaire plans Vitrés

Les capteurs vitrés sont équipés d'une couverture transparente qui permet de créer l'effet de serre dans lui en optimisant son rendement.

Néanmoins, le phénomène de convection qui est créé à cause de cette lame de verre, joue un rôle pénalisant dans les performances de ces capteurs.

Ils sont constitués aussi par de tubes de cuivre servant d'absorbeurs de l'énergie solaire.

Ils sont isolés sur les autres faces dans le but de réduire au minimum les déperditions. L'isolation arrière et normalement composée des laines minérales.

Il y a une version dans le groupe des capteurs vitrés qui sont équipés d'un absorbeur sélectif. Il permet de monter les performances.

Le phénomène des déperditions et les pertes intrinsèques au capteur sont de paramètres très influents sur les performances d'un capteur. La montre clairement le positionnement de leur rendement par rapport aux autres typologies. Ces types de capteurs sont les plus couramment installés.

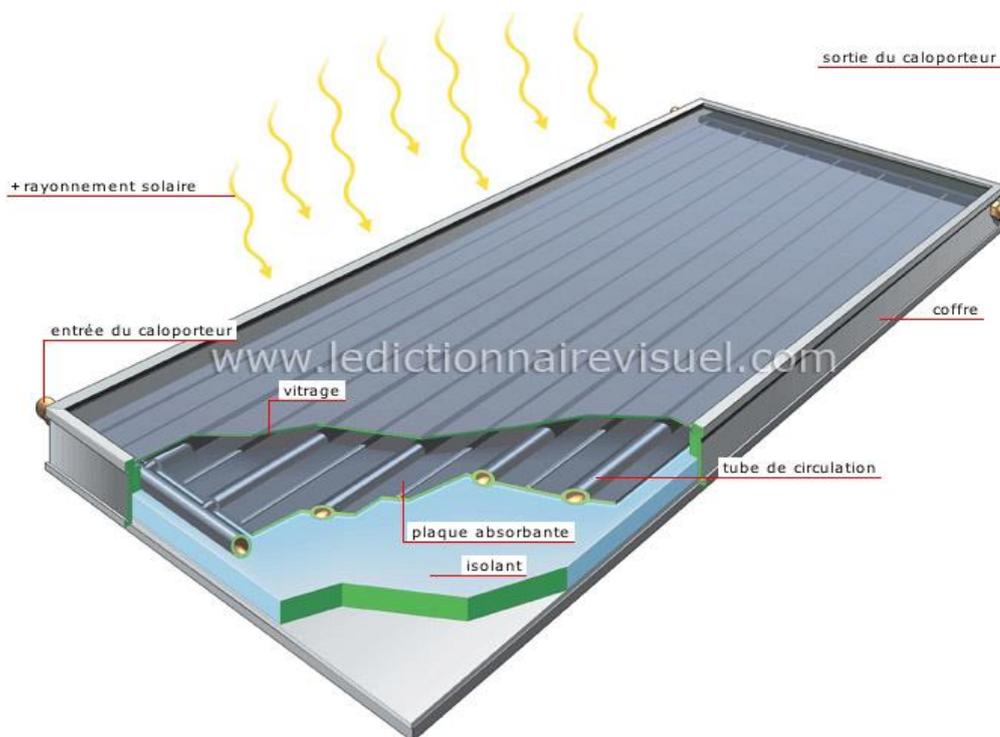


Fig I.10 : Un capteur thermique plan vitré

I-3-1-3- Capteurs solaire Sous Vide

Ce type de capteur est de plus en plus utilisé. Les capteurs sous vide permettent de réduire les pertes par convection en plaçant l'absorbeur à l'intérieur d'une enceinte en verre dans laquelle un vide d'air a été fait.

Grâce à la capacité d'isolation du vide, la maîtrise des déperditions est mieux contrôlée, ce qui permet de travailler à un niveau de températures plus élevées.

Cette performance implique de rendements plus élevés lorsqu'on veut des hautes températures. De ce fait, ces capteurs apportent une économie d'encombrement à égale contribution thermique. Les applications en collectivités, de climatisation solaire, dans le secteur résidentiel pour un système SSC (Système Solaire Combiné) système complet de production et de chauffage incluant capteurs, ballon et kit de circulation), sont clairement susceptibles d'être équipées avec cette technologie. Leur débit est cependant inférieur à celui des panneaux à plaque.

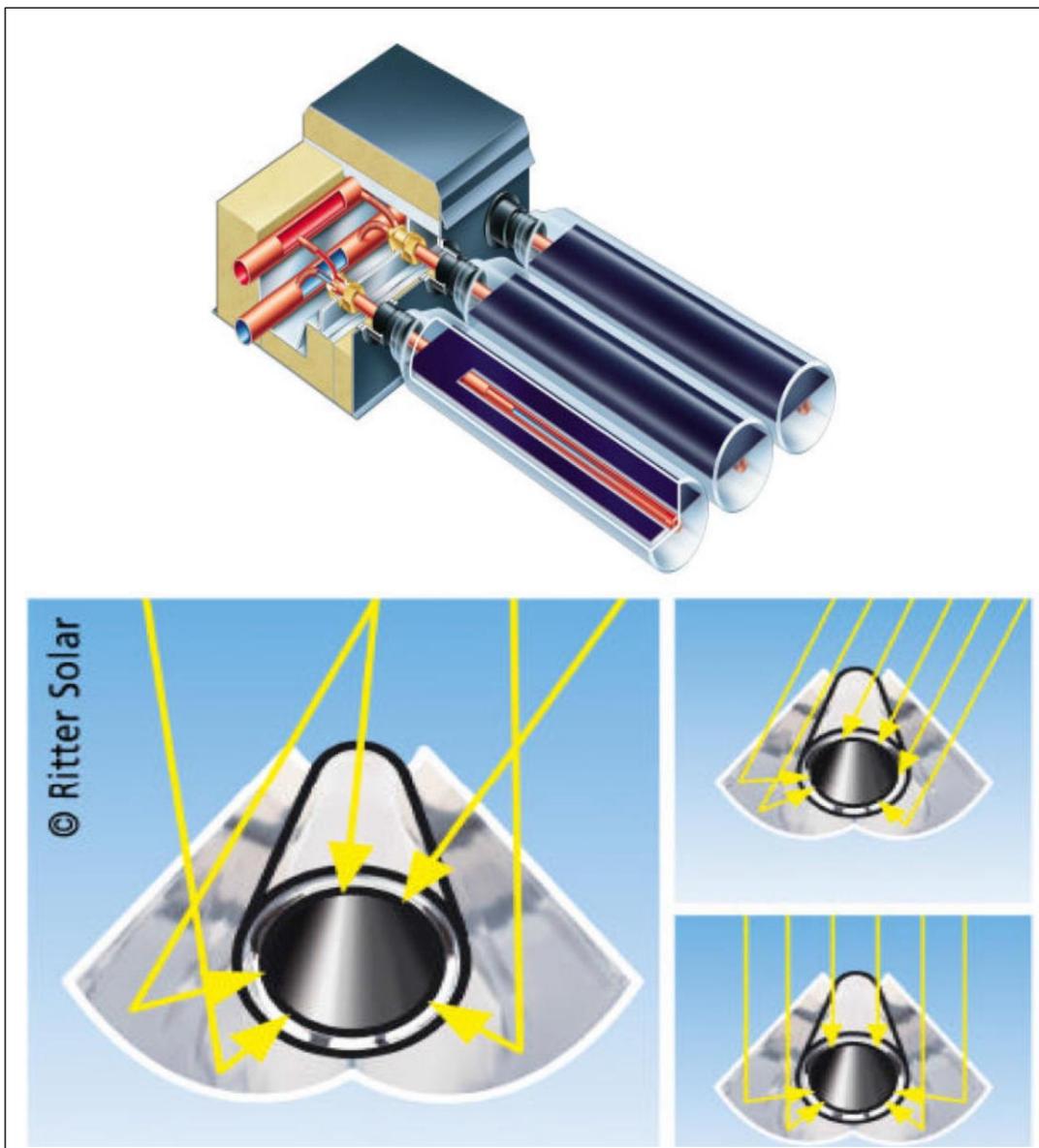
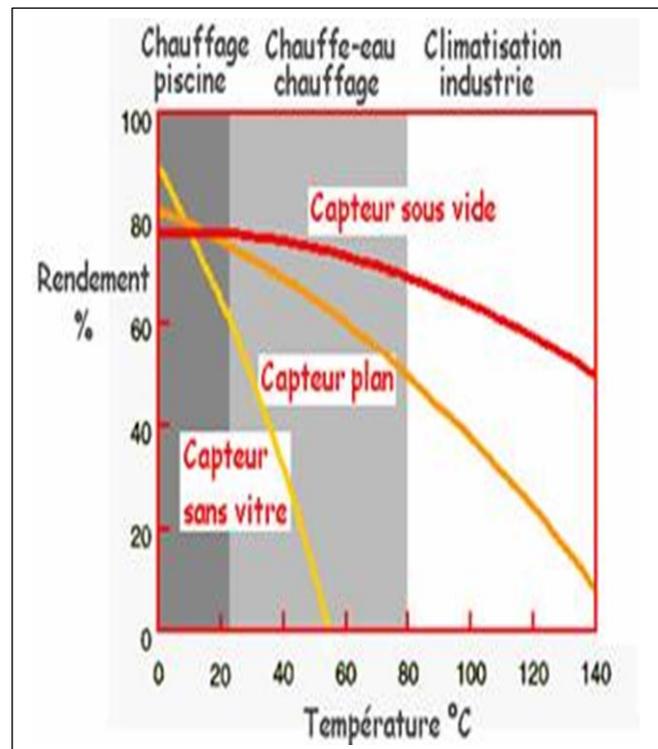


Fig I.11: Un capteur thermique sous vide

I-3-1-4- Comparaison entre les types de capteurs thermiques



I-3-2- capteur solaire photovoltaïque

C'est une manière d'obtenir l'énergie électrique à travers les panneaux photovoltaïques. Dans une cellule photovoltaïque, la lumière (Radiation solaire) excite les électrons qui sautent entre les nappes (avec charges électriques contraires) des matériaux semi-conducteurs de silicium, de type diode, et tout ça produit les courants électriques, par une différence de potentiel entre les extrêmes, qui sont proportionnelles à la radiation incident, c'est l'effet photovoltaïque. Une partie des radiations incidentes est perdue par réflexion, et une autre par transmission.

La cellule solaire, unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit typiquement une puissance de 1,3 W pour une surface de 100 cm². Pour produire plus de puissance, des cellules solaires identiques sont assemblées pour former un module solaire (ou panneau photovoltaïque). La mise en série de plusieurs cellules solaires somme les tensions pour un même courant, tandis que

la mise en parallèle somme les courants en conservant la tension. La plupart des panneaux solaires photovoltaïques destinés à un usage général sont composés de 36 cellules en silicium mono ou polycristallin connectées en série pour des applications en 12 V nominal.

Les cellules solaires sont faites avec du silicium (la plupart du temps), arséniure de gallium, ou un autre matériel semi-conducteur en état cristallin, ceux qui convertissent la radiation en électricité de manière directe. Celles-ci sont capables de produire un courant de 2 à 4 Ampères, à un voltage de 0,46 à 0,48 Voltions.

Elles ne mettent en œuvre aucun fluide, et ne contiennent pas de substances corrosives, ni aucune pièce mobile. En plus elles produisent de l'électricité à partir du moment où elles sont exposées au rayonnement solaire, et ne nécessitent pratiquement aucun entretien, en plus elles ne polluent pas, et ne produisent aucun bruit. Donc, elles sont la façon la plus écologique de produire de l'énergie électrique.

Elles sont applicables pour n'importe quelle activité qui nécessite de l'électricité pour fonctionner, la seule limitation qu'elle a est le coût de l'équipement, et les dimensions de la surface de panneaux nécessaires.

La puissance de «crête» d'un panneau, est celle de sortie, en Watts, que produit un panneau photovoltaïque en conditions d'illumination solaire maximale, avec une radiation approximative de 1 kW/m². Ce qui est produit un jour isolé au midi solaire.

Les facteurs les plus importants pour son rendement sont, l'intensité de la radiation lumineuse et la température des cellules solaires. Il est donc important de prendre en compte la location des panneaux (orientation et inclinaison), et aussi le fait qu'ils soient bien aérés, parce que s'ils sont trop chauds la puissance se réduit.

Aujourd'hui, l'Allemagne est le deuxième producteur mondial d'énergie solaire photovoltaïque, après Japon, avec près de 80% de la puissance totale de tout l'Europe installé.

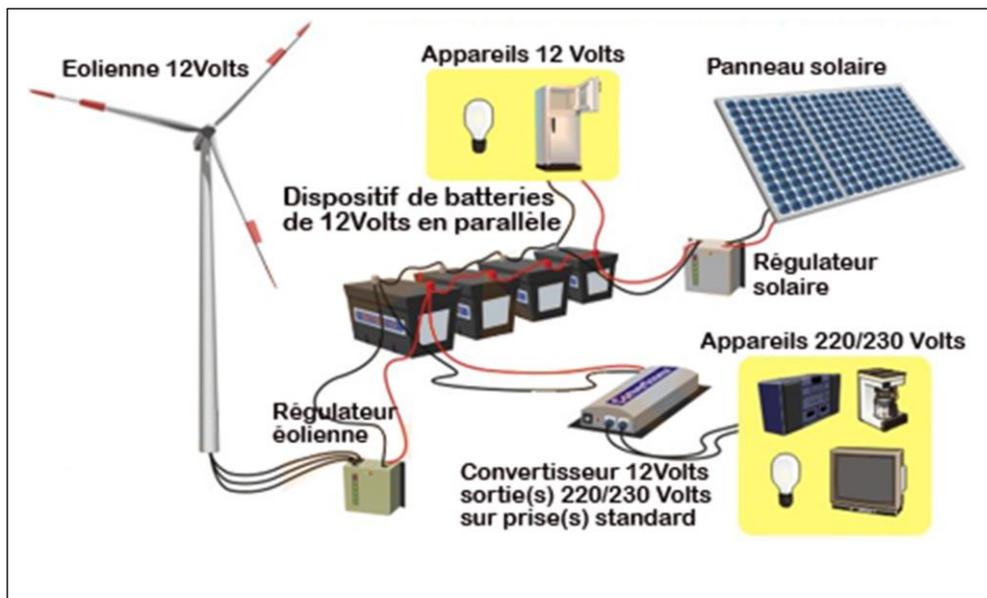


Fig I.12 : Un réseau électrique photovoltaïque

I-4- conclusion

Pour comparer deux capteurs, il est donc très important de vérifier que les caractéristiques fournies sont bien relatives à la même surface: c'est à dire à la surface occupée du capteur sur son lieu d'implantation .Suivant la norme qui teste les capteurs par rapport à la surface d'entrée et non par rapport à la surface hors tout, les capteurs à tubes sont anormalement avantageés.

Chapitre II

Etude théorique d'un capteur solaire plan

II-1-Introduction

Le capteur solaire plan a eau offre la possibilité de produire de l'eau chaude à partir de l'énergie solaire, les températures pouvant atteindre les 120°C et le rendement de conversion est élevé généralement. En exploitant le rayonnement solaire direct, considéré comme la ressource principale, qui est très considérable à l'échelle planétaire, ces technologies offrent une véritable alternative à la consommation des ressources fossiles avec un faible impact environnemental et un fort potentiel de réduction des coûts ainsi que la possibilité de l'hybridation de ces installations.

II-2-Description d'une installation thermique

Une installation solaire thermique se compose de différentes parties :

- le récepteur d'énergie (les panneaux solaires) ;
- la conduite de liaison entre les panneaux et le local technique ;
- le régulateur qui va mesurer différentes températures et enclencher ou déclencher une pompe de circulation ;
- le chauffe-eau ou accumulateur de chaleur ;
- certaines pièces indispensables qui composent une installation solaire : appoint électrique, échangeur, sonde thermique solaire, vase d'expansion, ensemble hydraulique,...



Fig II.1 :les éléments d'une installation solaire thermique

II-2-1-L'échangeur de chaleur et la tuyauterie isolée

Le fluide caloporteur qui circule dans le capteur solaire capte la chaleur et la transporte à travers la tuyauterie jusqu'au réservoir de stockage d'eau chaude.

Le système d'échangeur de chaleur permet au fluide caloporteur de circuler dans des conduits (en circuit fermé) à l'intérieur du réservoir de stockage d'eau chaude. Progressivement, le fluide cède sa chaleur à l'eau domestique. Bien sûr ce transfert se réalise sans mélange ni contamination.

Le fluide caloporteur refroidi remonte ensuite vers les capteurs solaires pour démarrer un nouveau cycle.

Le fluide caloporteur circule généralement à l'aide d'une pompe électrique et d'un régulateur.

II-2-2-Le réservoir de stockage d'eau chaude

Le réservoir de stockage d'eau chaude est alimenté par de l'eau froide provenant du réseau municipale à une température d'environ 7 °C. Grâce à la chaleur fournie par le fluide caloporteur, l'eau domestique subit un préchauffage dans le réservoir de stockage.

Le chauffe-eau solaire chauffe au maximum l'eau contenue dans le réservoir de stockage avant de la transférer dans le chauffe-eau existant adjacent. Ce n'est donc pas de l'eau froide qui alimente le chauffe-eau traditionnel, mais l'eau chaude du réservoir de stockage solaire.

Le chauffe-eau traditionnel intervient comme système de chauffage d'appoint pour compléter, au besoin, le chauffage de l'eau jusqu'à la température d'utilisation (60 °C). L'utilisation du chauffe-eau traditionnel variera selon le degré d'ensoleillement et les besoins en eau chaude des occupants.

II-2-3-Principe de fonctionnement d'un capteur solaire a eau

Les panneaux solaires thermiques transforment la lumière en chaleur, le plus souvent pour des chauffe-eau solaire.

Pour cela, les rayons du soleil passent d'abord par une plaque de verre transparente à la lumière. Sous ce verre, un absorbeur noir (plaque de métal recouverte d'une fine couche de couleur noir) absorbe 80 à 90% des rayons lumineux. L'absorbeur transforme ces rayons lumineux en chaleur, grâce au transfert thermique par rayonnement.

En s'échauffant, l'absorbeur émet des infrarouges. Ces infrarouges sont bloqués entre la plaque de métal et la plaque de verre, c'est le principe de l'effet de serre. Ainsi, l'air entre les deux plaques s'échauffe et améliore le rendement.

Par conduction, l'énergie thermique ou chaleur de l'absorbeur est transmise à un

circuit d'eau (c'est le liquide caloporteur). Celle-ci s'échauffe et est ensuite acheminée vers un ballon d'eau chaude à l'aide d'une pompe, ou bien par la simple gravité.

Dans l'accumulateur, le liquide caloporteur chaud parcourt un circuit et transfère sa chaleur à l'eau domestique. [12]

II-3-Différent modes de transfert de chaleur dans un capteur solaire thermique plan

II-3-1 Notions sur la conduction thermique

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

- **Loi de fourrier**

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations des dispositifs seront négligées. Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (fig.11). Les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T_2 (source chaude) et T_1 (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source froide. Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme.

Figure :

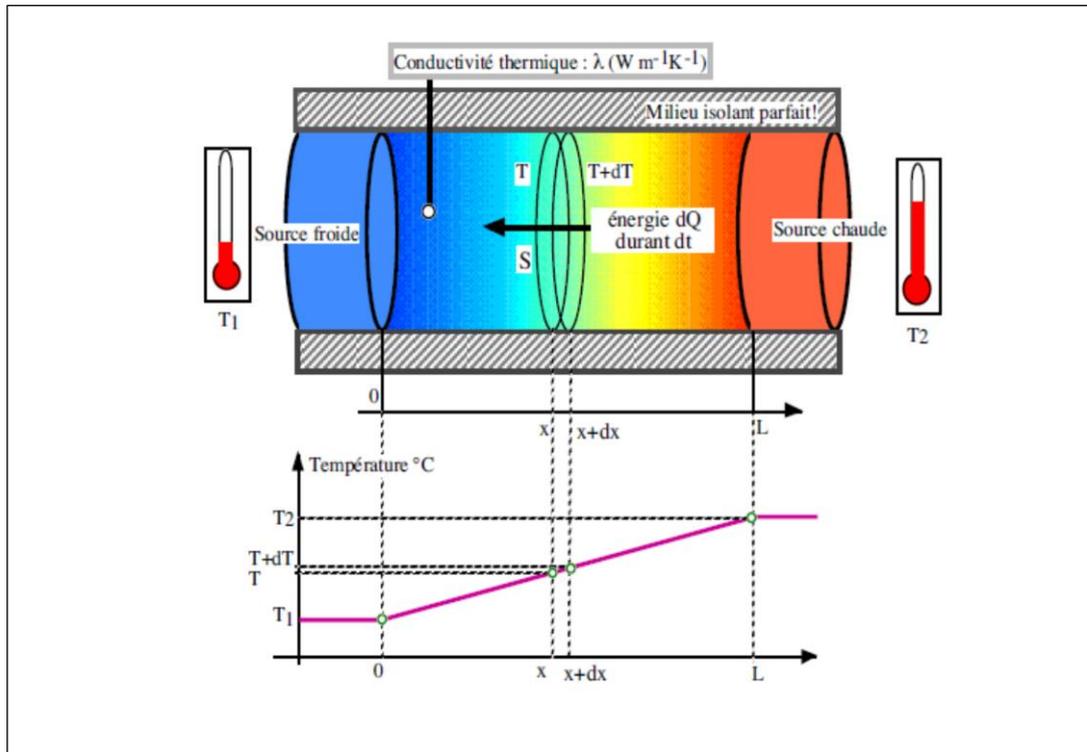


Fig II.2 : Propagation de la température dans un milieu cylindrique

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire dQ qui traverse un élément x et une surface S d'épaisseur dx durant le temps dt :

$$dQ = -\lambda S \cdot \frac{dT}{dx} dt \quad (\text{II.1})$$

- dQ : énergie élémentaire en Joule
- λ : Conductivité thermique du matériau en $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$
- S : section de transfert thermique en m^2
- dt : temps élémentaire en S
- $\frac{dT}{dx}$: gradient de température en x en $\text{K} \cdot \text{m}^{-1}$

La relation précédente de l'énergie élémentaire permet de définir :

Le **flux de chaleur Φ** en watt qui circule sur une distance x :

$$\Phi(w) = \frac{dQ}{dt} = -\lambda S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.2})$$

Ainsi que la densité de chaleur φ en W/m^2 :

$$\varphi = \frac{\Phi}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (\text{II.3})$$

Remarque : le signe (-) des relations précédentes indique que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température (dT/dx est positif sur la figII.12)[5]

II-3-2-notion sur la convection thermique

La convection thermique est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse. On distingue deux types de convection, la convection naturelle (ou encore convection libre) et la convection forcée (ventilation).

La convection naturelle apparaît spontanément. Elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force d'Archimède.

Autre exemple : mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par une plaque électrique.

La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur (cas des

radiateurs de voiture, des montages électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, etc.).

Quel que soit le mode de convection, le transfert d'énergie entre la surface d'un corps solide à la température T et le fluide environnant se fait par conduction thermique puisque la vitesse du fluide est nulle à la surface du corps solide. On peut alors définir le flux de chaleur échangé par convection :

$$\Phi(w) = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) \text{ avec : } h = \frac{\lambda_f}{\xi} \quad (w \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}) \quad (\text{II.4})$$

Avec ξ : L'épaisseur de la couche. Elle dépend du type d'écoulement du fluide au voisinage de la paroi.

Cette équation est appelée loi de Newton où h représente le coefficient de transfert convectif. Ce coefficient ne dépend pas en général de la nature de la paroi mais uniquement des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent). Quand la vitesse d'écoulement du fluide augmente, on passe du régime laminaire au régime turbulent. Les filets fluides sont alors animés de mouvements tourbillonnaires de caractère aléatoire [6]

II-3-3-Notion sur le rayonnement

Tout corps chauffé à une certaine température quel que soit leur état : solide, liquide ou gazeux - émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière. Il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de W. Herschell [7]

II-3-4-Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Le rayonnement incident sur une surface a une irradiation H (W/m²) (fig.II.13)

$$H = \alpha H + \rho H + \tau H \text{ avec: } \rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{II.5})$$

- **Absorptivité moyenne** : $\alpha = H_{abs}/H$
- **Réfectivité moyenne** : $\rho = H_{ref}/H$
- **Transmissivité moyenne** : $\tau = H_{tr}/H$

On définit ainsi l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde. On obtient les pouvoirs réfléchissant ρ , absorbant α et transmittant (filtrant) τ qui sont en fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ , du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

Figure :

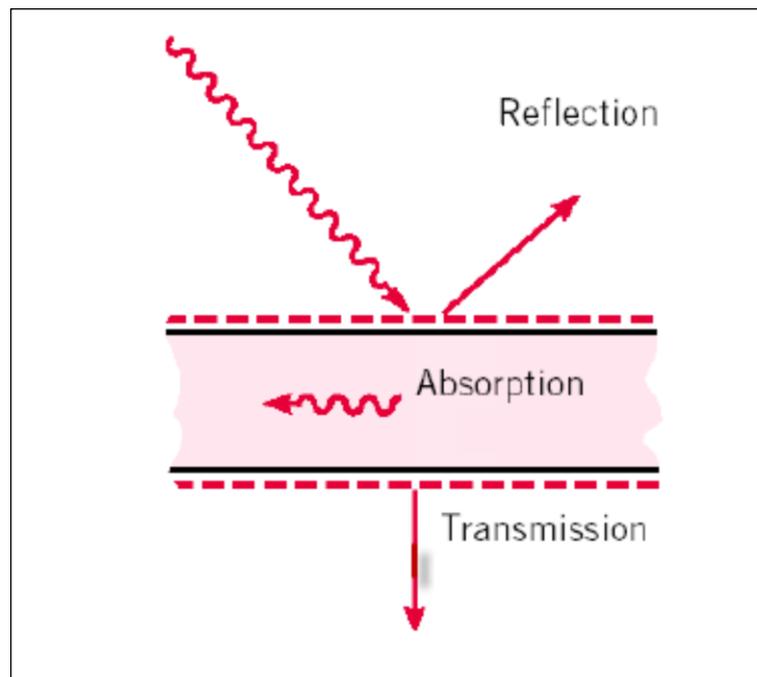


Fig II.3 : schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Cas particuliers

• Corps noir (le tube du capteur)

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est défini par : $\alpha = 1 \Rightarrow \rho = \tau = 0$

Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Propriétés du corps noir :

- Tous les corps noirs rayonnent de la même manière. Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température

• pour un surface réfléchissante : $\rho = 1 \Rightarrow \alpha = \tau = 0$

• pour un surface opaque : $\tau = 0 \Rightarrow \alpha + \rho = 1$ [8]

II-4- Modélisation du chauffe-eau solaire

L'énergie utile récupérée s'écrit :

$$Q_u = A_g \cdot F_R \cdot [(\tau\alpha) \cdot I_g - U_g (T_e - T_a)] \quad (\text{II.6})$$

La variation de la température de stockage dépend de la variation journalière de la température ambiante et de l'éclairement solaire, mais reste fortement liée aux caractéristiques du capteur solaire plan $(\tau\alpha)$ et (F_R, U_g) et de l'effet thermosiphon lié au débit \dot{m} .

II-4-1-Détermination des facteurs F_R $(\tau\alpha)$ et (U_g)

Pour la détermination des caractéristiques du capteur solaire, une simulation numérique portant sur la détermination du rendement du capteur en régime permanent a été effectuée.

En effet, le rendement instantané du capteur solaire plan est égal au rapport entre la puissance énergétique récupérée par le fluide et l'irradiation solaire :

$$\eta = \frac{Q_u}{A.I_g} \quad (\text{II.7})$$

En remplaçant la puissance énergétique utile Q_u par son expression donnée en équation (2), le rendement instantané s'écrirait :

$$\eta_u = F_R(\alpha\tau) - F_R(U_g) * \frac{(T_e - T_{ae})}{I_g} \quad (\text{II.8})$$

Le rendement prendrait la forme d'une droite dont l'intersection avec l'axe des y représenterait le rendement optique $F_R(\alpha\tau)$ et où la pente serait les pertes thermiques globales vers l'ambiance ($F_R \cdot U_g$).

Le coefficient de pertes thermiques globales vers l'ambiance est la somme des pertes thermiques vers l'avant, l'arrière et latéralement. Il est donné par :

$$U_g = U_{av} + U_{ar} + U_{lt} \quad (\text{II.9})$$

Le facteur (U_g) regroupe les pertes thermiques par conduction, par rayonnement et convection entre les divers composants du capteur solaire et l'ambiance. Une représentation des échanges par analogie électrique est donnée en figure (figII.5)

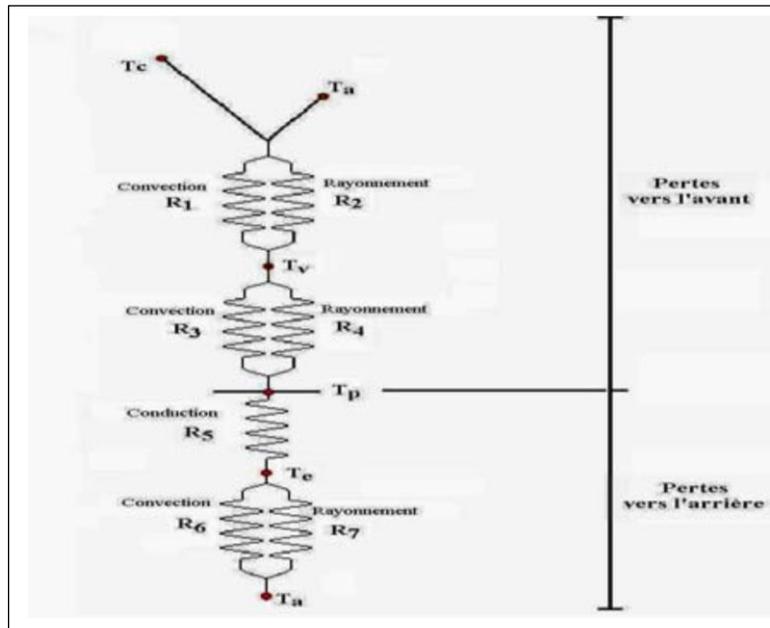


Fig II.5 : Analogie électrique des pertes thermiques vers l'ambiance

Avec :

R1 : Résistance thermique convective entre le vitrage et l'ambiance

R2 : Résistance thermique due au rayonnement entre le vitrage et l'ambiance

R3 : Résistance thermique convective entre le vitrage et la plaque absorbante

R4 : Résistance thermique due au rayonnement entre le vitrage et la plaque absorbante

R5 : Résistance thermique par conduction de l'isolation vers l'arrière

R6, R7 : Résistances thermiques par convection et par rayonnement entre le fond du bac et l'extérieur.

Une simulation basée sur une itération successive effectuée sur les températures plaque et vitrage a été développée pour la détermination du coefficient de pertes thermiques globales U_g .

Le facteur U_g est alors considéré constant lors de l'estimation de l'évolution de la température de stockage.

Par ailleurs, le facteur de conductance F_R défini dans l'équation (6) représente le rapport entre la puissance récupérée réellement et la puissance que l'on aurait obtenue si la température du fluide était égale à la température d'entrée du fluide, il est donné par :

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p.(T_s - T_e)}{A_g.(S - U_g.(T_e - T_a))} \quad (\text{II.11})$$

Après arrangement, on obtient :

$$F_R = \left(\frac{\dot{m}.C_p}{A_g.U_g} \right) \left[1 - \exp \left(\frac{A_g.U_g.F'}{\dot{m}.C_p} \right) \right] \quad (\text{II.12})$$

Ces facteurs sont fonctions des températures plaque et vitrage. Pour un débit supposé constant

II-5-Le Rendement du capteur thermique plan

Le rendement d'un capteur solaire dont le symbole est η est le rapport de la chaleur emmagasinée par le fluide caloporteur sur la puissance incidente reçue par le rayonnement solaire G . le rendement d'un capteur chute au cours de la journée car ses pertes sont en fonction de la différence de température entre l'air ambiant et l'absorbeur. Plus cette différence de température augmente, plus le rendement du capteur chute

Cette équation du rendement tient compte de l'influence des caractéristiques de l'absorbeur et du débit du fluide caloporteur.

L'équation du rendement du capteur se présente sous la forme :

$$\eta = \eta_0 \frac{U_g}{G} (T_m - T_a) \quad (\text{II.12})$$

ou :

$$\eta_0 = F' \cdot \alpha \cdot \zeta$$

ou η_0 est appelé rendement optique du capteur solaire.

- F' : fonction de la qualité du transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide
- α : coefficient d'absorption de l'absorbeur
- ζ : coefficient de transmission du vitrage
- U_g : coefficient global des pertes du capteur ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$)
- T_a : température de l'air ambiant (K)
- T_m : température moyenne du fluide caloporteur (K)
- G : rayonnement solaire globale (W/m^2)

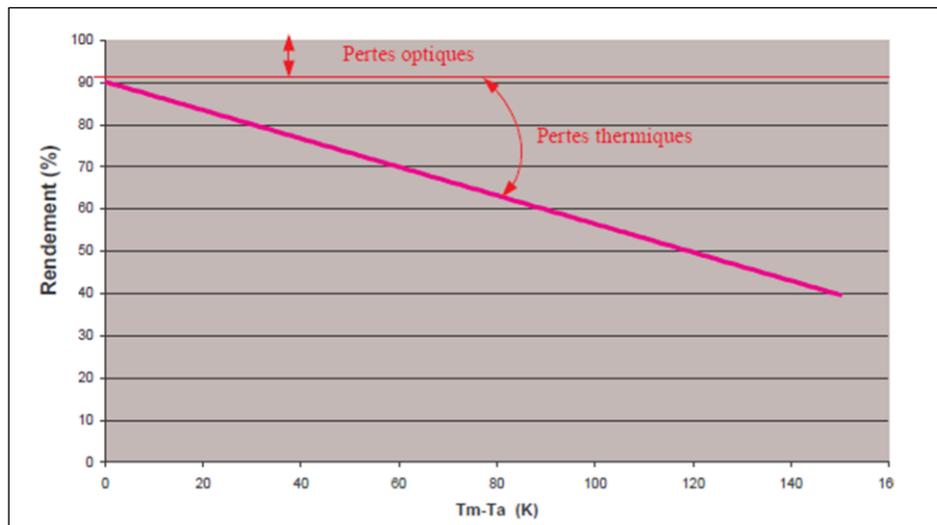


Fig II.6 : rendement du capteur en régime STATIQUE pour $G=1000 \text{ W/m}^2$ [7]

II-6-Orientation et Inclinaison d'un capteur :

Le gisement solaire influe donc sur la production d'énergie d'origine solaire, mais l'inclinaison et l'orientation joue également un rôle majeur. L'idéal étant des panneaux solaires orientés aux alentours de 30 à 35° (selon les régions là encore) avec une orientation la plus proche du Sud, la production restant correcte entre le Sud-Est et le Sud-Ouest. A noter qu'au-delà de 20° , le capteur en plus d'être moins efficace risque de s'encrasser. Le diagramme suivant montre l'influence de l'orientation et de l'inclinaison du panneau.

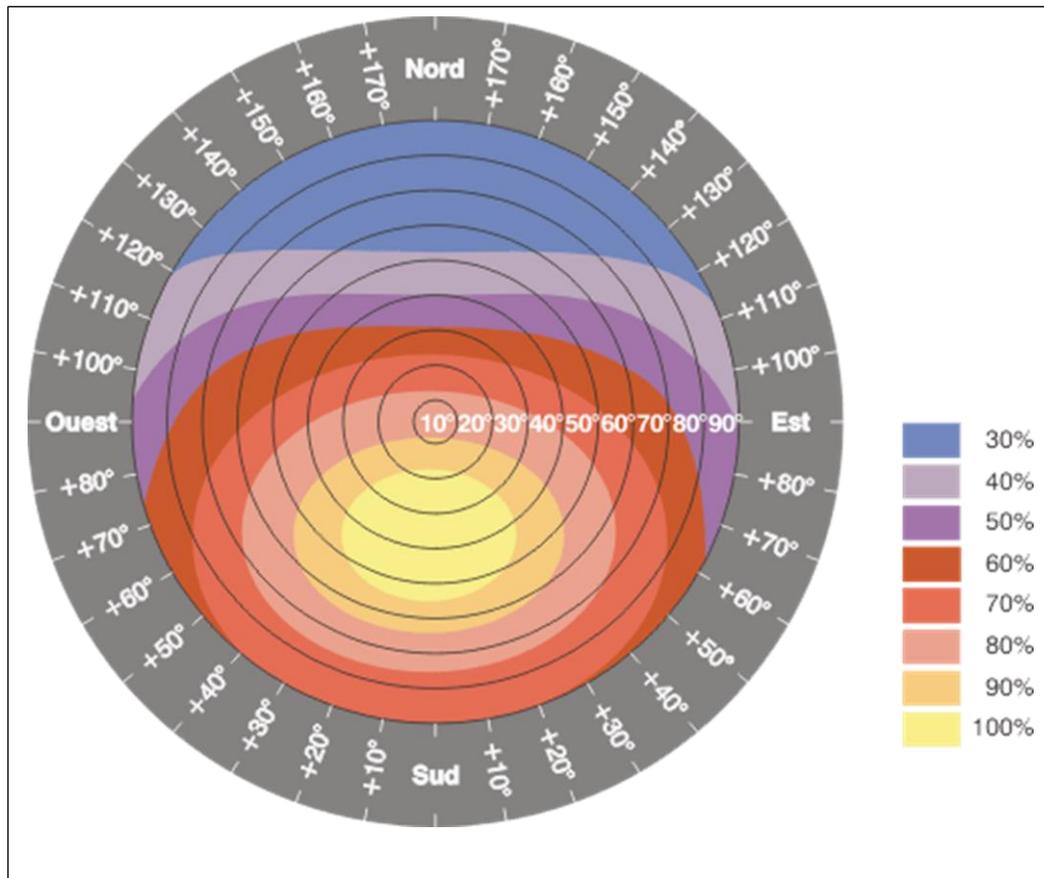


Fig II.7: Schéma montrant l'inclinaison du capteur

II-7-Loi de conservation de l'énergie

Soit φ_i le flux incident, φ_r le flux réfléchi, φ_t le flux transmis et φ_a le flux absorbé, la conservation de l'énergie s'écrit :

$$\varphi_i = \varphi_r + \varphi_a + \varphi_t \quad (\text{II.13})$$

Réflexion des radiation

Soit n_1 et n_2 les indices de réfraction de milieux. Un rayon frappant l'interface avec un angle d'incidence θ_i , Sera particulièrement réfracté, Les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction sont liés par **la loi de Descartes**.

$$n_1 \cdot \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_r \quad (\text{II.14})$$

Avec: $\theta_i = \theta_r$

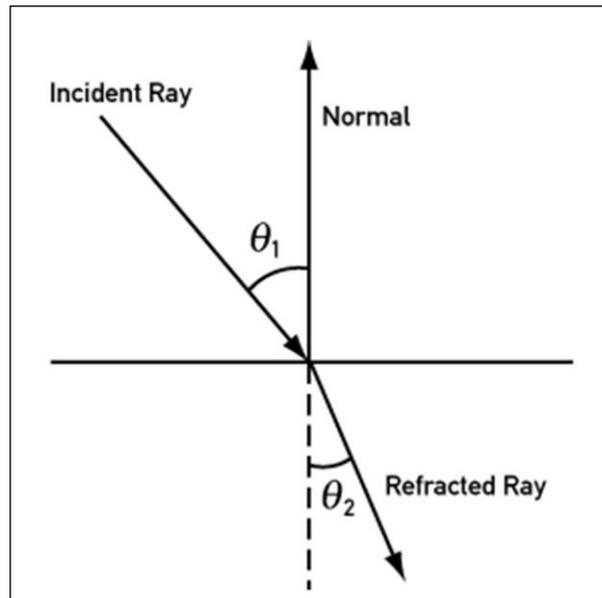


Fig II.8: Reflex ion des radiations

II-8-Les pertes thermiques d'un capteur

Les capteurs solaires ont un bilan énergétique qui fait intervenir des pertes par rayonnement, convection et conduction. La connaissance de ces phénomènes est donc nécessaire pour établir, prévoir ou améliorer le bilan thermique.

Les applications de mise en forme et l'amélioration des qualités d'un capteur solaire, nécessitent la prédiction des pertes thermiques au sein de ce dernier ; la détermination des pertes tient compte à son tour des différents échanges thermiques existants

$$Q_{ray} + Q_{conv} + Q_{cond} = Q_{pert} \quad (\text{II.15})$$

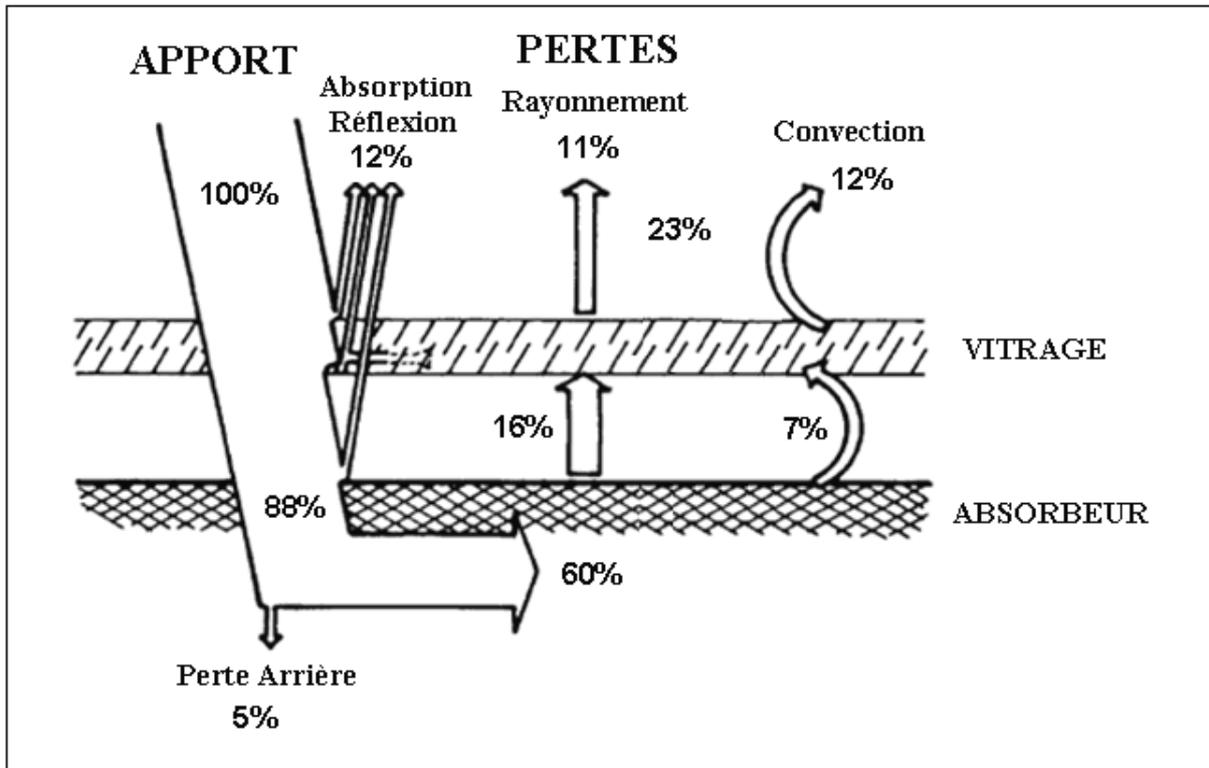


Fig II.9: Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré

• Pertes Par Conduction

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à ceux par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$Q_{cond} = \lambda_{cond} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{II.16})$$

• Pertes par Convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante donnée par la formule :

$$Q_{conv} = h_{conv} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (\text{II.17})$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante :

$$h_{conv} = \frac{Nu \lambda_{cond}}{d} \quad (\text{II.18})$$

d : Diamètre du capteur.

λ_{cond} : Conductivité thermique du tube en cuivre

Le nombre du Nusselt Nu est donné par :

$$Nu = 0.664(Re)^{1/2}(Pr)^{1/3} \quad (\text{II.19})$$

Le calcul du nombre de Reynolds(Re) par la formule :

$$Re = \frac{V.d}{\nu_{air}} \quad (\text{II.20})$$

- **Pertes par rayonnement**

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émissivité de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme, nous avons :

$$Q_{ray} = \xi_{abs} \sigma A_{abs} (T_{abs}^4 - T_{ciel}^4) \quad (\text{II.21})$$

Où :

ε_{abs} : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante Stefan-Boltzmann.

T_{ciel} : Température du ciel.

Cependant, les auteurs s'accordent à dire que les pertes latérales et arrières restent négligeables devant les pertes thermiques face avant du capteur qui demeurent les plus importantes ; on appelle face avant, la partie du capteur orientée vers le ciel entre l'absorbeur et l'extérieur.

II-8-1-Pertes thermiques vers l'avant du capteur

Ces pertes peuvent être exprimées en deux parties, les pertes entre la vitre et l'extérieur et les pertes entre l'absorbeur et la vitre.

- Les pertes entre l'extérieur et la vitre

Dans ce cas on a des pertes par convection et des pertes par rayonnement, Le rayonnement se fait par réflexion produit par le vitrage et la convection naturelle avec le milieu extérieur.

Pour ce qui est des pertes convectives elles peuvent aussi être considérées comme convection forcé si il y'a une variation dans la vitesse du vent.

- Les pertes entre la vitre et l'absorbeur

Dans ce cas on a des pertes par convection et des pertes par rayonnement et par conduction.

Il y a un échange radiatif et une convection avec l'aire intérieure dans le capteur et aussi une conduction avec l'eau qui s'écoule à l'intérieure de l'échangeur.

Les pertes entre l'extérieure et le vitrage et entre le vitrage et l'absorbeur on donner une formule globale :

- global des pertes avant U_t sera alors donné par :

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} = \left(\frac{1}{h_c + h_{r,c-a}} + \frac{1}{h_{p-c} + h_{r,p-c}} \right)^{-1} \quad \text{(II.22)}$$

R_1 : Résistance thermique convective entre le vitrage et l'ambiance

R_2 : Résistance thermique due au rayonnement entre le vitrage et l'ambiance

h_c : coefficient thermique de convection entre le vitrage et l'extérieur

$h_{r,c-a}$: coefficient thermique de rayonnement entre la couverture et l'ambiance

$h_{r,p-c}$: coefficient thermique le coefficient de rayonnement entre l'absorbeur

II-8-2-Pertes thermiques vers l'arrière d'un capteur

Les pertes arrière sont peu importantes devant les pertes avant. En effet, le capteur étant généralement bien isolé à l'arrière. L'expression permettant d'évaluer le coefficient d'échange est donnée par :

$$U_{arr} = \frac{1}{R_4} = \frac{\lambda_{is}}{L_{is}} \quad (\text{II.23})$$

Ou

λ_{is} : est la conductivité thermique de l'isolant

L_{is} : c'est la largeur de l'isolant

II-8-3-Pertes thermiques vers les côtés d'un capteur

C'est aussi des pertes que beaucoup de gens considère presque nul parce qu'il y'a une isolation même sur les côtés.

Il y'a une formule qui nous permet de calculer ces pertes :

$$U_e = \left(\frac{\lambda}{L_{is}}\right) \frac{A_l}{A_c} \quad (\text{II.24})$$

Ou A_c : surface du capteur

A_l : surfaces latérales

II-9-Cas de pertes de charge

Le frottement du fluide sur les parois des canalisations, les obstacles au passage fluide comme les coudes, tés, rétrécissement, etc. se traduisent par des pertes

d'énergie du fluide. Ces pertes se retranchent de l'énergie dont dispose le fluide à l'entrée, et Bernoulli s'écrit :

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \sum \Delta H_{L+S} \quad (\text{II.29})$$

II-9-1-Les pertes de charge linéaires

Les pertes de charge linéaires résultent du frottement exercé entre le fluide et la surface intérieure de la canalisation. Elles sont proportionnelles à la longueur L de la conduite et au carré de la vitesse moyenne V du fluide, inversement proportionnelle au diamètre d et fonction de la rugosité moyenne R de la canalisation. Défini par équation suivant :

$$\Delta H_L = \lambda \frac{V_m^2}{2g} \frac{L}{D} \quad [\text{m}] \quad (\text{II.30})$$

Avec :

λ : Un coefficient de perte de charge. Il est sans dimension et est fonction du nombre de Reynolds et de la rugosité.

L : La longueur de la conduite [m].

D : Le diamètre [m].

V_m : La vitesse moyenne [m/s]

II-9-2-Les pertes de charge singulière

La perte de charge singulière, localisée dans une section de la conduite, est provoquée par un changement de direction et d'intensité de la vitesse.

L'écoulement uniforme est perturbé et devient localement un écoulement non uniforme. La turbulence joue un rôle considérable, alors que les forces de viscosité sont négligeables. La perte de charge n'a donc lieu qu'en régime turbulent.

Une telle non-uniformité de la vitesse peut être provoquée par :

- un branchement de section de la conduite.

- un changement de direction (coude).
- un branchement ou raccordement.
- un dispositif de mesure et contrôle de débit.ect

Les pertes de charges singulières se traduisent par la relation :

$$\Delta H_s = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (\text{II.31})$$

Bilan thermique d'un capteur solaire

Le bilan thermique en régime stationnaire d'un capteur exprime que la puissance absorbée ($I_c \cdot \alpha$) se répartit entre la puissance utile P_u et les pertes thermiques P_p , ainsi on peut écrire :

$$I_c \cdot \alpha = P_u + P_p \quad (\text{II.32})$$

Avec : τ le facteur de transmission du vitrage.

α le facteur d'absorption de l'absorbeur.

Si l'on considère que le capteur est à une température T_c et que l'environnement est à une température T_a , alors P_p sera donnée par :

$$P_p = U_t (T_c - T_a) \quad (\text{II.33})$$

Si le fluide caloporteur rentre dans le capteur avec un débit massique à une température T_e et sort à une température T_s , la puissance utile P_u sera donnée par :

$$P_u = \dot{C}_p (T_s - T_e) \quad (\text{II.34})$$

Où C_p est la chaleur spécifique du fluide caloporteur.

Le rendement du capteur η est défini comme étant le rapport entre la puissance utile et la puissance incidente, soit :

$$\eta = P_u / S \cdot G \quad (\text{II.35})$$

Bien entendu, en régime transitoire il faut rajouter dans le bilan la puissance stockée pour amener la température du capteur au régime permanent.

II-10-Conclusion

Le capteur solaire est un élément de base dans une installation solaire thermique.

Le dimensionnement de cette installation passe systématiquement au dimensionnement de différents éléments de cette dernière. Ces calculs peuvent être classés en deux grandes catégories : un calcul thermique pour estimer les performances thermiques de l'installation et un calcul hydraulique pour estimer les pertes de charges dans le circuit de l'installation.

Chapitre III

Etude expérimentale du capteur solaire

III-Introduction :

Dans ce chapitre nous allons voir les étapes de réalisation et conception du capteur solaire thermique plan à eau qui a été réalisé au sein de la faculté de technologie Abou Bekr Belkaid-Tlemcen Atelier de mécanique. Les dimensions de ce dernier sont comme suit : 170cm de longueur, 100cm de largeur et 6.5 cm d'épaisseur.



Fig III.1 : Atelier de mécanique ou le capteur solaire a été réalisé

III-1-Description du dispositif expérimental :

Le capteur a été fabriqué artisanalement avec l'assistance de l'encadreur qui nous a aidés dans le dimensionnement de ce dernier.

Nous avons pris le choix de fabriquer le panneau en serpentin au lieu d'un capteur à échelle.

La figure III.2 représente une photographie du capteur :



Fig III.2 : photographie du capteur avec vitrage

III-1 Les composants du capteur :

III-1-1 Une couverture transparente :

Une vitre transparente de verre trempé d'épaisseur 5 mm pour une optimisation maximale du rayonnement.

Voilà une photo qui montre le vitrage seule utilisé dans la figure III.3 :



Fig III.3 : photographie montrant la vitre

La vitre est jointée avec le cadre en bois à l'aide d'un ruban adhésif pour limiter et éviter les pertes thermiques.

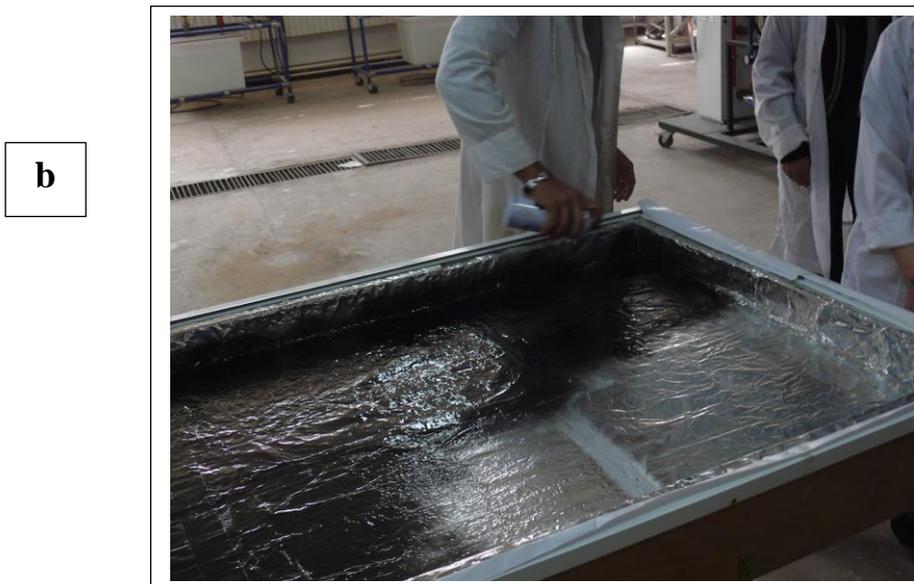
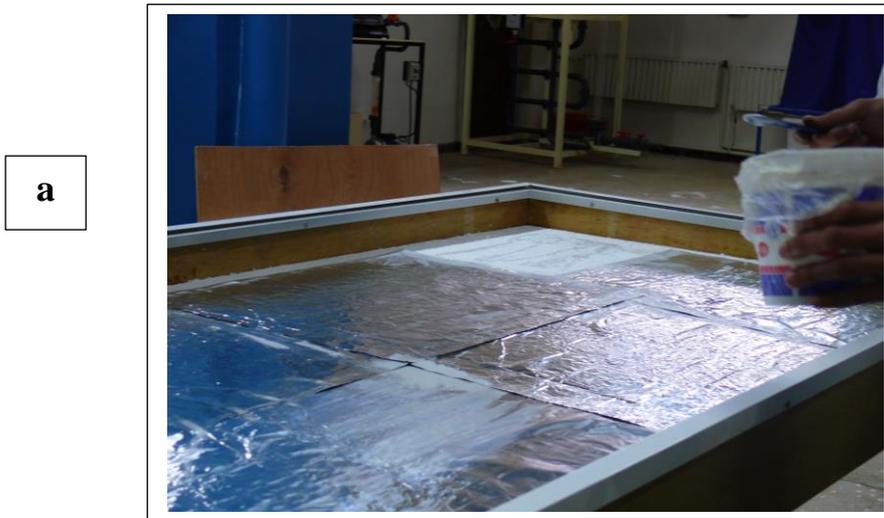


Fig III.4 : joint d'étanchéité utilisé entre la vitre et le cadre

III-1-2- Une plaque absorbante :

Ce sont plusieurs plaques mince en aluminium qui ont été assemblés et collés directement sur l'isolant, et qui ont été peintes avec une peinture de bombe aérosol noire mate.

La figure suivante montre la pose de la plaque absorbante figure III.5 :



*FifIII.5 : les plaques en aluminium sans peinture(a)
et avec peinture (b)*

Caractéristiques de l'aluminium :

- Masse atomique : 27 g/mol
- Réseau cristallin : structure cubique à faces centrées
- Température de fusion : 660 °C
- Masse volumique à 20°C : $\rho = 2.7 \text{ g/l}$

-Conductivité thermique à 20 °C : $\lambda = 240 \text{ w/m } ^\circ\text{C}$

-Pouvoir réflecteur (aluminium poli) : 85 à 90 % dans le spectre visible, 90 à 98% dans l'infrarouge [10]

III-1-3- L'échangeur :

Les tubes en cuivre ont un diamètre intérieur de 14 mm et un diamètre extérieur de 16 mm raccordés entre eux sur une longueur de 15m au total, ils ont été soudés à l'aide d'un chalumeau et remplis avec du sable pour qu'ils ne se déforment pas et pour qu'ils ne se cassent pas comme il est montré dans la figIII.6 :



FigIII.6 : Réalisation de l'échangeur

Caractéristiques du cuivre :

Masse atomique : 63,54 g/mol

Conductivité thermique à 273,2 K : $\lambda = 403 \text{ w/m k}$

Masse volumique du cuivre métallique : $\rho = 8920 \text{ à } 8950 \text{ kg/m}^3$

Réseau cristallin : polycristallins cubique à face centrée

Température de fusion : 1 085 °C

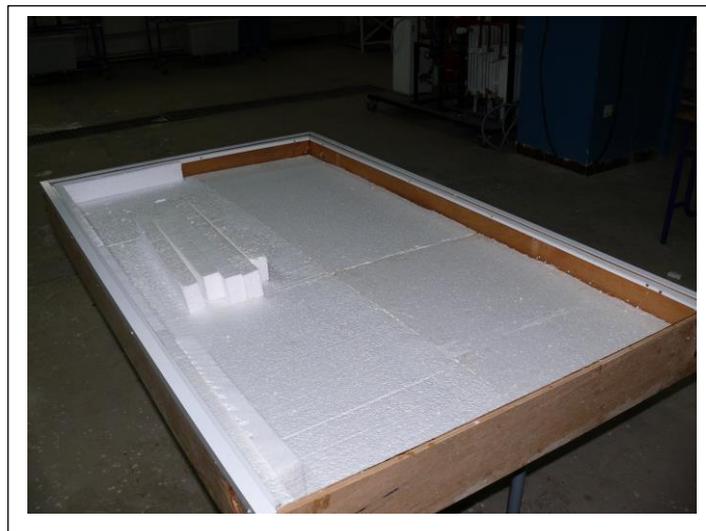
à la fin on les a peints en noir math pour un maximum d'absorption comme il est montré dans la figureIII.7 :



FigIII.7 : l'échangeur peint en noir

III-1-4- L'isolation :

L'isolant arrière c'est des feuilles de polystyrène de 40 mm d'épaisseur placé dans le cadre en arrière et même sur les côtés (utiliser comme réflecteur) comme il est indiqué dans la figureIII.8 :



FigIII.8 : l'emplacement de l'isolant

III-1-5-le boîtier :

Le capteur est protégé par un boîtier en bois fabriqué en contreplaqué en arrière et en bois de 1 cm d'épaisseur sur les cotés



FigIII.9 : Le boîtier en bois

III-1-6-Le support en acier :

Le capteur a été posé sur un support en acier qui été réaliser par nous même au niveau de l'atelier de la faculté.

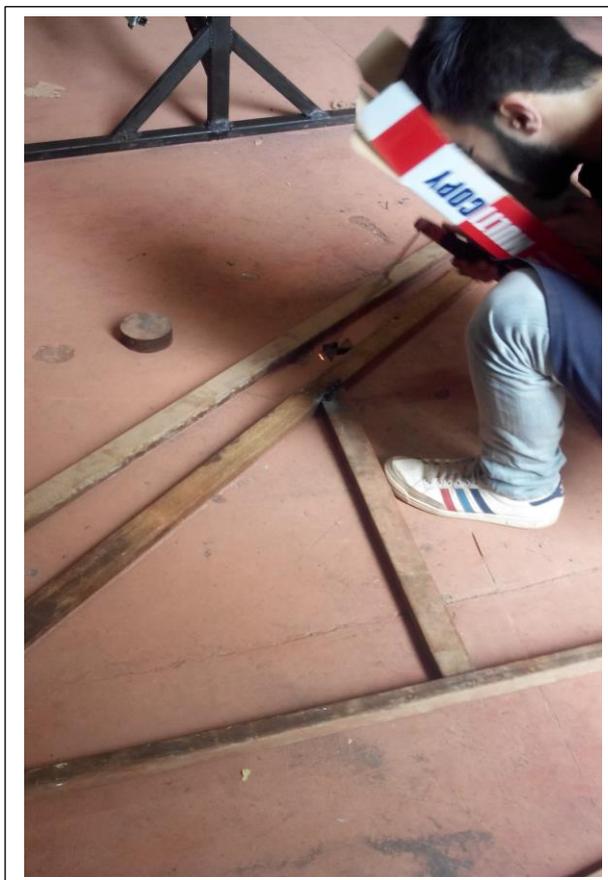
- **Les étapes de construction du support :**

- La première étape c'est de tracer un schéma avec un angle précis (34°) c'est l'altitude de la willaya de Tlemcen.

- On a ramené des tubes en fer carré pour avoir une bonne stabilité et maintien du capteur, et on les a coupés aux dimensions exactes à l'aide d'une d'ébarbeuse.

- Et pour finir nous avons soudé toutes les parties à l'aide de poste de soudage et qu'on a appris à souder par nous-même.

Toutes ses étapes sont montrées dans les photos suivantes :



FigIII.10 : les étapes de fabrication du support

Les dimensions du capteur sont illustrées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III. : Dimensions du capteur

<i>Dimensions du capteur</i>	<i>longueur</i>	<i>Largeur</i>	<i>Epaisseur</i>	<i>Diamètre intérieur du serpentín</i>	<i>Diamètre extérieur</i>
	<i>170 cm</i>	<i>100 cm</i>	<i>65 mm</i>	<i>14 mm</i>	<i>16 mm</i>

III-2-Circuit hydraulique :

Le mouvement du fluide s'effectue de bas en haut : le fluide caloporteur froid (l'eau) entre dans le capteur par le bas et ressort chaud par le haut. Le fluide circule en circuit fermé entre le capteur et un réservoir de 50 litres. Une pompe assure la montée du fluide et un système de vannes placées à l'entrée du capteur permet de contrôler le débit. La mesure du débit se fait, à une position donnée des vannes, par mesure du temps et du volume correspondant écoulé. Le capteur est placé sur un châssis qui permet d'avoir une inclinaison de 34° par rapport à l'horizontale, cette inclinaison est prise de l'altitude de la ville d'essais (Tlemcen).

L'installation est placée dans une cour dégagée au sein de la faculté comme nous le démontre la figure suivante



Fig III.11.A : Circuit hydraulique

La pompe utilisée dans le circuit est une pompe pour les chaudières murales figure III.11 :



Fig III.11.B : pompe centrifuge utilisée

Les caractéristiques de l'eau

- chaleur spécifique de l'eau = 4180 J/kg.k
- /conductivité thermique = : $0,0059 \text{ w/m.k}$
- masse volumique = 1000kg/m^3
- Température d'ébullition : 100°C .
- Température de congélation : 0°C .

Ce fluide caloporteur circule avec un débit précis afin de capté le maximum de chaleur et la transporté au cours de la ligne focale.

La distribution de la température change progressivement au long du serpentin du capteur (échangeur)

III-3-Instrumentation du capteur :

III-3-1-Mesure de l'éclairement :

Le rayonnement solaire global est mesuré grâce un solarimètre étalonné. Celui-ci est placé dans le même plan que le capteur vis à vis du rayonnement solaire comme est montré dans la figure suivante :



Fig III.12 : photographie du solarimètre

III-3-2-Mesure des températures :

Les températures sont mesurées à l'aide de thermocouples Nickel-Chrome/Nickel-Aluminium, de type K. Ces thermocouples, de diamètre 0,05 mm, avec un intervalle de -50°C peuvent aller jusqu'à des températures de 400 K et permettent une précision de $0,1^{\circ}\text{C}$.

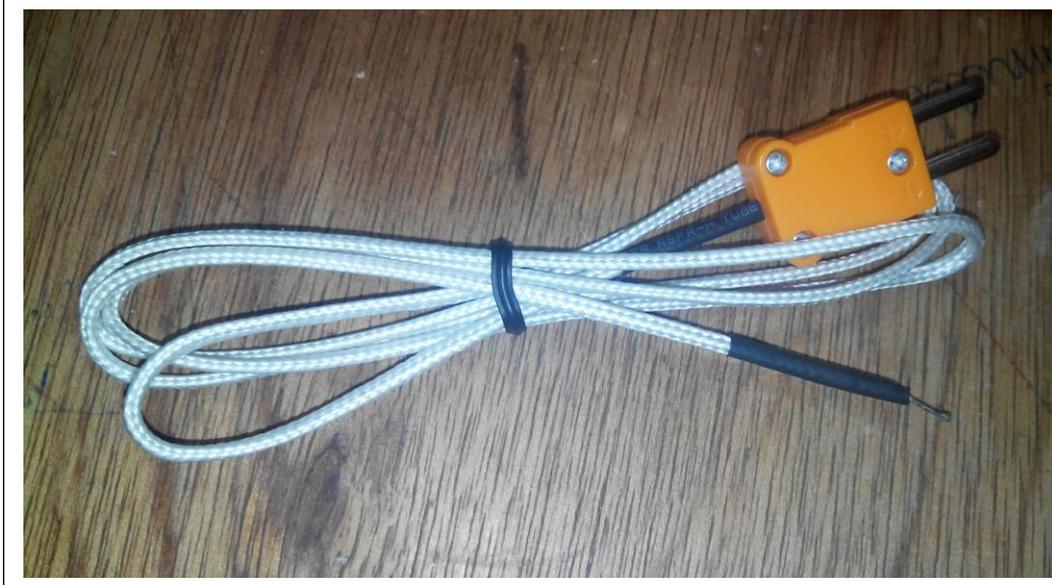


Fig III.13 : photographie d'un thermocouple Type K

Le capteur est équipé de 20 thermocouples. 15 thermocouples permettent de suivre la température du fluide caloporteur circulant dans le capteur, leur emplacement est montré sur la figure III.14. Deux thermocouples sont installés à l'entrée et à la sortie du tuyau d'alimentation du capteur et deux autres sont installés sur l'absorbeur et un 3^{ème} sur le vitrage, et enfin un dernier permet de suivre la température ambiante.

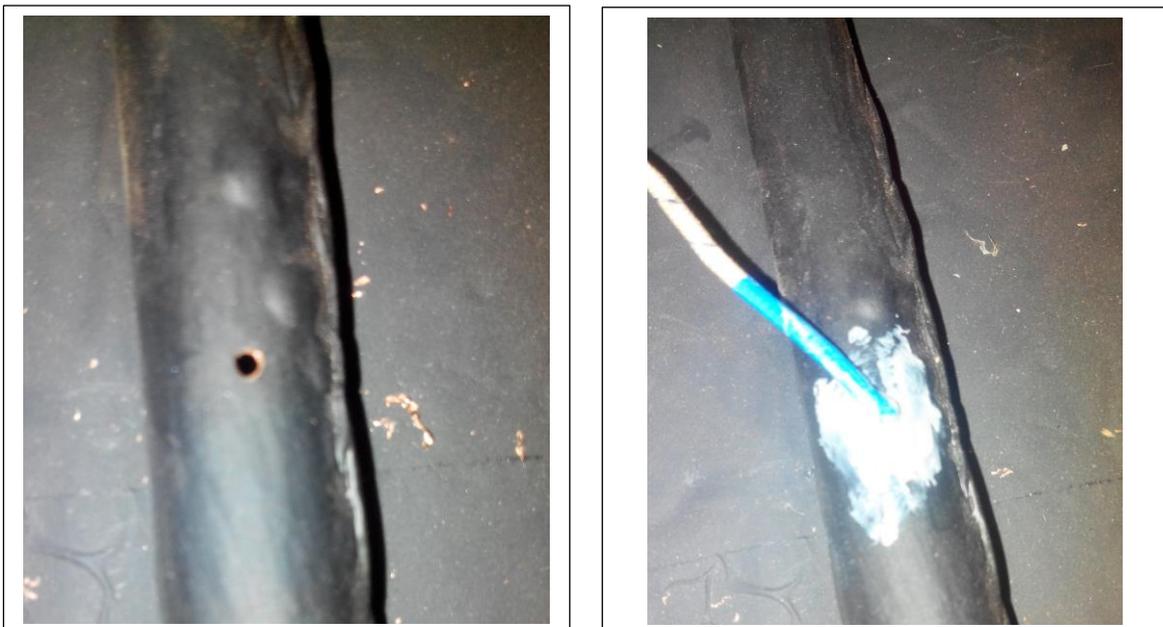


FigIII.14.A : l'emplacement des thermocouples



FigIII.14.B : Perçage de l'échangeur

L'installation des thermocouples s'est faite sur le capteur nu (c'est à dire non équipé de vitrage, d'isolant), ils sont collés sur le tube en cuivre à l'aider d'une colle jointe de moteurs (joint de culasse, carter, joint de pompes....) pour éviter des fuites du fluide; une fois tous les thermocouples installés, nous nous sommes chargés de finaliser le capteur. La figureIII.15 montre des photographies du capteur lors de la phase de l'installation des thermocouples.

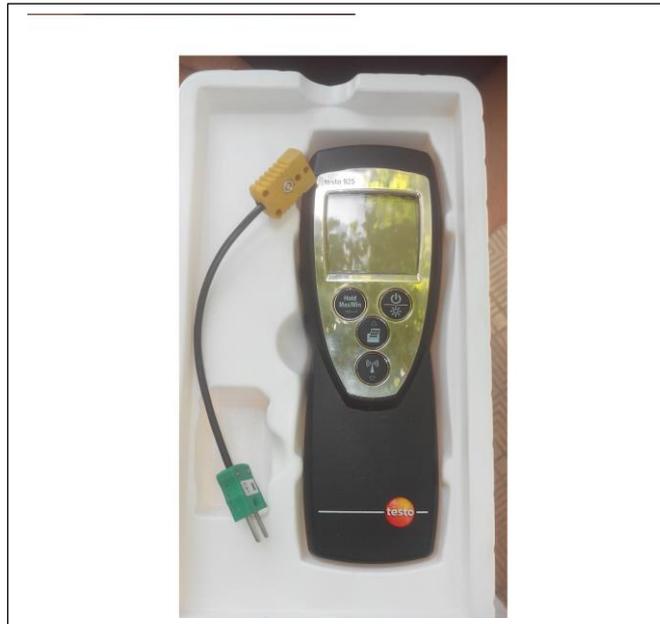


FigIII.15 : Photographies du tube lors de La colle des thermocouples

III-3-2-1-lecture des données :

On lis la distribution de la température avec un multimètre qui l'affiche directement sur l'afficheur, et on doit prendre les températures une a une.

Voilà une photo illustrant le multimètre figure III.16



FigIII.16 : Le thermomètre type TESTO

Analyse de l'erreur des mesures

Dans cette partie on va s'intéresser à l'analyse d'erreur lors des mesures de température. Ceci va nous permettre de quantifier l'incertitude de mesure relative aux mesures de températures réalisées durant la campagne expérimentale.

Selon l'ensemble de mesure du dispositif, les mesures d'erreur potentielle à tenir compte sont :

- Précision des thermocouples
- précision du multimètre qui donne la lecture

Pour l'estimation de l'erreur, notons par exemple ΔT l'écart type entre la valeur mesurée et la valeur vraie, une incertitude est donc donnée sous la forme ΔT

Précision des thermocouples :

Les thermocouples placés dans le capteur sont de type K, d'après les fabricants, ils ont une précision de $0,1^{\circ}\text{C}$ ou $0,75\%$ de la température

III-4-Les différents paramètres d'un capteur

III-4-1-Paramètres externes :

- Paramètres d'ensoleillement : éclairement énergétique du au rayonne soleil et à la durée d'insolation.
- la température extérieure.
- la vitesse du vent sur le capteur

III-4-2-Paramètres internes :

- Paramètres de position : l'inclinaison et l'orientation.
- Dimensionnement du capteur : L'épaisseur, la longueur, la largeur, et la surface réceptrice.
- La section de passage du fluide.

III-4-3-Paramètres de fonctionnement :

- La température d'entrée du fluide dans le capteur.
- Les températures des différentes parties du capteur.
- Le débit du fluide caloporteur.

III-5-Déroulement des expériences :

Les séries d'expériences ont été entreprises dans la cour prête du hall de l'atelier de mécanique au sein de la faculté de technologie. Diverses campagnes de mesures ont été effectuées, en faisant varier différents paramètres tels que :

- La variation de l'irradiation solaire
- La variation du débit de l'écoulement

Pour le changement de l'irradiation solaire c'est un paramètre qu'on ne peut pas le contrôler alors on a laissé le débit constant et pendant une journée claire et bien ensoleillée, et pour la variation du débit c quand l'ensoleillement est constant alors on a pris différentes valeurs à des intervalles de temps constant (chaque 30min).

III-6-Résultats et interprétation :

Ce tableau illustre les différentes températures prises pendant le période de test au niveau des différents points dans le capteur solaire plan.

Tableau III.2 : les températures prises au courant de la journée

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13
11h00	36,5	36,8	37,2	37,5	37,6	38	38,5	38,7	38,9	39,2	40	41,6	42
11H30	40	40,6	41	41,1	41,2	41,9	42,7	43,4	43,6	43,8	45,2	45,7	46,5
12H00	45,6	46	46,3	46,5	47	47,5	48,6	49	49,2	49,6	50	50,5	50,7
12H30	51,8	51,9	52	52,5	52,8	53,2	54,5	54,7	54,7	54,9	55,2	55,8	56,4
13H00	55	55,3	55,7	55,9	56	56,7	58	59,4	59,6	60	60,5	60,7	61
13H30	57,8	58	58,5	58,7	59	59,2	61,3	61,5	61,8	62	62,1	62,2	62,3
14H00	56,7	57	57,5	57,8	58	58,2	60,4	60,5	60,5	60,8	60,6	60,5	60,8
14H30	58	57,9	57,8	57,8	57,9	57,8	57,9	57,9	58	57,9	57,8	57,8	58

Nous allons calculer les pertes thermiques du capteur solaire en commençant avec les pertes vers l'avant en utilisant la méthode de KLEIN ; d'abord nous allons les calculer avec un I_c de 950w/m^2 puis avec un I_c de valeur 850w/m^2 et faire une comparaison entre les deux.

$$U_t = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_{p,m}} \left[\frac{T_{p,m} - T_a}{N + f} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right]^{-1} + \frac{\sigma(T_{p,m} + T_a)(T_{p,m}^2 + T_a^2)}{(\xi_p + 0.00591 \cdot N \cdot h_w)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.0133\xi_p}{\xi_g} - N}$$

III-6-1-Les pertes vers l'avant avec $I_c=950\text{w/m}^2$:

Avec les paramètres suivant :

$$T_a = 33^\circ\text{C} + 273.15 = 306.15 \text{ K}$$

$$T_{p,m} = 117.8^\circ\text{C} + 273.15 = 390.95 \text{ K}$$

$$\beta = 34^\circ \text{ (l'inclinaison du capteur)}$$

$$\xi_p = 0.9 \text{ (émissivité de l'absorbeur)}$$

$$\xi_g = 0.88 \text{ (émissivité du vitrage)}$$

$h_w = 5.67 + 3.86 V$ avec V La vitesse moyenne du vent dans la journée et elle est estimée à 0.0077m/s .

$$f = (1 + 0.089 h_w - 0.1166 h_w \xi_p) (1 + 0.07866 N) = 0.98$$

$$c = 520(1 - 0.000051 \beta^2) = 489.34$$

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_{p,m}}\right) = 0.32$$

Avec ses résultats nous obtenons $U_t = 5.690 \text{ w/m}^2\text{K}$

- **Les pertes vers l'avant avec $I_c=850\text{w/m}^2$:**

Tous les paramètres restent les même sauf e qui change parce que la température moyenne de l'absorbeur change, et e devient :

$$e = 0.43 \left(1 - \frac{100}{T_{p,m}}\right) = 0.30 \quad \text{avec} \quad T_{p,m} = 100.17^\circ\text{C} + 273.15 = 373.32 \text{ K}$$

$$T_a = 33^\circ\text{C} + 273.15$$

Donc les pertes deviennent : $U_t = 5.403 \text{ w/m}^2\text{K}$

- D'après les résultats obtenus des conductances thermiques (les pertes vers l'avant) par rapport à la variation de l'irradiation solaire, on constate que cette dernière varie peu.

On peut donc conclure que la conductance globale thermique du capteur est presque constante.

III-6-2- Les pertes vers l'arrière:

On utilise la méthode des résistances pour calculer les pertes vers l'arrière en utilisant la formule suivante :

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{\lambda}{L} \quad \text{Avec } L \text{ (épaisseur de l'isolant)}$$

Dans notre cas nous avons deux isolants dans le capteur le polyester et le bois, on calcule la résistance de chaque isolant seule puis on calcule la résistance équivalente :

$$R_b = \frac{e_b}{\lambda_b} = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0.14} = 0.0357 \text{ m}^2\text{c/w} \quad \text{avec } R_b \text{ (résistance du bois)}$$

$$R_p = \frac{e_p}{\lambda_p} = \frac{4 \cdot 10^{-2}}{0.039} = 1.025 \text{ m}^2\text{c/w} \quad \text{avec } R_p \text{ (résistance du polyester)}$$

$$R_{eq} = R_b + R_p = 0.0357 + 1.025 = 1.0607 \text{ m}^2\text{c/w}$$

Donc U_b deviennent :

$$U_b = \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{1.0607} = \mathbf{0.942 \text{ w/m}^2\text{c}}$$

III-6-3- Les pertes vers les côtés:

On utilise toujours la méthode des résistances pour calculer ces pertes et la fonction suivante nous permet de les calculés :

$$U_e = \left(\frac{\lambda}{L}\right) \frac{A_c}{A_l} = \frac{1}{R_{eq}} \left(\frac{A_c}{A_l}\right)$$

Avec : A_c (la surface du capteur) = $1.60 \cdot 0.9 = 1.44 \text{ m}^2$

A_l (la surface des côtés du capteur) = $(1.6 \cdot 0.25) \cdot 2 + (0.9 \cdot 0.25) = 1.25 \text{ m}^2$

$$R_b = \frac{e_b}{\lambda_l} = \frac{0.01}{0.14} = 0.071 \text{ m}^2 \text{°C/w}$$

$$R_p = \frac{e_p}{\lambda_p} = \frac{0.05}{0.039} = 1.282 \text{ m}^2 \text{°C/w}$$

$$R_{eq} = R_b + R_p = 0.071 + 1.282 = 1.353 \text{ m}^2 \text{°C/w}$$

$$U_e = \frac{1}{R_{eq}} \left(\frac{A_c}{A_l} \right) = \frac{1}{1.353} \left(\frac{1.44}{1.25} \right) = \mathbf{0.851 \text{ w/m}^2 \text{°C}}$$

III-7-Le rendement:

On calcule le rendement à différentes irradiances solaires, pour un $I_c = 950 \text{ w/m}^2$ et pour $I_c = 850 \text{ w/m}^2$.

$$\eta = \frac{Q_u}{I_c A_c}$$

En premier on commence par calculer la puissance utile Q_u :

$$Q_u = A_c [I_c \cdot \eta_o - U_t (T_{p,m} - T_a)]$$

- Pour $I_c = 950 \text{ w/m}^2$:

Le rendement optique : $\eta_o = 0,84$

$$Q_u = 1.44 [950 \cdot 0.84 - 5.69 (117.8 - 33)] = \mathbf{454.30 \text{ w}}$$

$$\eta = \frac{454.30}{950 \cdot 1.44} = \mathbf{33.20\%}$$

- Pour $I_c = 850 \text{ w/m}^2$:

$$Q_u = 1.44 [850 \cdot 0.84 - 5.40 (100.17 - 32)] = \mathbf{502.94 \text{ w}}$$

$$\eta = \frac{502.94}{850 \cdot 1.44} = \mathbf{40.45\%}$$

D'après les deux valeurs du rendement calculé pour une irradiation solaire 850 w/m^2 et 950 w/m^2 respectivement, on constate que le rendement en 850 w/m^2 est de 17.92% plus important que celle de la deuxième irradiation solaire.

Cela peut être expliqué comme suit :

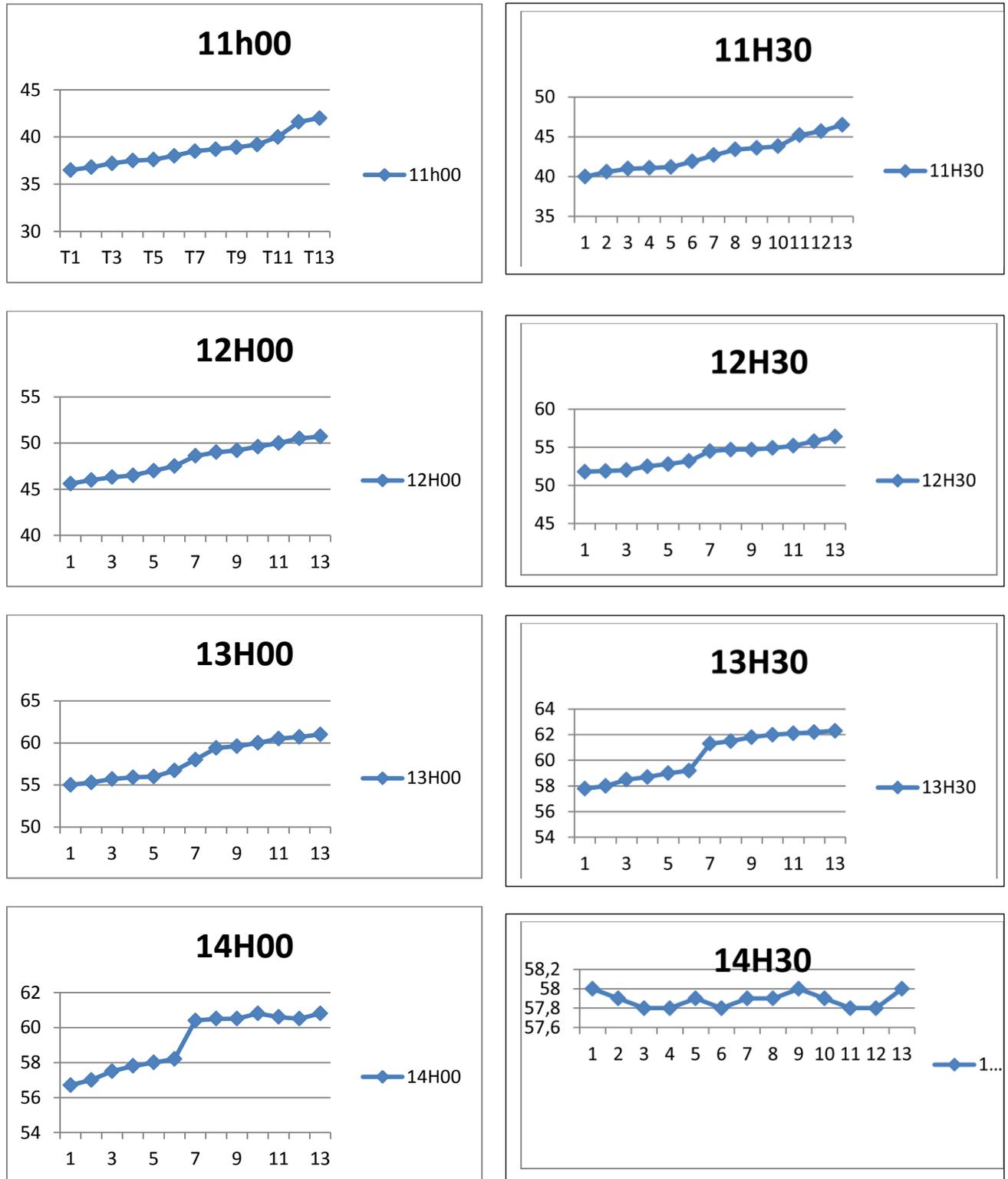
L'expression de la puissance utile contient deux termes, le premier concerne l'apport de l'irradiation solaire en tenant compte du rendement optique, c'est-à-dire la puissance nette au niveau de l'absorbeur. Le deuxième terme concerne les déperditions globales du capteur solaire. Si on augmente l'irradiation solaire alors la température de l'absorbeur augmente et par conséquent les pertes thermique du capteur augmentes et de ce fait, la puissance utile chute ce qui conduit à la chute du rendement du capteur.

- Evolution de la température du fluide caloporteur en fonction du temps :

La figure III.17 illustre l'évolution de la température du fluide caloporteur a différents instant de la journée.

L'évolution croissante de la température du fluide caloporteur pour les différents points choisi sur le capteur solaire à partir de 11h30 jusqu'à 13h00.

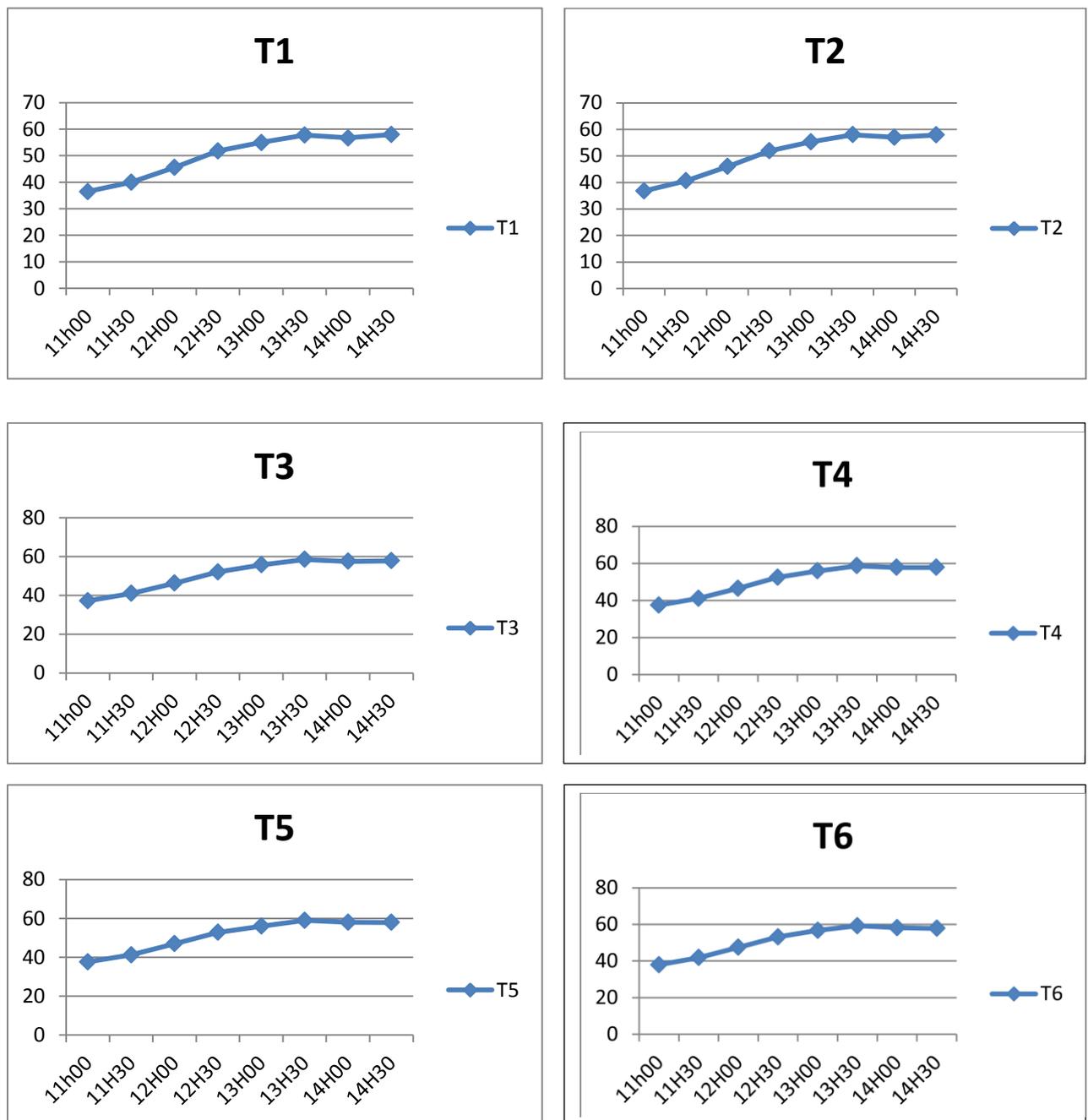
Cette température atteint un maximum de 60°C à 13h 30, et une bref instabilité de cette dernière entre 13h 30 et 14h 30



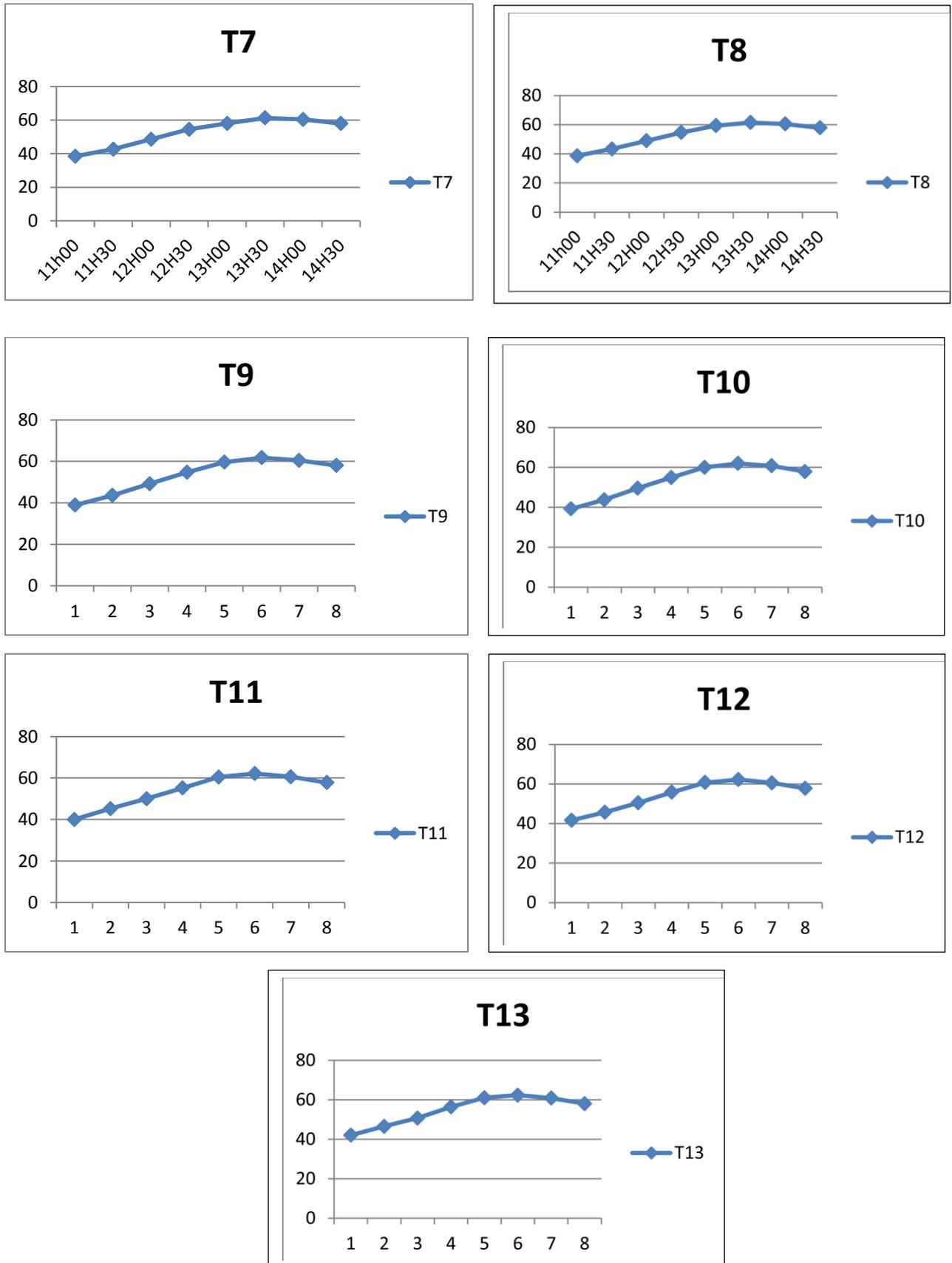
FigIII.17 : évolution de la température au cours du temps

Les (figures III.18 ; III.19) illustre le comportement de la température du fluide caloporteur en différents points du capteur

L'élévation de la température arrive a un maximum de $T=60^{\circ}\text{C}$ au niveau des points (T1, T2, T3, T4, T5, T6) figure III.18 et aussi au niveau des points (T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13) figure III.19.



figIII.18 : Evolution de la température de l'entré jusqu'au milieu du capteur



figIII.19 : l'évolution de la température du milieu jusqu'à la sortie du capteur

Conclusion générale

Ce travail a pour but la réalisation d'un capteur solaire plan a eau. Il a été réalisé au niveau de la faculté de technologie au sein de l'atelier de mécanique de l'université de Tlemcen.

Ce travail nous a permis d'étudier le comportement thermique du fluide caloporteur circulant à l'intérieur du capteur solaire et de déduire sa puissance et son rendement.

L'énergie thermique reçue est collectée et absorbée pour ensuite être utilisé au chauffage du fluide caloporteur pour l'utilisation.

Les quantités de chaleur récupérée par l'eau dépendent des bonnes performances et de la conception du capteur.

L'étude de l'influence du flux solaire sur les performances thermiques et par conséquent sur les températures prélevées en différents points du capteur consiste la partie importante de ce travail. Nous avons pu observer une augmentation de la température à l'intérieur du capteur jusqu'à 60°. Ce résultat pourrait être fortement augmenté en minimisent les pertes vers l'avant du capteur en éliminant les pertes par convection entre l'absorbeur et le vitrage en créant le vide.

D'après les résultats obtenus des conductances thermiques (les pertes vers l'avant) par rapport à la variation de l'irradiation solaire, on constate que cette dernière varie peu. On peut donc conclure que la conductance globale thermique du capteur est presque constante.

La température d'entrée été au début 19° elle atteint 35°C pendant une demi-heure au-delà, cette température varie peu pour atteindre 58°C ce qui conduit a conclure que le capteur solaire est à l'état de saturation et aucune augmentation

n'est constaté par la suite. Malgré cela, une différence de température de 06°c entre l'entrée et la sortie est toujours prélevée.

Bibliographie

- [1] Potentiel solaire en Algérie, bureau d'étude et réalisation (sundous), 2015.
- [2] **N. Yamani, K. Mohammedi et A. Khellaf**, le potentiel solaire algérien figure parmi l'un des plus importants au monde, portail algérien des énergies renouvelable CDER 2012.
- [3] Energie Renouvelable, wikipedia, 2015.
- [4] La plateforme du chauffe-eau solaire individuel en région Provence-Alpes-Côte d'Azur, vivonsolairenpacka.fr, cahier des charges, 2013.
- [5] **P. ROUX**, Cours de thermique, polycopier Université de Rennes 2006.
- [6] Division de l'énergie renouvelable et électrique, introduction aux chauffe-eau solaires, Ressources naturelles, Canada, 2000.
- [7] **Y. JANNOT**, Thermique solaire, janvier 2008.
- [8] **J.H. Watmuff, W.W.W Charters, D. Proctor**, Solar and wind induced external coefficients for solar collectors, Int. Revue d'Hellio-technique 2, 1977.
- [9] **S.sami, D. Lafri, A.Hamid et K. Larouci**, Etude du comportement thermique d'une installation de chauffage d'eau collective, Revue des Energies Renouvelables, pp 255-260, 1993.
- [10] **I. Grinberg**, L'aluminium. Un si léger métal, Edition la Découvertes Gallimard, 2003.
- [11] **A. Harmim**, Contribution à l'estimation des performances énergétiques de différents systèmes solaires en milieu Saharien, Thèse de Magister CDER 1994
- [12] **C. Cardonnel**: Solaire actif et passif (Conception, bilan thermique, habitat), Les éditions parisiennes, CFP Chaud Froid Plomberie, s.l., 1983

ملخص

من خلال عملنا هذا اردنا انجاز لاقط حراري مائي ثم دراسة خواصه من خلال الطاقة الملتقطة و الضائعة و المردود الطاقوي.

هذا الجهاز البسيط انجزناه يدويا علما أن كل التجارب المنجزة في جامعة التكنولوجيا.

رغم كل العراقيل و الصعوبات المادية و التقنية بالإضافة الى التغيرات الجوية تمكنا من انجاز و إتمام عملنا هذا بطريقة افضل ما يمكن للحصول على نتائج مرضية و مشرفة.

Résumé

Dans notre travaille nous avons voulue réalisé un capteur solaire a eau puis étudier ces performances (énergie reçue, pertes thermiques et le rendement), ce dernier a été fabriqué artisanalement au sein de la faculté de technologie et les essais ont été fait eux aussi au niveau de la faculté, nous avons eu beaucoup de contraintes météorologiques et techniques. Malgré tous, nous avons pu présenter un travail convenable et eu de bons résultats.

Abstract

In our work we want to create a water panel solar and study its performance (received energy, thermal losses and yield), it's was handcrafted within the Faculty of Technology and the and the tests were also made at the faculty, we had a lot of constraints meteorological and technical Despite all, we could have a decent job and had good results.