

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou

Faculté de génie de la construction

Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de master professionnel en génie mécanique

Option : Energétique

Spécialité : Energies Renouvelables

Thème :

Réalisation et caractérisation d'un capteur solaire thermique écologique



Réalisé par :

**SID Boualem*

**MAMOU Belkacem*

Proposé et dirigé par :

**Mr: N. LAMROUS*

2012/2013

R e m e r c i e m e n t s

A u t e r m e d e c e t r a v a i l n o u s t e n o n s à r e m e r c i e r e n p r e m i e r l i e u D i e u q u i n o u s a d o n n é l a f o r c e p o u r m e n e r à b i e n l ' é t u d e d e c e p r o j e t .

N o u s e x p r i m o n s n o s v i f s r e m e r c i e m e n t s à n o t r e p r o m o t e u r M ' N . L A M R O U S , e n s e i g n a n t à l ' i n s t i t u t d e G é n i e M é c a n i q u e d e T i z i - O u z o u d e n o u s a v o i r p r o p o s é l e s u j e t . O n t i e n t à l e r e m e r c i e r p o u r s a p r é c i e u s e a i d e , s a d i s p o n i b i l i t é e t s e s p r é c i e u x c o n s e i l s p o u r l ' é l a b o r a t i o n d e c e t r a v a i l .

N o s r e m e r c i e m e n t s s ' a d r e s s e n t a u s s i a u x p e r s o n n e l s d u h a l l t e c h n o l o g i q u e d u m ê m e i n s t i t u t d ' a v o i r m i s à n o t r e d i s p o s i t i o n t o u s l e m a t é r i e l n é c e s s a i r e à l a r é a l i s a t i o n d u p r o t o t y p e e t d e n o u s a v o i r s u i v i d e p r é s .

N o s r e m e r c i e m e n t s v o n t a u s s i à t o u s l e s e n s e i g n a n t s d e l ' i n s t i t u t d e G é n i e M é c a n i q u e d e n o u s a v o i r s u i v i s l e l o n g d e n o t r e c u r s u s u n i v e r s i t a i r e e n p a r t i c u l i e r M ' M . H A D I D e t M ' S . Z O U A O U I p o u r l e u r a i d e e t l e u r d i s p o n i b i l i t é à n o t r e é g a r d .

N o u s r e m e r c i o n s é g a l e m e n t l e p r é s i d e n t e t l e s m e m b r e s d u j u r y p o u r l ' h o n n e u r q u ' i l s n o u s f o n t e n j u g e a n t n o t r e t r a v a i l .

E n g u i s e d e r e c o n n a i s s a n c e , n o u s t e n o n s à e x p r i m e r n o t r e g r a t i t u d e e t n o t r e r e s p e c t l e p l u s s i n c è r e à m o n s i e u r M . S . O U R A D e t s o n f r è r e M o u m o u h e t à t o u s c e u x q u i o n t p a r t i c i p é d e p r é s o u d e l o i n à l a r é a l i s a t i o n d e c e t r a v a i l .

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mon très cher père qui m'a vraiment beaucoup aidé et soutenu à compléter mes études ;

A ma très chère mère ;

A mes grand-mères ;

A mes frères, Hamidouche et Hacene ;

A ma sœur Kenza ;

A toutes personnes qui m'ont aidé de près ou de loin.

M A M O U Belkacem

Je dédie ce travail à:

Mon très cher père et ma très chère mère auxquels je dois tout mon respect et que je ne remercierai jamais assez pour leurs soutiens, encouragements et conseils durant tout mon parcours universitaire.

Mes grand-mères et mon grand-père.

Mes chères sœurs.

Mes meilleurs et très chers amis.

S I D Boualem



Sommaire

Liste des figures.....	V
Liste des tableaux.....	VIII
Nomenclature	IX
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les capteurs	
I.1 Introduction	3
I.2 les différents types de capteurs solaires thermiques.....	3
I.2.1 Capteurs plans sans vitrage	3
I.2.2 capteurs plans vitrés.....	4
I.2.3 Capteurs solaires à tubes sous vide.....	4
I.2.4 Capteurs solaires paraboliques	7
I.2.5 Les capteurs stockeurs	7
I.3 Eléments de construction d'un capteur solaire plan vitré.....	8
• Plaque absorbante	8
• Le fluide caloporteur.....	9
• La couverture transparente.....	9
• L'isolation thermique.....	10
• Le coffre.....	10
I. 4 Applications à basse température	10
I.4.1 Eau chaude sanitaire	11
• Système direct	12
• Système à circulation forcée	13
I.4.2 chauffage des locaux.....	14
• Stockage par ballon d'eau	14
I.5 Conclusion	15

Chapitre II : Présentation du prototype de capteur étudié

II.1 Introduction	16
II.2 Fabrication du prototype de capteur étudié	16
II.2.1 Fabrication de l'absorbeur	17
a) Préparation des cannettes.....	17
b) Assemblage des cannettes	18
II.2.2 Fabrication des collecteurs	18
II.2.3 Réalisation du boîtier.....	21
II.2.4 Isolation	21
II.2.5 Dessins de définitions des éléments du prototype.....	21
II.3 Conclusion	24

Chapitre III : Modélisation

III .1 Introduction.....	25
III.2 Evaluation du gisement solaire	25
III.2.1 Paramètres de position	25
a) La latitude	24
b) La longitude	25
c) La déclinaison	26
d) L'angle horaire.....	26
e) La hauteur du Soleil.....	26
f) L'azimut	27
III.2.2 Paramètres de temps.....	27
a) Equation du temps ET	27
b) Le temps solaire vrai	28
c) Le temps solaire moyen TSM	28
d) Le temps du fuseau horaire TFH.....	28
e) Temps légal TL	28
III.2.3 composante du rayonnement solaire	29
III.2.4 Evaluation du rayonnement solaire sur un plan horizontal	30
III.2.5 Evaluation du rayonnement solaire sur un plan incliné	31
a) Angle d'incidence.....	31

b) Rayonnement direct.....	32
c) Rayonnement diffus.....	32
d) Rayonnement réfléchi par le sol.....	32
e) Rayonnement global.....	32
III.3 bilans thermiques et equations associés	34
III.3.1 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire plan vitré	34
III.3.2 Evaluation du facteur de transmission de la vitre	35
III.3. 3 Rendement du capteur.....	37
a) Bilan énergétique.....	37
b) Influence de la température de l'absorbeur	37
c) Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur.....	42
d) Evaluation de la température d'entrée du fluide dans le capteur	45
III.4 Conclusion	48

Chapitre IV : Expérimentation et validation du modèle mathématique.

IV.1 Introduction	49
IV.2 installation et instrumentation	49
IV.3 Mode opératoire	50
IV.4 Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentaux.....	52
• Interprétation des résultats	59
IV.5 Conclusion	60

Chapitre V : Simulation et résultats.

V.1 introduction	61
V.2 Présentation des résultats des simulations.....	61
V.2.1 Simulation du comportement du capteur au mois de juillet	61
• Interprétation des résultats	69
V.2.2 Influence du débit et de l'inclinaison sur le rendement et la température de sortie du capteur.....	69
V.2.3 Simulation des performances annuelles du capteur	70
• Commentaires.....	79

V.3 Rendement annuel du capteur	79
V.4 Considération économique du capteur	81
• Evaluation du coût de capteur	81
• Indice de rentabilité	83
• Délai de retour sur l'investissement	83
V.5 Conclusion	84
Conclusion générale.....	85
Bibliographie	XII
Annexes	XIII

Liste des figures

Figure I.1 : Vue en coupe d'un capteur plan sans vitrage.....	3
Figure I.2 : Vue en coupe d'un capteur plan avec vitrage.....	4
Figure I.3 : Vue en coupe d'un capteur solaire à tubes sous vide.....	5
Figure I.4 : Graphique schématique montrant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.....	6
Figure I.5 : Rendement comparatif entre le capteur sous-vide et le capteur plan vitré durant la période de l'année.....	6
Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.....	7
Figure I.7 : Capteurs stockeurs.....	8
Figure I.8 : schéma de principe d'une installation solaire basse température.....	11
Figure I.9 : Capteur solaire plan en toiture.....	12
Figure I.10 : schéma d'un système à thermosiphon.....	12
Figure I.11 : Système à circulation forcée.....	13
Figure I.12 : Schéma d'installation d'une chaudière en appoint d'un système solaire.....	14
Figure I.13 : schéma d'une installation de chauffage à eau.....	15
Figure II.1 : Image représentative du prototype réalisé.....	16
Figure II.2 : Opération de perçage des cannettes.....	17
Figure II.3 : Opération d'assemblage des cannettes.....	18
Figure II.4 : Découpage et perçage de la tôle des collecteurs.....	19
Figure II.5 : Réalisation des rebords sur la plaque métallique.....	19
Figure II.6 : Fabrication des collecteurs.....	20
Figure II.7 : Fixation des tubes sur les collecteurs.....	20
Figure II.8 : Schéma descriptif montrant l'assemblage des tubes aux collecteurs.....	20
Figure II.9 : Images représentatives de la construction du boîtier.....	21

Liste des figures

Figure II.10 : Schéma global représentant en coupes les différents éléments qui constituent le prototype réalisé.....	22
Figure III.1 : coordonnées terrestre d'un lieu donné.....	25
Figure III.2 : Passage d'un système de coordonnées à un autre.....	26
Figure III.3 : Variation annuelle de l'équation du temps.....	27
Figure III.4 : Rayonnement solaire arrivant sur un plan quelconque.....	31
Figure III.5: Réfraction d'un rayon lumineux à la traversée d'un dioptre séparant deux milieux de réfringence différente.....	35
Figure III.6 : Effet des multiples réflexions sur le facteur de transmission d'une vitre.....	36
Figure III.7 : schéma représentant les différents échanges thermiques intervenants dans le capteur.....	37
Figure III.8 : Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a	40
Figure III.9 : Droite du rendement d'un capteur solaire plan.....	42
Figure III.10 : schéma du capteur plan étudié.....	42
Figure III.11 : schéma servant à écrire le bilan thermique d'un volume élémentaire de fluide.....	44
Figure III.12: schéma servant à écrire le bilan thermique dans le réservoir.....	45
Figure IV.1 : Vue globale de l'installation.....	49
Figure IV.2 : Schéma descriptif du montage expérimental.....	50
Figure IV.3.6.9.12.15.18.21 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.....	52-58
Figure IV.4.7.10.13.16.19.22 : Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.....	52-58
Figure IV.5.8.11.14.17.20.23 : Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.....	53-59
Figure V.1.5.9.13.17.21.25: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.....	62-68
Figure IV.2.6.10.14.18.22.26: Evolution du rendement en fonction du temps.....	62-68
Figure IV.3.7.11.15.19.23.27: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre...	62-68

Liste des figures

Figure IV.4.8.12.16.20.24.28: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau..	62-68
Figure V.29 : Evolution du rendement instantané et de la température de sortie en fonction du débit à 12h30mn TSV (journée du 15 Juillet)	69
Figure V.30 : Evolution du rendement instantané et de la température de sortie en fonction de l'inclinaison à 12h30mn TSV (journée du 15 Juillet)	70
Figure V.31.35.39.43.47.51.55.59.63.67.71.75: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.....	71-78
Figure V.32.36.40.44.48.52.56.60.63.68.72.76: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.....	71-78
Figure V.33.37.41.45.49.53.57.61.64.69.73.77: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.....	71-78
Figure V.34.38.42.46.50.54.58.62.65.70.74.78: Evolution de la température de sortie pour différents angles d'inclinaison.....	71-78
Figure V.79 : Evolution du rendement annuel théorique en fonction de l'inclinaison.....	81

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Caractéristiques thermiques du prototype étudié.....	23
Tableau III.1 : Notations utilisées pour le rayonnement solaire sur un plan horizontal.....	29
Tableau IV.1 : Résultats expérimentaux pour le 15/07/2013.....	52
Tableau IV.2 : Résultats expérimentaux pour le 16/07/2013.....	53
Tableau IV.3 : Résultats expérimentaux pour le 17/07/2013.....	54
Tableau IV.4 : Résultats expérimentaux pour le 18/07/2013.....	55
Tableau IV.5 : Résultats expérimentaux pour le 19/07/2013.....	56
Tableau IV.6 : Résultats expérimentaux pour le 25/07/2013.....	57
Tableau IV.7 : Résultats expérimentaux pour le 28/07/2013.....	58
Tableau V.1 : Résultats obtenus par simulation pour le 15/07/2013.....	61
Tableau V.2 : Résultats obtenus par simulation pour le 16/07/2013.....	62
Tableau V.3 : Résultats obtenus par simulation pour le 17/07/2013.....	63
Tableau V.4 : Résultats obtenus par simulation pour le 18/07/2013.....	64
Tableau V.5 : Résultats obtenus par simulation pour le 19/07/2013.....	65
Tableau V.6 : Résultats obtenus par simulation pour le 25/07/2013.....	66
Tableau V.7 : Résultats obtenus par simulation pour le 28/07/2013.....	67
Tableau V.8 : Résultats des énergies et des rendements mensuels et annuels pour différents angles d'inclinaison.....	80
Tableau V.9 : Montant total « C » des composants du prototype.....	82

Nomenclature

Ø Lettres latines :

Symbole	Désignation	unité
A_0	Durée d'amortissement	Ans
a	Azimut d'un astre	(°)
b	Distance entre l'absorbeur et la vitre	mm
C^*	Constante solaire	W/m^2
C_p	Chaleur massique à pression constante	$J/Kg.K$
C_c	Coût total du capteur	
C_m	Coût de maintenance	
C_{mt}	Coût de main d'œuvre total	
C_p	Coût de perçage	
C_r	Coût de ramassage	
D	Energie solaire diffuse	$Wh/m^2.durée$
D^*	Puissance solaire diffuse	W/m^2
D_i	Diamètre intérieur	mm
E_u	Energie utile	KWh/m^2
F	Rendement d'irrigation	%
F_t	Facteur du transfert thermique	
G	Energie solaire globale	$Wh/m^2.durée$
G^*	Puissance solaire globale	W/m^2
h	hauteur du soleil	(°)
h_c	Coefficient d'échange convectif entre la paroi et le fluide	$W/m^2.K$
h_{CM}	Coefficient d'échange par convection mixte	$W/m^2.K$
h_{CN}	Coefficient d'échange par convection naturelle	$W/m^2.K$
hr_{p-v}	Coefficient d'échange par rayonnement paroi-vitre	$W/m^2.K$
$hr_{v-\infty}$	Coefficient d'échange par rayonnement vitre-ciel	$W/m^2.K$
i	Inclinaison du récepteur par rapport à l'horizontale	(°)
K	Conductance thermique surfacique	$W/m^2.K$
K_T	Indice de clarté	
L	Longitude	(°)
$\dot{M}$	Débit massique par unité de surface du capteur	$Kg/s. m^2$
$\dot{m}$	Débit massique du fluide caloporteur	Kg/s
P	Pas entre tuyauteries	mm
Q^*	Flux solaire absorbée par le capteur	W/m^2
Q_p	Pertes thermiques du capteur	W/m^2
Q_t	Flux thermique absorbé par le capteur nécessaire à la montée en température	W/m^2
Q_u	Flux utile transféré par le fluide caloporteur	W/ m^2
Q_v	Débit volumique	l/h
R	Résistance thermique surfacique	$m^2.K/W$
R^*	Puissance solaire réfléchiée par le sol	W/m^2
R_{ar}	Résistance arrière	$m^2.K/W$

Nomenclature

R_{av}	Résistance avant	$m^2.K/W$
S	Energie solaire directe, surface d'échange	$Wh/m^2.durée, m^2$
S^*	Puissance solaire directe	W/m^2
T_a	Température de l'air ambiant	$^{\circ}C$
T_{ee}	Température de l'eau à l'entrée du capteur	$^{\circ}C$
T_{es}	Température de l'eau à la sortie du capteur	$^{\circ}C$
T_{fe}	Température du fluide à l'entrée du capteur	$^{\circ}C$
T_p	Température de la paroi	$^{\circ}C$
T_v	Température de la vitre	$^{\circ}C$
T_{∞}	Température du ciel	$^{\circ}C$
V_v	Vitesse du vent	m/s

Ø Lettres grecques :

Symboles	Désignation	Unité
α_p^*	Absorptivité de la paroi du rayonnement solaire	
α_v^*	Absorptivité de la vitre du rayonnement solaire	
γ	Azimut du capteur	$(^{\circ})$
δ	Déclinaison du soleil, épaisseur de l'absorbeur	$(^{\circ}), mm$
Δ	Décalage administratif	heure
ε_p	Emissivité de la paroi	
ε_v	Emissivité de la vitre	
η	Rendement du capteur	%
θ	Angle d'incidence	$(^{\circ})$
λ	Conductivité thermique	$W/m.K$
μ	Viscosité dynamique	$Kg/m.s$
ν^*	Rendement optique du capteur	%
ρ	Masse volumique, réflectivité	Kg/m^3 ,
σ	Constante du Stefan-Boltzmann	$W/m^2.K^4$
τ_v^*	Transmittivité de la vitre du rayonnement solaire	
φ	Latitude du lieu considéré	$(^{\circ})$
ϕ	Flux de chaleur	W
χ	Périmètre mouillé de la conduite	m
ω	Angle horaire	$(^{\circ})$

Ø Indices :

Symboles	Désignation
a	Aire ambiant
ar	arrière
av	avant
c	Coucher du soleil, échange convectif entre la paroi et le fluide
CN	Convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre
CM	Convection mixte entre la vitre et l'air extérieur
ee	Eau à l'entrée du capteur

Nomenclature

es	Eau à la sortie du capteur
f	Fluide
fe	Fluide à l'entrée du capteur
L	Lever du soleil
P	Paroi, pertes thermique du capteur
r_{p-v}	Echange par rayonnement plaque absorbante-vitre
$r_{v-\infty}$	Echange par rayonnement vitre-ciel
u	Utile
v	Vitre, vent, volumique

Ø Abréviations :

Abréviations	Désignations
BR	Boîte de régulation
ECS	Eau chaude sanitaire
EF	Eau froide
ET	Equation du temps
IR	Indice de rentabilité
TFH	Temps du fuseau horaire
TL	Temps légal
TSM	Temps solaire moyen
TSV	Temps solaire vrai
TU	Temps universel
VMC	Ventilation mécanique contrôlée

Introduction générale

L'énergie a toujours constitué un enjeu vital pour l'homme et les sociétés humaines. Les comportements humains sont fortement induits par sa disponibilité ou sa non-disponibilité, son abondance ou sa pénurie. De ces comportements vont découler de nouveaux enjeux, en particulier pour l'environnement et les équilibres socio-économiques. La prise de conscience de l'importance de ces enjeux (réchauffement climatique, épuisement des ressources, augmentation des coûts de la santé, ...) devrait, nous l'espérons, permettre de tendre vers une utilisation plus rationnelle de l'énergie, une optimisation des processus énergétiques que nous mettons en œuvre tous les jours.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres. L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes.

Au vu de l'étude bibliographique que nous avons menée sur ce thème, nous avons recensé une multitude de dispositifs permettant l'exploitation de l'énergie solaire et qui donnent des résultats très encourageants.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à une application de l'énergie solaire dans le domaine de la thermique, utilisant un capteur solaire pour la production d'eau chaude sanitaire.

L'originalité de notre capteur est dans le fait que les conduits de fluide caloporteur, constituant également la surface absorbante, sont fabriqués à partir des canettes du commerce. Ces emballages perdus de boissons fort prisées, nous les retrouvons malheureusement en abondance sur les bas-côtés de nos routes, jetées dans la nature, polluant l'environnement enchanteur de nos contrées.

Celles que nous avons utilisées pour fabriquer le capteur proviennent d'une opération de ramassage dans la nature, un geste à la portée double : nettoyer et rendre utile, donner une seconde vie aux canettes pour produire une énergie propre...

Pour mener cette étude que nous considérons comme une contribution écothermique de notre part, nous avons commencé par un premier chapitre consacré à la théorie des capteurs solaires thermiques. Nous faisons une revue des différents types de capteurs, en citant les applications les plus répandus parmi les applications à basse et moyenne température.

Dans le deuxième chapitre, nous exposons de manière détaillée, les différentes étapes que nous avons suivies pour réaliser le prototype de capteur, à commencer par le traitement

des canettes- perçage, collage et teinture-, puis l'assemblage des différents éléments du capteur.

Le troisième chapitre sera consacré à l'élaboration d'un modèle de calcul numérique des performances du capteur.

Après avoir installé le capteur sur le toit du campus de l'université de Hasnaoua II, nous avons mené une campagne de mesures dans laquelle nous déterminons les performances techniques du capteur, notamment le rendement et la température du fluide caloporteur.

C'est sur ces mesures, et la comparaison avec les résultats des calculs de performances, que nous nous sommes appuyés pour valider le modèle théorique. C'est précisément l'objet du quatrième chapitre.

Après sa validation nous allons utiliser ce modèle pour déterminer les performances du capteur sur toute l'année. Ce travail de simulation permettra principalement d'étudier l'influence du débit sur le rendement du capteur et de trouver l'inclinaison la plus favorable en utilisation annuelle sur le site de Tizi Ouzou.

Nous terminerons cette étude par une évaluation économique du projet et une conclusion générale.

I.1 Introduction :

Le capteur solaire thermique est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur. Il combine deux principes physiques : l'effet de serre et le corps noir.

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour :

- Activer la croissance des végétaux.
- Chauffer les locaux et fournir l'eau chaude sanitaire.
- Sécher les grains et les fourrages
- Faire fonctionner des moteurs thermiques.
- Alimenter des machines de réfrigération.
- Distiller des eaux saumâtres...etc.

I.2 les différents types de capteurs solaires thermiques :

I.2.1 Capteurs plans sans vitrage : [6]

Les capteurs plans sans vitrage (**Fig.I.1**), sont ordinairement faits de plastique polymère noir. Normalement, ils n'ont pas de revêtement sélectif et n'ont ni cadre ni isolation en arrière. Ils sont simplement posés sur un toit ou sur un support en bois. Ces capteurs de faible coût captent bien l'énergie solaire, cependant les pertes thermiques vers l'environnement augmentent rapidement avec la température de l'eau, particulièrement dans les endroits venteux. En conséquence, les capteurs sans vitrage sont couramment utilisés pour des applications demandant une fourniture d'énergie à basse température (piscines, eau d'appoint en pisciculture, chaleur industrielle, etc.); dans les climats froids, ils sont habituellement utilisés exclusivement durant l'été à cause de leurs pertes thermiques élevées.

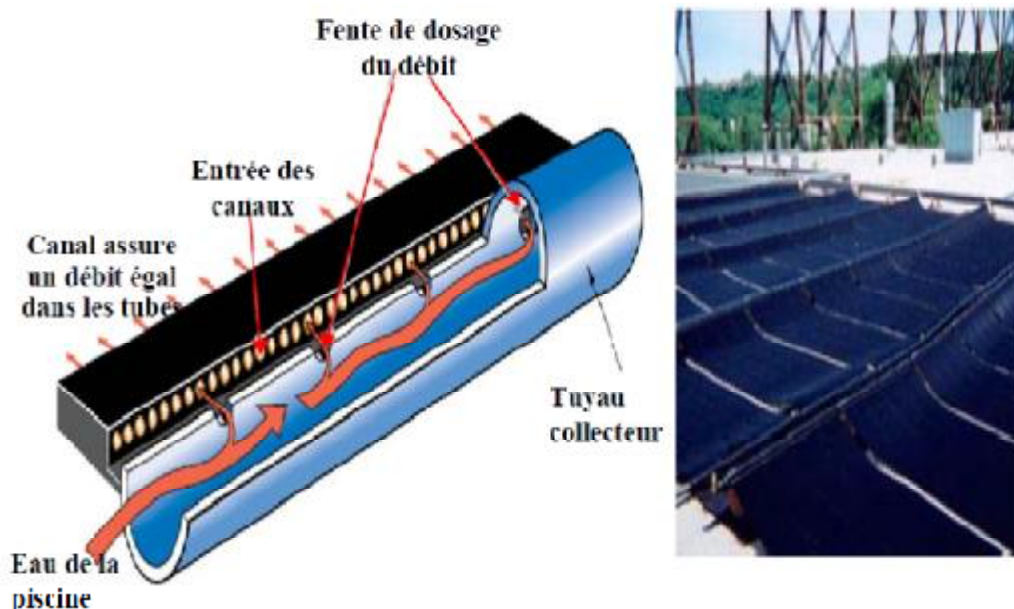


Figure I.1 : Vue en coupe d'un capteur plan sans vitrage.

I.2.2 capteurs plans vitrés :

Dans les capteurs plans avec vitrage, une plaque absorbante, qui souvent est recouverte d'un revêtement sélectif, est fixée dans un cadre entre un vitrage simple ou double et un panneau isolant placé à l'arrière (**Fig.I.2**).

L'énergie solaire est ainsi emprisonnée dans le capteur à cause du vitrage (effet de serre). Ces capteurs sont couramment utilisés pour des applications à températures modérées (chauffage de l'eau sanitaire, chauffage de locaux, chauffage de piscines et chauffage pour procédés industriels).

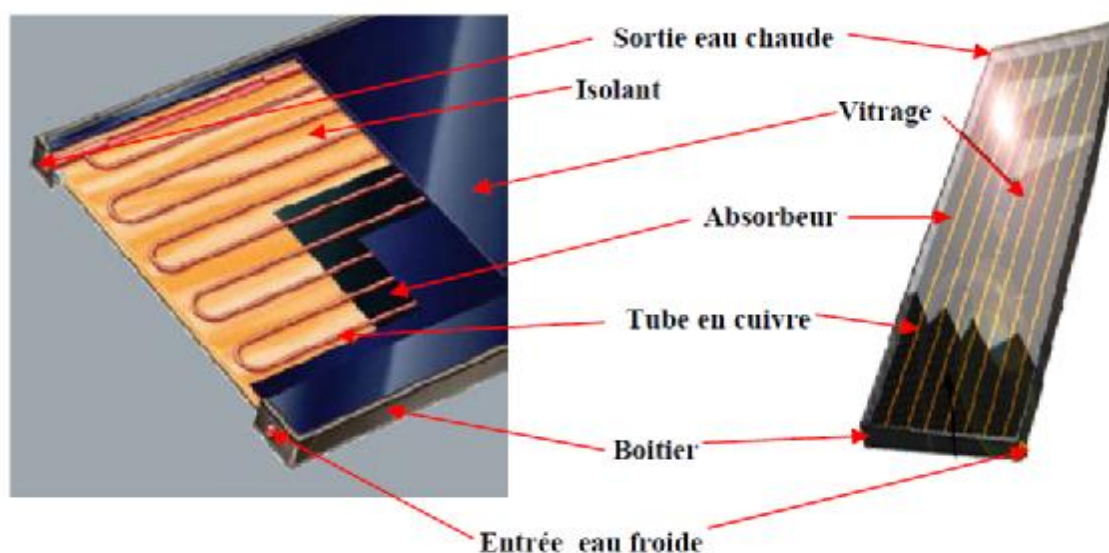


Figure I.2 : Vue en coupe d'un capteur plan avec vitrage.

I.2.3 Capteurs solaires à tubes sous vide :

Les capteurs solaires à tubes sous vide (**Fig.I.3**), comportent un absorbant revêtu d'une surface sélective et enfermé sous vide dans un tube en verre. Ils captent bien l'énergie solaire et leurs pertes thermiques vers l'environnement sont extrêmement faibles. Les systèmes présentement sur le marché utilisent un caloduc pour extraire la chaleur de l'absorbant (un liquide se vaporise au contact de l'absorbant chaud, la chaleur est récupérée dans la tête du tube lorsque la vapeur s'y condense et le condensat, retourne par gravité à l'absorbant). Les capteurs sous vide sont bien adaptés aux applications requérant la fourniture d'énergie à des températures moyennes ou hautes (eau chaude domestique, chauffage de locaux et applications de chauffage industriel dans des gammes de températures de 60 °C à 80 °C, selon la température extérieure), en particulier dans les climats froids.

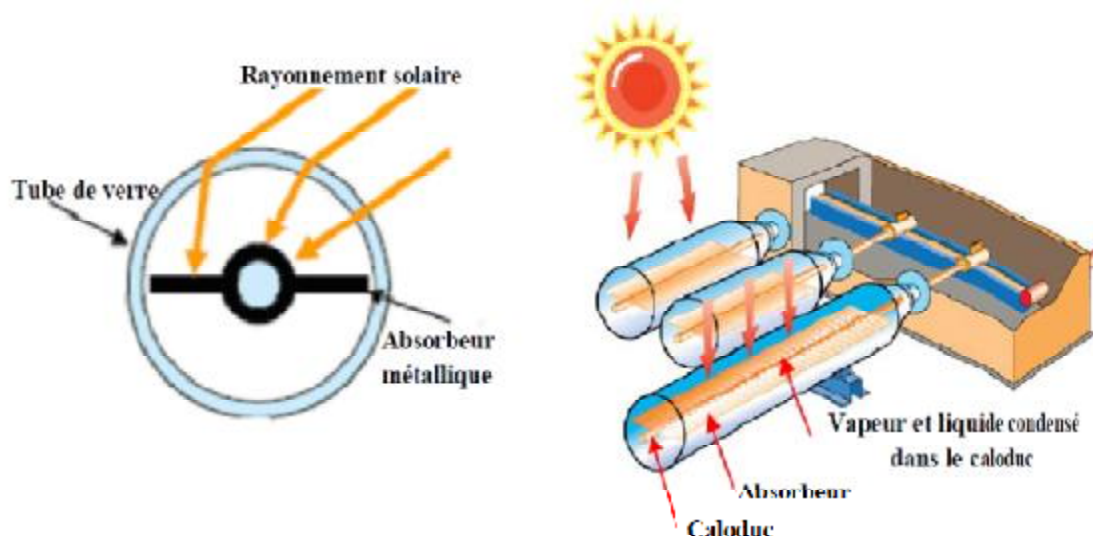


Figure I.3 : Vue en coupe d'un capteur solaire à tubes sous vide.

v Comparaison entre capteur solaire sous-vide et capteur solaire plan : [7]

Les panneaux solaires **NOVA 1710T** sont des capteurs solaires qui font partie de la famille des capteurs sous vide. Ces capteurs ont les avantages suivants :

- Rendement supérieur : 80 % du rayonnement absorbé. Les déperditions sont quasiment nulles grâce au vide d'air dans les tubes. Les capteurs plans ont les mêmes capacités d'absorption mais les pertes sont beaucoup plus importantes.
- L'absorption solaire n'est pas modifiée par l'angle d'attaque du soleil étant donné que les tubes sont ronds. Les capteurs sous vide sont donc efficaces du matin au soir. Les capteurs plans sont très efficaces lorsque le soleil est dans l'axe du vitrage mais cela ne représente que quelques heures par jour.
- Un réflecteur peut être installé afin d'augmenter la surface d'absorption.
- Capacité à produire de très hautes températures très rapidement (80°C et plus) alors que les capteurs plans plafonnent à 50-60 ° C (Voir graphique). Cela a plusieurs implications :
 - Volume de stockage inférieur.
 - Possibilité de chauffer une maison avec des radiateurs classiques qui fonctionnent à hautes températures.

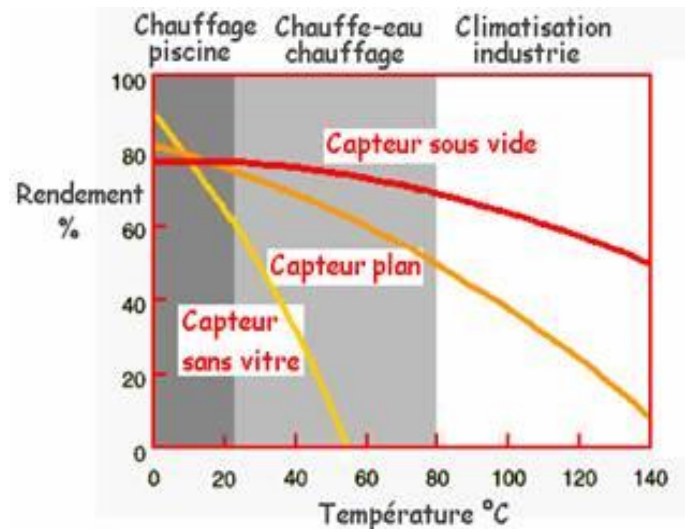


Figure I.4 : Graphique schématisant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.

- La performance des capteurs sous vide dépendent très peu de la force du vent et de la température extérieure.
- Selon les données techniques et les tests qui ont été faits, un capteur solaire sous vide a un rendement supérieur de 30% à un panneau solaire "plan". De plus, un capteur sous vide monte en température très rapidement. Par conséquent, même avec quelques heures de soleil, le capteur sous vide sera en mesure de chauffer l'eau alors que le capteur plan standard n'aura quasiment rien capté.
- Même par une journée couverte, les capteurs sous vide vont capter la luminosité et donc chauffer.

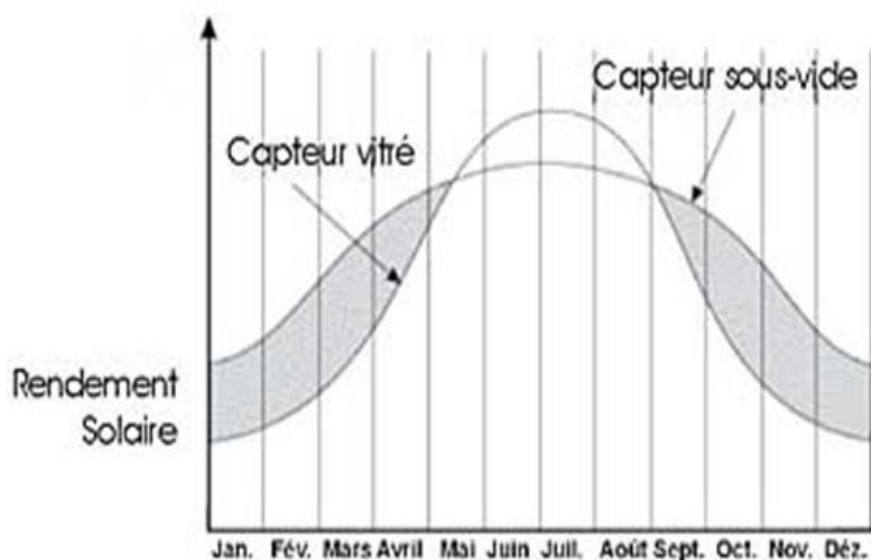


Figure I.5 : Rendement comparatif entre le capteur sous-vide et le capteur plan vitré durant la période de l'année.

- Selon le schéma ci-dessus, on peut constater que pendant les périodes d'hiver où l'énergie demandée est la plus importante, les capteurs solaires sous vide ont un rendement presque double par rapport au panneau solaire "plan".

I.2.4 Capteurs solaires paraboliques : [4]

Le miroir parabolique réfléchit les rayons du soleil vers un point de convergence, le rayonnement solaire est alors concentré sur le récepteur qui monte en température.

Le récepteur en question est un moteur Stirling qui fonctionne grâce à la montée en température et en pression d'un gaz contenu dans une enceinte fermée.

Ce moteur convertit l'énergie solaire thermique en énergie mécanique et ensuite en électricité.

Tout au long de la journée, le socle de la parabole s'oriente automatiquement face au soleil pour suivre sa course et ainsi profiter d'un ensoleillement maximum.

Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre 1 000 °C sur le récepteur, et parvenir à des rendements optimaux de conversion de l'énergie solaire en électricité en utilisant une faible quantité d'énergie.

La performance de l'ensemble du système est étroitement liée à la qualité optique de la parabole et au rendement du moteur Stirling.

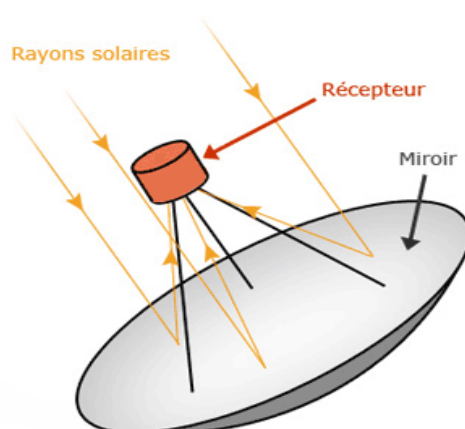


Figure I.6 : Principe de fonctionnement d'un capteur à miroirs paraboliques.

I.2.5 Les capteurs stockeurs :

Les capteurs stockeurs, comme leur nom l'indique, sont des ensembles qui cumulent les fonctions de captage et de stockage de l'énergie solaire. Le mur « trombe » est une application connue de ce principe.

La fonction de stockage permet une autonomie de l'ordre de la journée et se fait dans des matériaux ayant une forte capacité thermique. Ces capteurs, souvent artisanaux, sont relativement peu répandus et servent principalement pour la production d'eau chaude sanitaire ou le chauffage des maisons (mur trombe). On trouve également certains capteurs qui

fonctionnent comme un plancher chauffant « à l'envers » : une dalle en béton capte et accumule l'énergie solaire et la restitue à un fluide caloporteur circulant dans des tubes noyés dans le béton.

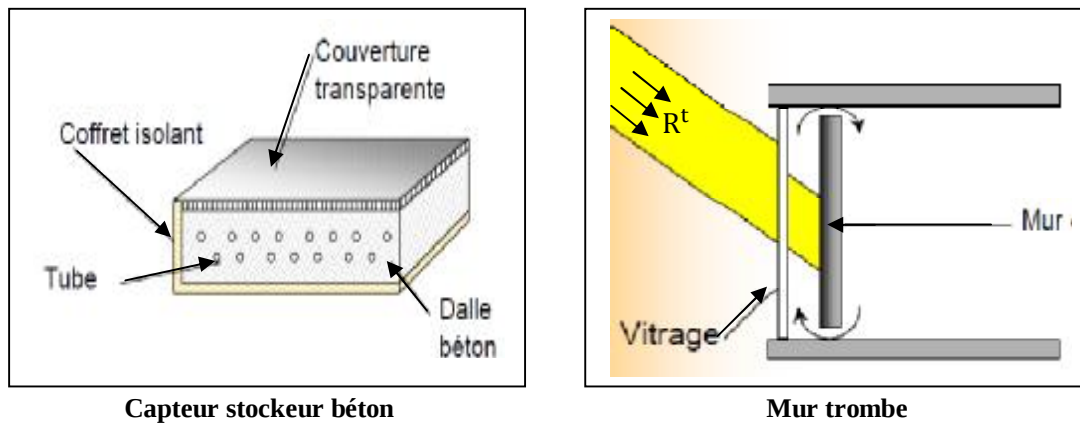


Figure I.7 : Capteurs stockeurs.

I.3 Eléments de construction d'un capteur solaire plan vitré : [5]

Comme on l'a vu précédemment (**figure I.2**), un capteur solaire plan vitré est constitué de plusieurs éléments tel que :

- **Plaque absorbante :**

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur.

Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique (annexe A), laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur. Tel est le cas de l'eau d'une piscine.

Comparées aux métaux, l'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables:

Les avantages sont :

- ü La légèreté.
- ü La possibilité de teinter le produit dans la masse et donc de ne pas craindre les rayures.
- ü La faible sensibilité des plastiques à la corrosion.

Les inconvénients sont :

- ü Une mauvaise conductibilité thermique.
- ü Un vieillissement dû au rayonnement U.V.
- ü Une tenue médiocre aux températures élevées.

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

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

- **Le fluide caloporteur :**

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques : il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau, à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol), ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants :

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

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

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

- **La couverture transparente :**

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse (annexe A).

L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C, en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques radiatives vers l'avant de l'absorbeur. En effet c'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R.

Lorsque le capteur est exposé au rayonnement solaire, la couverture laisse passer le rayonnement solaire composé de 42% de rayonnement visible. Ce rayonnement va être transmis à l'absorbeur, lequel va s'échauffer. A son tour, il va émettre un rayonnement I.R. pour lequel la transmittivité de la vitre est faible. Ne pouvant ainsi s'échapper du capteur, ces radiations seront en partie absorbées par la vitre, qui s'échauffe et en partie réfléchies vers la plaque et contribuer quelque peu à son échauffement.

L'utilisation de la couverture transparente évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent.

- **L'isolation thermique :**

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, convection et par rayonnement, des différentes parties périphériques vers l'extérieur. Les solutions adaptées sont les suivantes :

Partie avant de l'absorbeur

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2 à 3 cm.

Parties arrière et latérale

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

- **Le coffre**

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

I. 4 Applications à basse température : [1]

Les applications à basse température sont : le chauffage d'habitation, de piscine, la production d'eau chaude sanitaire, la climatisation des locaux, la distillation des eaux saumâtres et le séchage des produits agricoles.

Les installations solaires de ce type comportent en général cinq éléments de base comme représentés à la figure suivante :

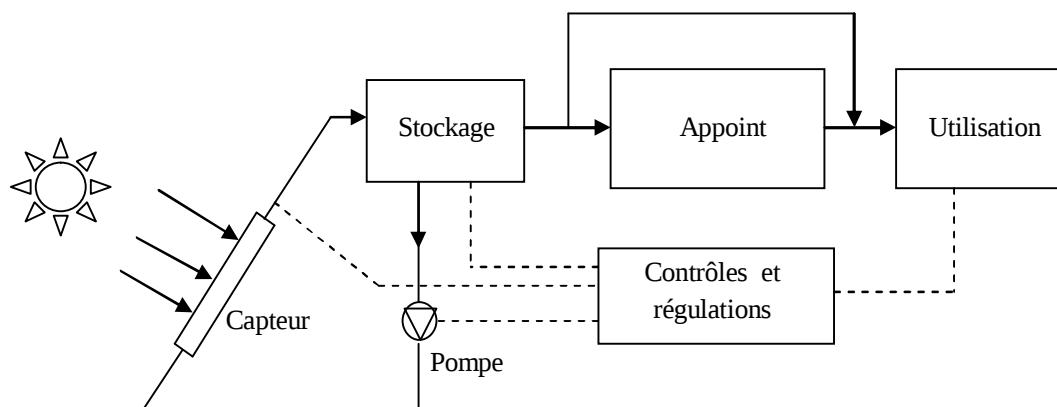


Figure I.8 : schéma de principe d'une installation solaire basse température.

Pour certaines applications il n'est pas nécessaire d'utiliser et/ou de prévoir un système fournissant de l'énergie d'appoint.

Dans la plupart des cas les paramètres climatiques à prendre en compte sont : l'irradiation solaire, les caractéristiques de l'air ambiant (température, humidité) et celles de l'eau du réseau.

I.4.1 Eau chaude sanitaire :

Une des applications principales de l'énergie solaire basse température est le chauffage d'eau chaude sanitaire en vue d'un usage domestique. La température de l'eau chaude sanitaire est en effet relativement réduite (60°C environ) et les capteurs solaires plans conviennent bien à ce type de production d'eau chaude.

On trouve principalement deux sortes d'installations : le système à thermosiphon (ou direct) et le système à circulation forcée. Notons qu'il n'est pas nécessaire, dans les régions fortement ensoleillées, de réaliser un système avec un matériel spécialisé. Un simple réservoir cylindrique placé en toiture et peint de couleur foncé peut servir à la fois de capteur solaire et de stockage d'eau chaude. Une arrivée d'eau froide et un départ d'eau chaude vers l'utilisation suffisent.



Figure I.9 : Capteur solaire plan en toiture

- **Système direct :**

Dans ce système, simplifié à l'extrême, c'est l'eau chaude sanitaire (ECS) qui circule elle-même dans le capteur. Cette circulation s'effectue par thermosiphon : l'eau en passant dans le capteur s'échauffe et devenant moins dense, crée une dépression qui aspire l'eau plus dense qui entre dans le capteur. Il faut veiller cependant à ce que la perte de charge du circuit ne soit pas trop importante. Un tel système est schématisé à la figure I.9.

Ce système impose d'installer le ballon de stockage plus haut que le capteur. Celui-ci étant souvent placé en toiture, le ballon de stockage devient le point le plus haut de l'habitation ce qui n'est pas nécessairement recherché. Cette contrainte peut en effet être inacceptable pour des raisons esthétiques.

Pour éviter les pertes thermiques en ligne, il faut veiller à réduire les distances séparant les différents organes. Une bonne isolation thermique des canalisations est recommandée. Il ne faut pas oublier de prévoir un vase d'expansion pour encaisser les variations de volume de l'eau du circuit avec la température.

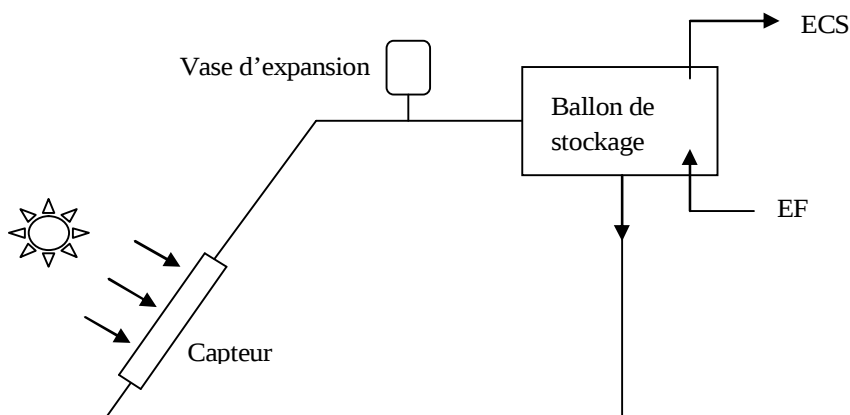


Figure I.10 : schéma d'un système à thermosiphon

Un tel système a pour avantage principal sa simplicité mais on doit faire attention au risque d'entartrage des canalisations qui sont parcourues par de l'eau ne pouvant être traitée. Pour cette même raison il faut veiller à vidanger le circuit lors des périodes de gel. Si ces contraintes sont trop gênantes, il faut prévoir un échangeur de chaleur dans le ballon de stockage. Or la circulation par thermosiphon ne peut fournir des débits élevés, ce qui limite l'efficacité de l'échangeur.

Un inconvénient de ce système est qu'on ne peut pas régler le débit du fluide caloporteur, celui-ci influe sur la température de sortie de fluide caloporteur et par suite sur le rendement de l'installation.

- **Système à circulation forcée :**

Dans ce système, l'eau qui circule dans le capteur est différente de l'eau chaude sanitaire. On peut donc traiter le fluide caloporteur avec un antigel, un anticorrosif, un antifongique. En contrepartie, un échangeur de chaleur est nécessaire.

Un avantage de ce système est la possibilité d'obtenir dans le ballon de stockage une stratification des couches d'eau à température différentes, les couches les plus chaudes étant bien sûr en partie haute.

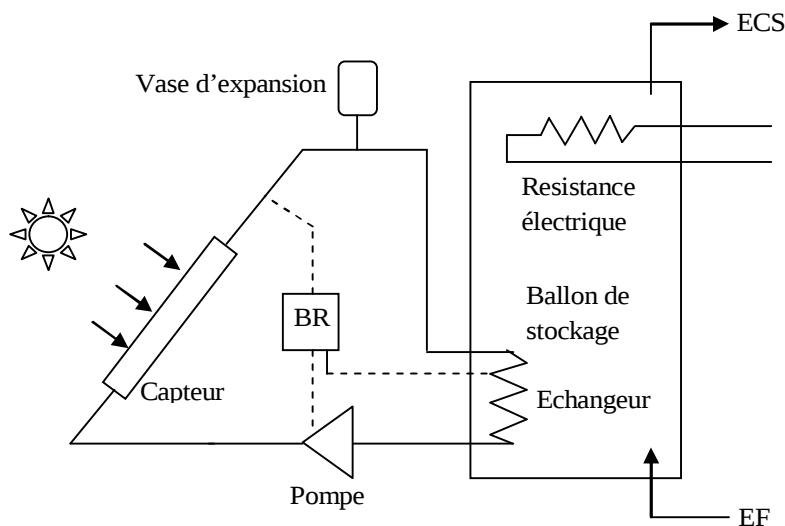


Figure I.11 : Système à circulation forcée

Si une énergie d'appoint s'avère nécessaire, elle devra être apportée en partie haute du stockage. On peut installer ou utiliser une chaudière déjà existante en la plaçant en aval de l'installation solaire. Elle sert à remonter la température de l'eau chaude du ballon selon les besoins.

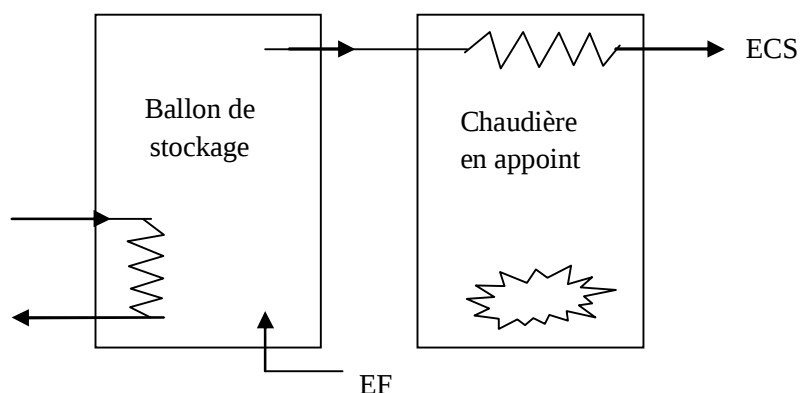


Figure I.12 : Schéma d'installation d'une chaudière en appoint d'un système solaire.

Dans tous les cas une étude économique s'avère nécessaire pour dimensionner la batterie de capteur ainsi que la chaudière d'appoint, dans le cas d'une création complète d'un système de chauffage.

I.4.2 chauffage des locaux :

Si le système de chauffage nécessite des pièces mobiles (ventilateur, pompe électrovanne...) on parlera de système actif. Un tel système nécessite une énergie autre que le solaire ; en général celle-ci est électrique vu sa souplesse d'utilisation. Quand la seule énergie est celle du soleil, on parle de système passif.

Pour le chauffage d'habitation, le fluide caloporteur est soit l'air, soit l'eau. L'air est utilisé principalement dans les systèmes passifs. On peut en effet se passer facilement d'énergie auxiliaire pour le mouvoir. L'air est chauffé par les capteurs puis envoyé directement dans les pièces d'habitation. Le stockage de l'énergie se fait alors par l'échange d'un matériau solide (mur en béton, lit de pierres,...). Il peut cependant être intéressant de recourir à des ventilateurs pour créer une circulation forcée ; les puissances mises en jeu sont toujours faibles, de l'ordre de celles nécessaires au fonctionnement d'une VMC (Ventilation Mécanique Contrôlée).

L'utilisation de l'eau nécessite un échangeur. Son avantage réside dans le volume de stockage nécessaire, beaucoup plus faible qu'avec l'air. Dans ce cas, on trouvera sur le circuit, une ou plusieurs pompes, des électrovannes, etc.

- **Stockage par ballon d'eau :**

Le schéma de principe d'une telle installation est donné à la figure I.12. Les capteurs solaires chauffent l'eau de stockage par l'intermédiaire d'un échangeur de chaleur. Cette disposition permet de traiter l'eau qui circule dans les capteurs. Un appoint est souvent nécessaire en zone tempérée. Quant à l'échangeur stockage-habitation, il doit avoir la plus grande surface possible afin de minimiser l'écart de température entre l'eau (T_{st}) provenant du ballon de stockage et l'air (T_i) de la maison. Chauffer à basse température améliore le confort. D'autre part le rendement des capteurs est d'autant meilleur que l'écart de

température ($T_{ee} - T_a$) entre la température de l'eau à l'entrée des capteurs et celle de l'air extérieur est faible. Or en première approximation $T_{ee} \approx T_{st}$. Il faut donc avoir T_{st} la plus basse possible.

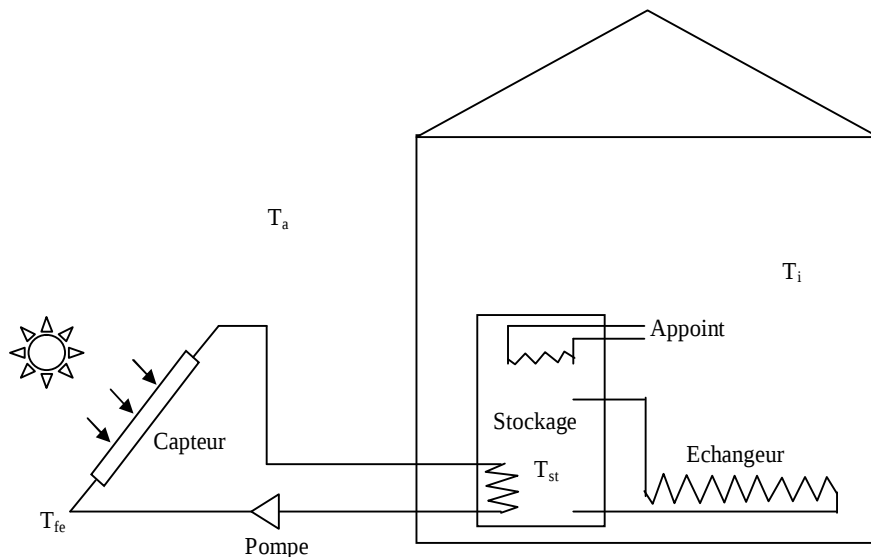


Figure I.13 : schéma d'une installation de chauffage à eau.

La gestion de l'énergie doit favoriser le solaire, l'appel à une énergie d'appoint devant être minimisé. Le stockage sert de tampon journalier et permet de fournir la nuit le surplus d'énergie solaire stockée, le cas échéant, durant la journée. Accroître le volume de l'eau du stockage permet de diminuer la température maximale atteinte par l'eau durant une journée très ensoleillée et donc, comme on vient de le voir, d'améliorer le rendement des capteurs. La température de l'eau du stockage doit cependant être supérieure ou égale à une température minimale qui permet de transmettre convenablement la chaleur de l'échangeur à l'air de la maison à T_i .

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types de capteurs solaires thermiques et détaillé les différents éléments de construction d'un capteur plan vitré, en spécifiant le rôle joué par chacun de ces éléments dans le captage et la conversion de l'énergie solaire.

Nous avons également fait la revue des applications les plus répandus parmi les applications de l'énergie solaire à basse et moyenne température en expliquant le fonctionnement de ces installations.

II.1 Introduction :

Ce chapitre sera consacré à la présentation du prototype de capteur étudié, dont nous allons préciser avec détails les différentes étapes de réalisation et d'assemblage de tous les éléments constitutifs.

La présente réalisation concerne un modèle expérimental de capteur solaire thermique en vue de son utilisation dans une installation de chauffage d'habitation ou encore de chauffe eau solaire. Le choix des différents matériaux a été fait en fonction de leur :

- ü Impact positif sur l'environnement (récupération des cannettes jetées dans la nature).
- ü Disponibilité sur le marché.
- ü Possibilité technique de fabrication.

II.2 Fabrication du prototype de capteur étudié :

Notre objectif est de réaliser un capteur solaire thermique écologique à base de cannettes de récupération (**Fig II.1**), à laquelle nous affecterons en même temps, le rôle de conduits pour la circulation du fluide caloporteur et celui d'absorbeur du rayonnement solaire (y compris le rayonnement infrarouge réfléchi par la couverture transparente).



Figure II.1 : Image représentative du prototype réalisé

Le dispositif expérimental (**Fig II.1**), est réalisé au niveau du Hall technologique de l'Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou à Oued Aissi, actuellement rattaché au Département de Génie Mécanique.

La réalisation du modèle a nécessité le matériel suivant :

- Ø Un absorbeur.
- Ø Deux collecteurs d'eau.
- Ø Une couverture transparente.
- Ø Une isolation.
- Ø Deux supports internes.
- Ø Du mastic de silicone
- Ø Un boîtier.
- Ø Une pompe.
- Ø De la tuyauterie.
- Ø Un réservoir d'eau.

II.2.1 Fabrication de l'absorbeur :

Il est constitué de neuf (09) tubes de neuf (09) cannettes chacun, peintes en peinture noire mate afin d'absorber le maximum du rayonnement solaire incident et du rayonnement infrarouge réfléchi par la couverture transparente placée juste au-dessus. L'absorbeur doit transmettre la chaleur produite par absorption au fluide caloporteur qui circule à l'intérieur des tubes.

La réalisation de l'absorbeur passe par deux grandes étapes qui sont :

a) Préparation des cannettes :

Comme on vient de le préciser, la cannette est l'un des éléments qui composent les conduits. Elle doit d'abord subir une modification de sa forme initiale pour présenter un cylindre ouvert des deux côtes (enlèvement du dessous et du couvercle), comme illustré à la figure suivante :

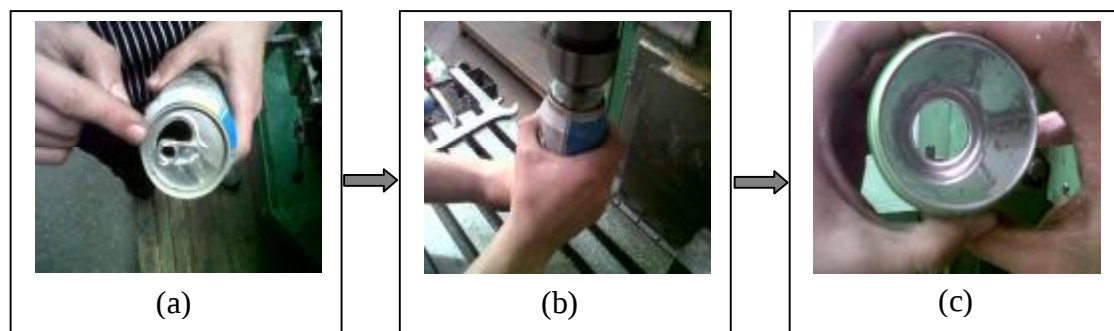


Figure II.2 : Opération de perçage des cannettes.

b) Assemblage des cannettes :

Cette étape consiste à assembler quatre-vingt et une (81) cannettes pour réaliser les neufs (09) tubes de l'absorbeur. Les cannettes sont emboîtées les unes dans les autres et sont fixées à l'aide d'un mastic de silicone (le paragraphe juste après présente quelques informations sur cette colle). A la fin de cette opération, les tubes sont peints en peinture noire mate.



Figure II.3 : Opération d'assemblage des cannettes.

v Quelques informations sur le mastic de silicone :

Le mastic de silicone « Sikaflex PRO-11FC », est un mastic à base de colle polyuréthane de fixation souple, utilisé en menuiserie, couverture, électricité, sanitaires, joints étanches. Il adhère sans primaire sur du verre, de l'acier, du PVC, du zinc, et sur aluminium... Il résiste aux chocs, vibrations, variations de température et résiste aux UV, à l'eau, et aux intempéries.

II.2.2 Fabrication des collecteurs :

Les collecteurs sont faits avec une tôle galvanisée d'environ 0,3mm d'épaisseur, ce qui donne la possibilité de les utiliser comme surfaces absorbantes supplémentaires.

Les deux collecteurs sont de forme parallélepédique de 63,5cm de longueur, de 6cm de largeur et de 8,6cm de hauteur. Leur fabrication commence par le découpage de la tôle, puis le perçage des neufs trous de 4,8cm de diamètre alignés en suivant la longueur de la tôle comme illustré à la figure suivante :

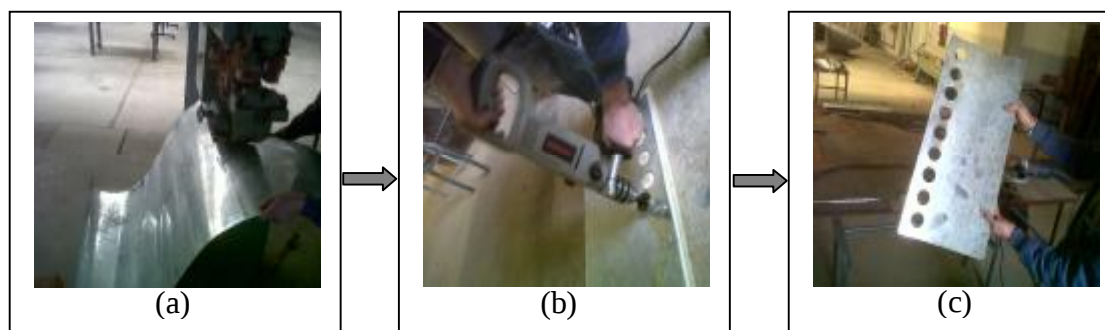


Figure II.4 : Découpage et perçage de la tôle des collecteurs

Le problème à résoudre se posait comme suit : comment faire pour que les tubes puissent adhérer à une tôle de plus faible épaisseur (inférieure à 1mm).

La solution trouvée est d'utiliser une plaque en bois dure sur laquelle nous reproduisons la même forme que la plaque métallique des collecteurs sauf que sur cette plaque les trous sont percés à des diamètres supérieurs de 6 mm à ceux de la plaque métallique, soit 5,4cm. La plaque métallique est fixée sur la plaque de bois de manière à mettre les trous des deux plaques en regard. A l'aide d'un poinçon de diamètre identique à celui des orifices de la plaque en bois, on réalise les rebords sur lesquels les tubes s'insèrent parfaitement par un simple coup de marteau comme nous montre la **figure II.5**,

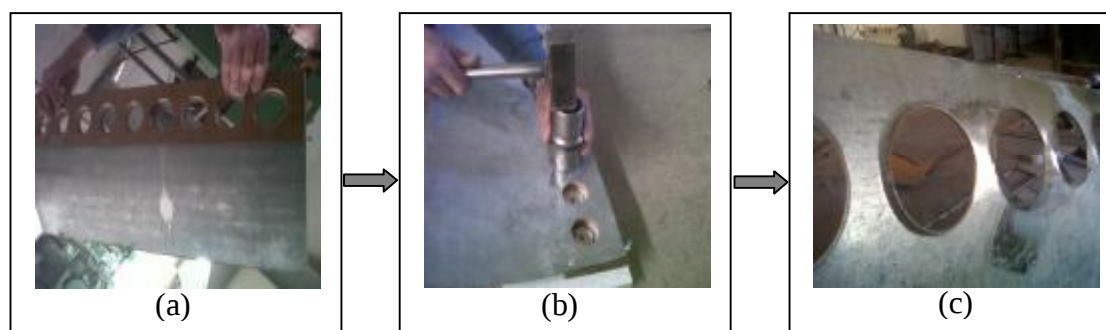


Figure II.5 : Réalisation des rebords sur la plaque métallique.

Après la réalisation des rebords, vient l'opération de pliage de la tôle en vue de lui donner la forme parallélépipédique de canal, qu'il faut ensuite souder à la brasure. Il faut cependant, remarquer que cette opération est assez délicate puisque l'épaisseur de la tôle est faible.

En dernier lieu, sur chacun des collecteurs nous soudons un tube en galvanisé pour servir d'entrée ou sortie d'eau.

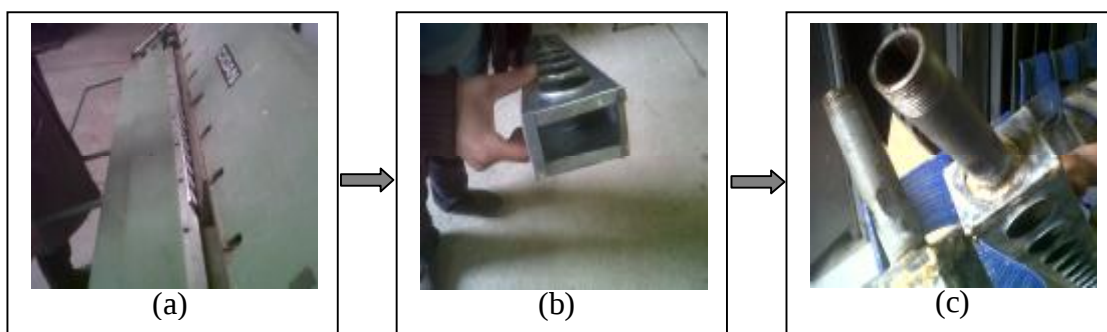


Figure II.6 : Fabrication des collecteurs.

Après toutes ces opérations, nous procédons à l'assemblage des collecteurs avec les tubes en utilisant la même colle que pour la fabrication des tubes.

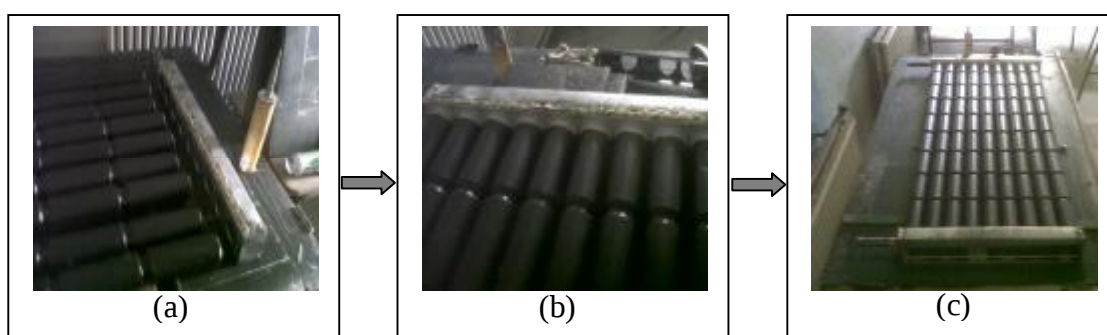


Figure II.7 : Fixation des tubes sur les collecteurs.

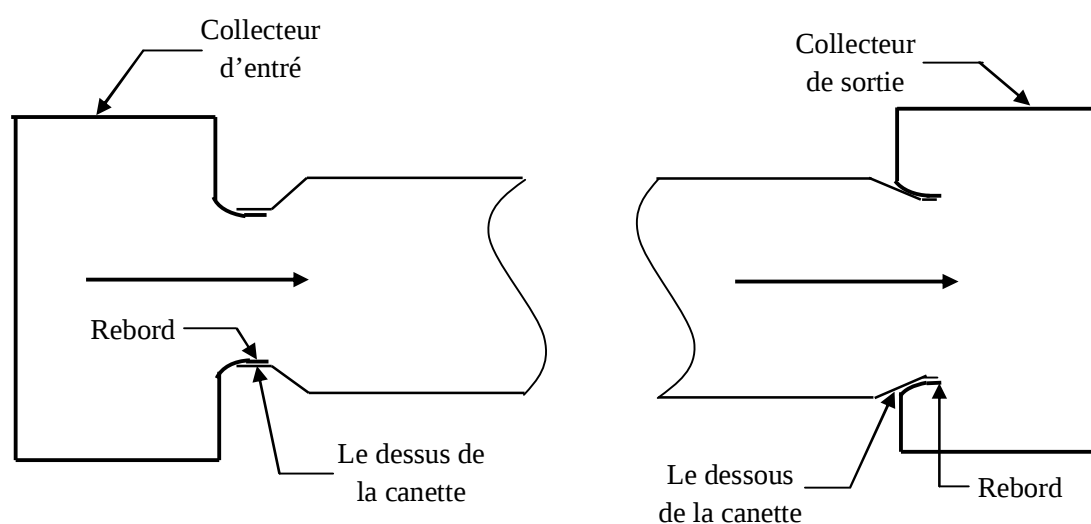


Figure II.8 : Schéma descriptif montrant l'assemblage des tubes aux collecteurs.

II.2.3 Réalisation du boîtier :

Le boîtier est en bois ; il enchâsse l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur. A l'intérieur, sont fixés deux supports en acier qui supportent le poids de la plaque absorbante lorsque le capteur est en position inclinée et sur sa partie supérieure se fixe une vitre transparente.

L'absorbeur se pose sur la face interne du boîtier que nous recouvrent d'une feuille d'aluminium pour réfléchir le rayonnement vers l'absorbeur.

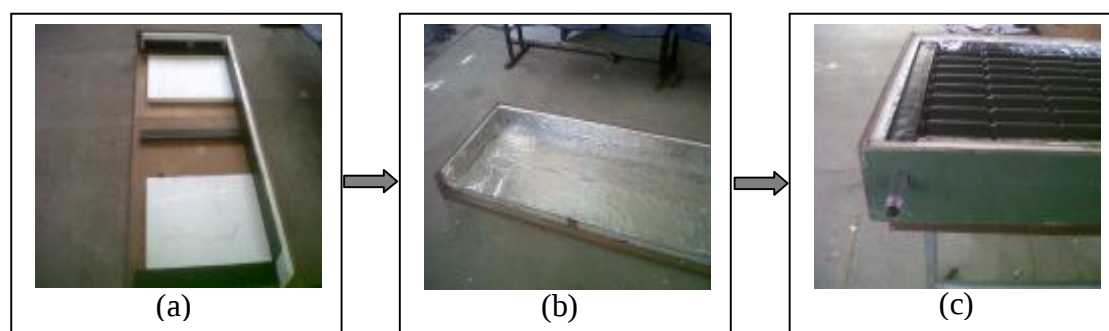


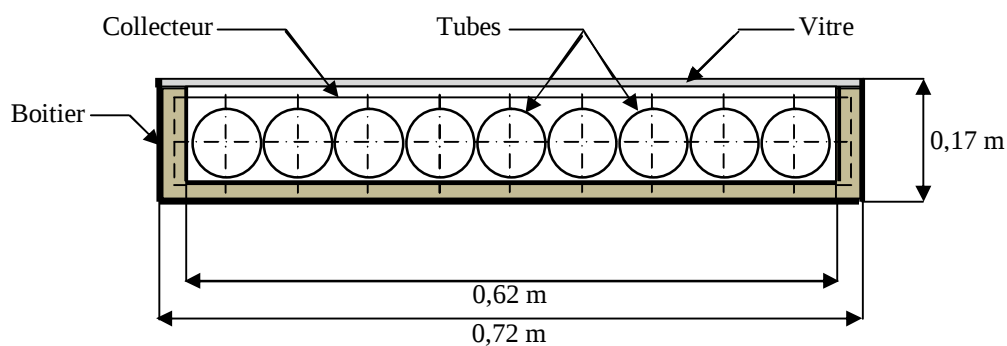
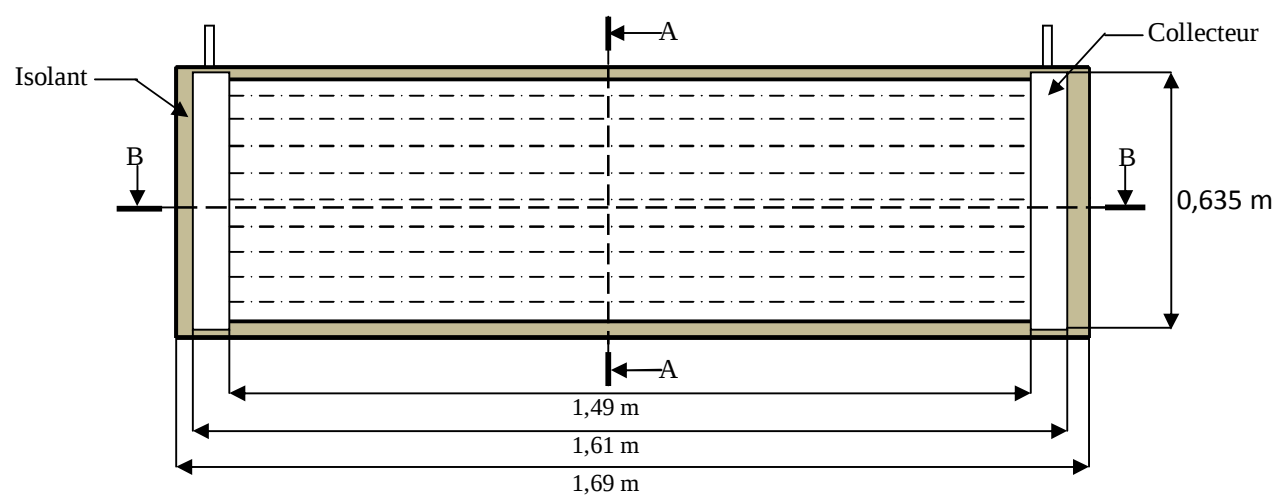
Figure II.9 : Images représentatives de la construction du boîtier.

II.2.4 Isolation :

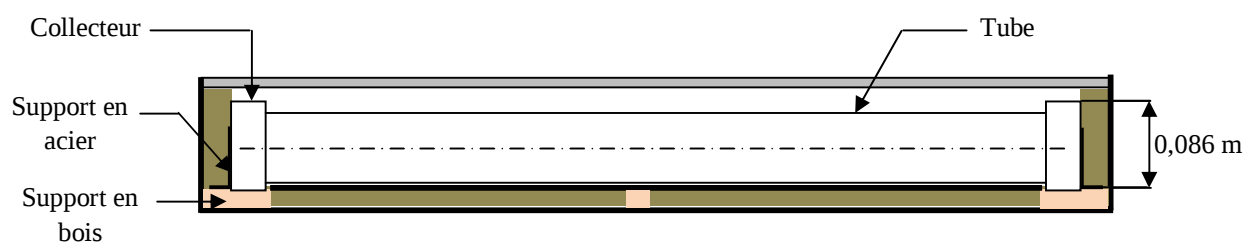
L'isolation thermique arrière du capteur est assurée par une couche de polystyrène expansé de 3cm d'épaisseur plaquée sur la surface arrière ainsi que les surfaces latérales. L'isolation avant est une vitre en verre ordinaire, qui réduit sensiblement les fuites thermiques convectives et radiatives vers l'extérieur.

II.2.5 Dessins de définitions des éléments du prototype:

Les dessins de définitions des différents éléments de ce dispositif sont présentés sur la **figure II.10**.



Coupe A-A



Coupe B-B

Figure II.10 : Schéma global représentant en coupes les différents éléments qui constituent le prototype réalisé.

Les caractéristiques techniques du capteur solaire thermique objet de notre étude expérimentale sont résumées dans le **tableau II.1** ci-dessous :

Désignation	Unité	Nature et dimensions
<u>Les conduits :</u>		
Matériau		Cannettes en aluminium
Nombre		09
Longueur & Diamètre	m	1,49 & 0,066
Conductivité thermique	W/m.K	204
Capacité	Litres	≈ 46
Absorptivité (peinture noire)		0,97
Emissivité (peinture noire)		0,88
<u>Les collecteurs :</u>		
Matériau		Tôle galvanisée
Nombre		02
Epaisseur	mm	0,3
Dimension	m	(0,635×0,06×0,086)
Capacité	Litres	≈ 7
<u>L'isolation thermique :</u>		
Nature		Polystyrène expansé
Epaisseur arrière	cm	03
Epaisseur latérale	cm	03
Conductivité thermique	W/m.K	0,04
<u>La couverture transparente :</u>		
Nature		Verre ordinaire
Nombre		01
Epaisseur	mm	05
Dimension	m	(1,67×0,69)
Emissivité moyenne		0,83
<u>Le boîtier :</u>		
Matériau		Bois
Epaisseur	cm	De 1 à 2,8
Dimension extérieure	m	(1,69×0,72×0,17)
Dimension intérieure	m	(1,61×0,62×0,092)

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques du prototype étudié.

II.3 Conclusion :

Ce chapitre a permis de retracer en détail les différentes étapes suivies lors de la construction de chaque élément constituant le prototype du capteur réalisé ainsi que les caractéristiques techniques de chaque élément.

III.1 Introduction :

Au début de ce chapitre, nous allons définir les principaux paramètres astronomiques, géographiques et météorologiques qui permettent d'évaluer la puissance solaire globale reçue par une surface horizontale et inclinée.

Par la suite nous allons évoquer les différents flux de chaleur échangés entre les composants du capteur, afin d'établir les bilans thermiques à l'équilibre pour chacun de ces éléments.

Les facteurs intervenant dans ces bilans subissent des changements le long de la journée, pour cela nous allons discrétiser le temps en tranche d'une heure et considérer le régime établi à l'échelle de chaque tranche horaire.

III.2 Evaluation du gisement solaire :

Afin d'évaluer les flux énergétiques reçus par la surface terrestre, nous devons définir les grandeurs astronomiques, géographiques et météorologiques.

III.2.1 Paramètres de position : [1]

a) La latitude :

On a choisi comme méridien d'origine le méridien qui passe par l'observatoire de Greenwich. La latitude (φ) d'un lieu A sera sa distance angulaire à l'équateur.

b) La longitude :

La longitude (L) est l'angle que fait le méridien local avec celui de Greenwich G.

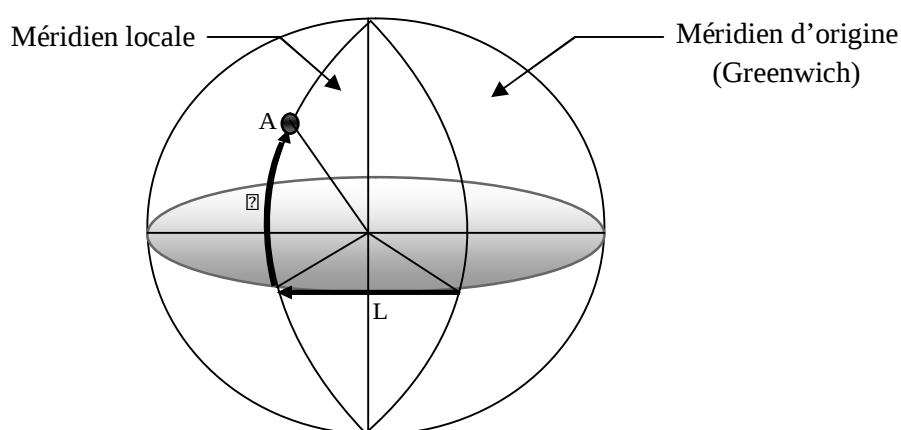


Figure III.1 : Coordonnées terrestre d'un lieu donné

La Terre décrit autour du Soleil une ellipse située dans un plan appelé plan de l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est très faible (elle est de l'ordre de 0,017) ; aussi peut-on l'assimiler à un cercle en première approximation. Cela explique la faible variation de la constante solaire $C^* = 1353 \pm 3,4\% \text{ W/m}^2$.

c) La déclinaison :

La déclinaison (δ) est l'angle formé par la direction du Soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation suivante :

$$\delta = 23,45 \sin [0,986^\circ (j - 81)] \quad (\text{III.1})$$

j: numéro du jour compté à partir du premier janvier

d) L'angle horaire :

L'angle horaire (ω) est l'angle que fait le plan contenant le cercle horaire de l'astre avec le plan contenant le méridien céleste. Il est compté sur l'équateur, positivement à l'ouest, négativement à l'est. On peut déterminer l'angle horaire du lever ω_L et celui du coucher ω_C du soleil par :

$$\cos(\omega_L) = -\tan(\varphi) \times \tan(\delta) \quad (\text{III.2})$$

Et $\omega_C = -\omega_L$

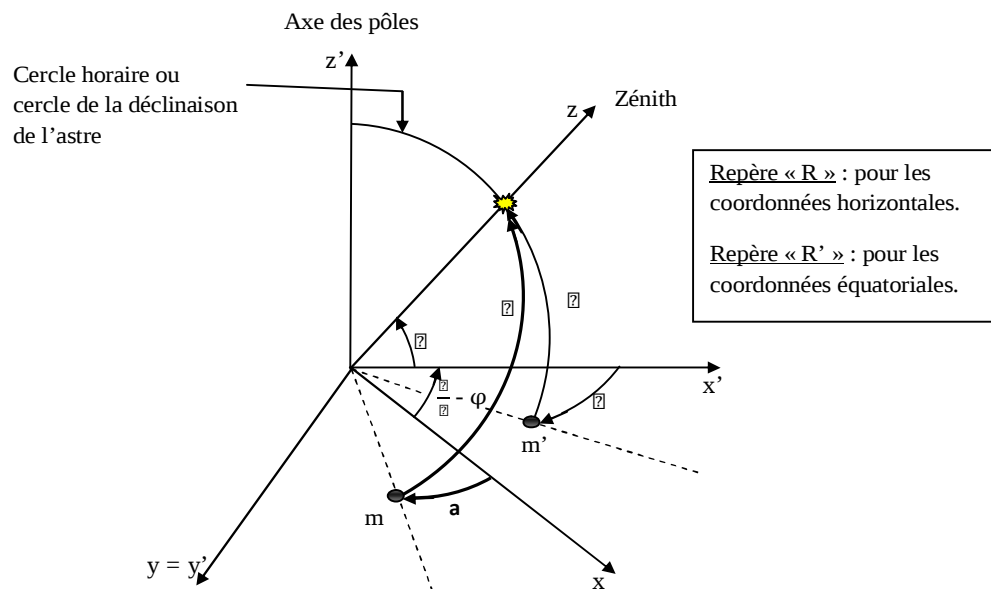


Figure III.2 : Passage d'un système de coordonnées à un autre

e) La hauteur du Soleil :

La hauteur (h) est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal du lieu. Elle peut alors se déduire de la relation suivante:

$$\sin h = \cos \delta \cos \omega \cos \varphi + \sin \delta \cos \quad (\text{III.3})$$

f) L'azimut : [2]

L'azimut (**a**) correspond à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest. Elle est représentée par la loi suivante :

$$\sin a_s = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos h} \quad (\text{III.4})$$

Si : $|\omega| > \omega_0$ (ω_0 est l'angle horaire où le soleil est exactement à l'Ouest), l'azimut est calculé par la relation suivante :

$$a = c_1 c_2 a_s + c_3 \left(\frac{1 - c_1 c_2}{2} \right) 180 \quad (\text{III.5})$$

$c_1 = 1$ si $|\omega| < \omega_0$ et $c_1 = -1$ si $|\omega| > \omega_0$

$c_2 = 1$ si $\varphi(\varphi - \delta) \geq 0$ si non $c_2 = -1$

$c_3 = 1$ si $\omega \geq 0$ si non $c_3 = -1$

III.2.2 Paramètres de temps : [1]**a) Equation du temps ET :**

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour considéré de l'année :

$$ET = TSV - TSM \quad (\text{III.6})$$

$$E_T = [-0,0002 - 0,4197 \cos(\omega'j) + 3,2265 \cos(2\omega'j) + 0,0903 \cos(3\omega'j) + 7,3509 \sin(\omega'j) + 9,3912 \sin(2\omega'j) + 0,3361 \sin(3\omega'j)] \quad (\text{III.7})$$

Avec : $\omega' = \frac{2\pi}{366}$

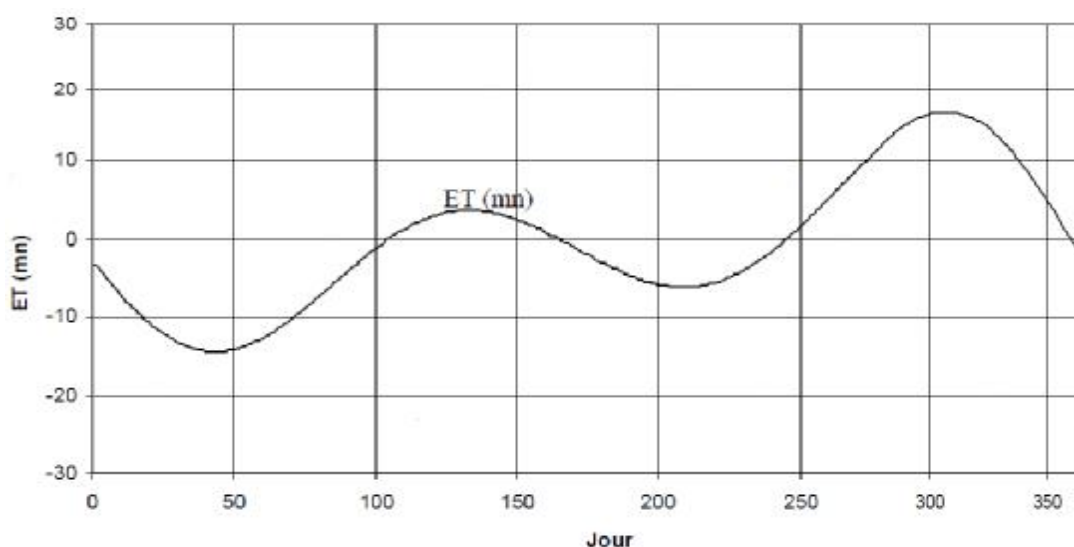


Figure III.3 : Variation annuelle de l'équation du temps

b) Le temps solaire vrai :

La notion du temps solaire vrai TSV a une liaison avec l'angle horaire ω , qui représente l'arc compris entre le rayonnement solaire incident et le plan méridien du lieu. Cet angle augmente de quinze degrés (15°) par heure. Si on prend par convention $\omega = 0$ pour TSV = 12 h :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{III.8})$$

On définit également la relation entre l'angle horaire ω et le temps solaire vrai par :

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{III.9})$$

Avec: TSV en heure, ω en degré

c) Le temps solaire moyen TSM :

Du fait de la variabilité de la distance terre-Soleil et par conséquent de la vitesse de la terre, la durée du jour n'est pas constante et subit une variation d'environ 30s par jour, on définit un jour solaire moyen de 24h et un temps solaire moyen correspondant à cette journée qui va différer légèrement du TSV. L'écart entre les deux temps sera variable et dépendra de la journée considérée de l'année avec un maximum de ± 16 mn.

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{ET} \quad (\text{III.10})$$

d) Le temps du fuseau horaire TFH :

La terre est divisée en 24 fuseaux numérotés de 0 à 23 vers l'Est. Le fuseau 0 est celui qui contient le méridien de Greenwich (GMT). Le temps du fuseau horaire se déduit de la relation suivante :

$$\text{TFH} = \text{TU} + n \quad (\text{III.11})$$

TU : Le temps universel qui est le temps solaire moyen du méridien de Greenwich.

n : le numéro du fuseau horaire

e) Temps légal TL :

C'est le temps lu sur les montres dans le fuseau horaire qui est le temps du fuseau horaire TFH augmenté du décalage administratif Δ :

$$\text{TL} = \text{TFH} + \Delta \quad (\text{III.12})$$

Finalement :

$$\text{TSV} = \text{TL} - \Delta - C + \text{ET} \quad (\text{III.13})$$

C est la correction de longitude donnée en minute par la relation suivante :

$$C = \left(\frac{L_{st} - L}{15} \right) \times 60 \quad (\text{III.14})$$

L_{st} : Méridien de référence (Greenwich).

L : Longitude du lieu considéré.

III.2.3 composante du rayonnement solaire : [1]

A la suite de son interaction avec les rayons solaires, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit. Au final, le rayonnement transmis au sol se décompose en deux fractions qui sont:

Ø **Le rayonnement direct (S)** : c'est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications.

Ø **Le rayonnement diffus (D)** : c'est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

Le rayonnement global (G) est la somme du rayonnement direct et diffus.

Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale sont données dans le **tableau III.2**

Eclairement solaire Flux instantané W/m^2	Direct	S^*	$G^* = S^* + D^*$
	Diffus	D^*	
	Global	G^*	
Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée $Wh/m^2 \cdot \text{durée}$	Directe	S	$G = S + D$
	Diffus	D	
	global	G	

Tableau III.1 : Notations utilisées pour le rayonnement solaire sur un plan horizontal

Le rayonnement direct reçu par une surface orientée en permanence vers le Soleil et qui reçoit donc le rayonnement solaire sous une incidence normale est désigné par I . Nous désignerons par :

- I^* le flux reçu (éclairement) en W/m^2

- **I** l'énergie reçue (irradiation) en $W/m^2 \cdot \text{durée}$

Nous avons la relation :

$$S^* = I^* \sin(h) \quad (\text{III.15})$$

III.2.4 Evaluation du rayonnement solaire sur un plan horizontal:

Nous allons considérer notre cas c'est-à-dire le cas où on dispose de la mesure de l'irradiation globale journalière G .

On calcule D à partir des corrélations de Collares-Pêrera et Rabl en fonction de l'indice de clarté journalier :

$$K_T = \frac{G}{G_0} \quad (\text{III.16})$$

G : Energie globale reçue par un plan horizontal au sol.

G_0 : Energie globale reçue par un plan horizontal au dessus de l'atmosphère.

$$G_0 = 3,795 \cdot 10^4 \cos(\delta) \cos(\varphi) \left[\sin(\omega_L) - \frac{\pi}{180} \omega_L \cos(\omega_L) \right] \quad (\text{III.17})$$

A partir de l'indice de clarté K_T , le diffus journalier D est donné comme suit :

$D = 0,99 G$	$K_T \leq 0,17$	(III.18)
$D = (1,188 - 2,272 K_T + 9,473 K_T^2 - 21,865 K_T^3 + 14,648 K_T^4) G$	$0,17 \leq K_T \leq 0,75$	
$D = (-0,54 K_T + 0,632) G$	$0,75 \leq K_T \leq 0,80$	
$D = 0,2 G$	$K_T \geq 0,80$	

On calcule S par la relation suivante :

$$S = G - D \quad (\text{III.19})$$

On calcule S^* à partir de la fonction de distribution de l'énergie directe :

$$S^*(\omega) = \frac{\pi}{24} [a + b \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi}{180} \omega_1 \cos(\omega_1)} \cdot S \quad (\text{III.20})$$

$$\text{Où: } \begin{cases} a = 0,409 + 0,502 \sin (\omega_1 - 60^\circ) \\ b = 0,661 - 0,477 \sin (\omega_1 - 60^\circ) \end{cases}$$

On calcule D^* à partir de la fonction de distribution de l'énergie diffuse:

$$D^*(\omega) = \frac{\pi}{24} [a + b \cos (\omega)] \frac{\cos (\omega) - \cos(\omega_1)}{\sin(\omega_1) - \frac{\pi}{180} \omega_1 \cos(\omega_1)} \cdot D \quad (\text{III.21})$$

Enfin on en déduit la valeur de G^* par:

$$G^* = S^* + D^* \quad (\text{III.22})$$

III.2.5 Evaluation du rayonnement solaire sur un plan incliné: [2]

a) Angle d'incidence (θ):

L'angle d'incidence (θ) est l'angle fait par les rayons solaires directs et la normale à la surface du récepteur.

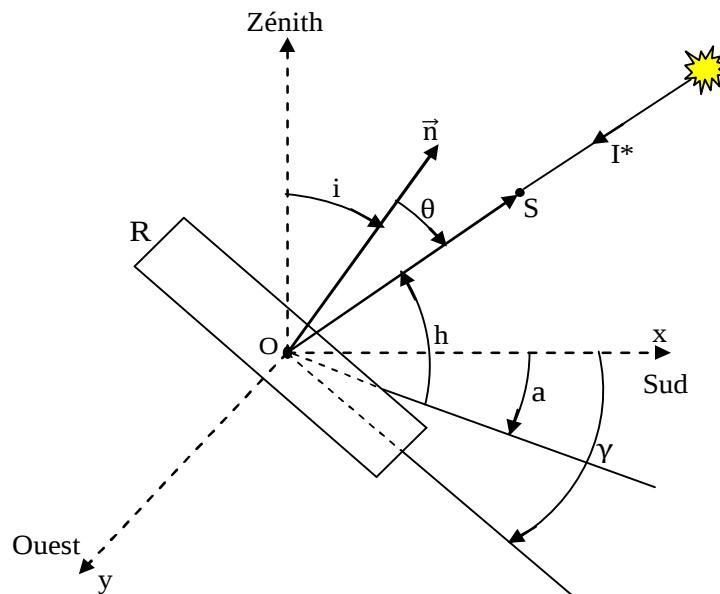


Figure III.4 : Rayonnement solaire arrivant sur un plan quelconque

i : Inclinaison du récepteur par rapport au plan horizontal.

a : Azimut du soleil.

γ : Azimut de la surface qui représente l'angle fait par le récepteur et la direction Sud.

$$\cos(\theta) = \sin(h) \cos(i) + \cos(h) \sin(i) \times [\cos(a) \cos(\gamma) + \sin(a) \sin(\gamma)] \quad (\text{III.23})$$

b) Rayonnement direct $S^*(i, \gamma)$:

Le rayonnement solaire direct arrivant sur un plan quelconque est donné par la relation suivante:

$$S^*(i, \gamma) = I^* \cos(\theta) = \frac{S^*}{\sin(h)} [\sin(i) \cos(h) \cos(\gamma - a) + \cos(i) \sin(h)] \quad (\text{III.24})$$

c) Rayonnement diffus $D^*(i, \gamma)$:

Le rayonnement solaire diffus reçu par une surface inclinée est donné par :

$$D^*(i, \gamma) = D^* \left[\frac{1 + \cos(i)}{2} \right] \quad (\text{III.25})$$

d) Rayonnement réfléchi par le sol $R^*(i, \gamma)$:

Le rayonnement solaire réfléchi par le sol est donné par la relation ci-après :

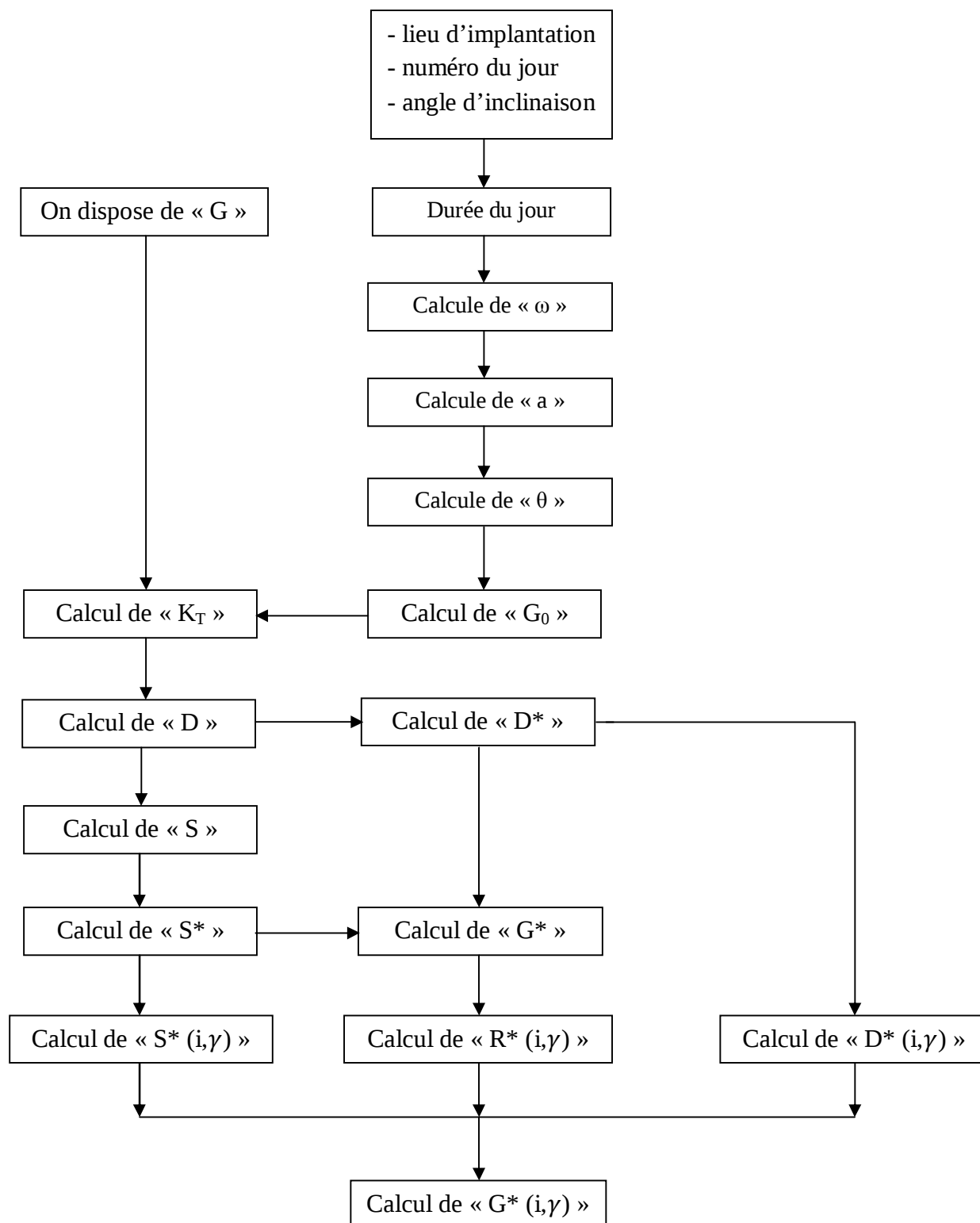
$$R^*(i, \gamma) = A G^* \left[\frac{1 - \cos(i)}{2} \right] \quad (\text{III.26})$$

A: albédo.

e) Rayonnement global $G^*(i, \gamma)$:

$$G^*(i, \gamma) = S^*(i, \gamma) + D^*(i, \gamma) + R^*(i, \gamma) \quad (\text{III.27})$$

Organigramme de calcul de la puissance solaire globale



III.3 bilans thermiques et équations associés:

III.3.1 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire plan vitré : [3]

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement.

- **Transfert de chaleur par conduction :**

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière.

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

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad } T} \quad (\text{III.28})$$

ϕ : Flux de chaleur[W].

λ : Coefficient de conductivité thermique[W/m. K].

S : Surface d'échange [m²].

- **Transfert de chaleur par convection :**

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques. On distingue deux types de convection :

La convection forcée : Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.).

La convection naturelle : Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo circulation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton:

$$\vec{\phi} = h \cdot S \cdot (T_P - T_F) \quad (\text{III.29})$$

$\vec{\phi}$: Le flux échangé par convection[W].

h : coefficient d'échange convectif [W/m². K].

S : surface de la paroi solide en contact avec le fluide[m²].

T_P : Température de la paroi solide [K].

T_F : Température du fluide [K].

- **Transfert de chaleur par rayonnement :**

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques.

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann :

$$\phi = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{III.30})$$

ϕ : Densité de flux de chaleur émis par le corps [W].

ε : Émissivité thermique du matériau.

σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m².K⁴].

T : température absolue du corps [K].

III.3.2 Evaluation du facteur de transmission de la vitre : [1]

Le coefficient de transmission τ est le produit d'un coefficient τ_p relatif à la réflexion partielle du rayonnement incident et d'un coefficient τ_a relatif à l'absorption dans le milieu transparent. On a donc :

$$\tau = \tau_p \cdot \tau_a \quad (\text{III.31})$$

τ : Transmissivité globale de la vitre

τ_p : Transmissivité due à la réflexion

τ_a : Transmissivité due à l'absorption.

Il est nécessaire de calculer avant cela l'angle de réfraction des rayons solaires incidents par application de la loi de Descartes de la réfraction :

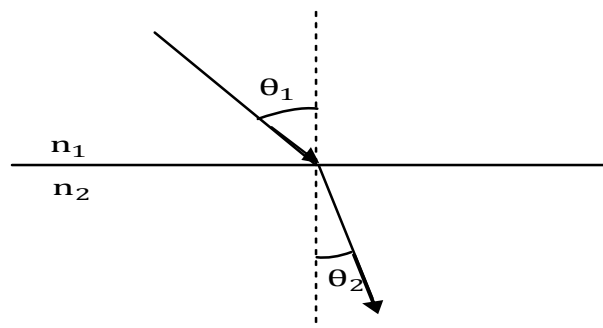


Figure III.5: Réfraction d'un rayon lumineux à la traversée d'un dioptré plan séparant deux milieux de réfringence différente.

L'indice de réfraction est défini comme $n = \frac{C}{C_0}$ (III.32)

Où C est vitesse de la lumière dans le milieu considéré et C_0 sa vitesse dans le vide. On a alors :

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2) \quad (III.33)$$

Puis il faut calculer le coefficient de réflexion ρ par la loi de Fresnel :

$$\rho = \frac{1}{2} \left[\frac{\sin^2(\theta_2 - \theta_1)}{\sin^2(\theta_2 + \theta_1)} + \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \right] \quad (III.34)$$

Lorsque $\theta_2 = \theta_1 = 0$:

$$\rho = \left[\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right]^2 \quad (III.35)$$

Pour l'air :

$$\rho = \left[\frac{1 - n}{1 + n} \right]^2 \quad (III.36)$$

Enfin, on détermine la transmittivité de la couverture due à la réflexion, en considérant l'effet des réflexions multiples au niveau des bords de chacune des vitres. Ainsi, on obtient, pour le cas d'une vitre :

$$\tau_r = (1 - \rho)^2 \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho} \quad (III.37)$$

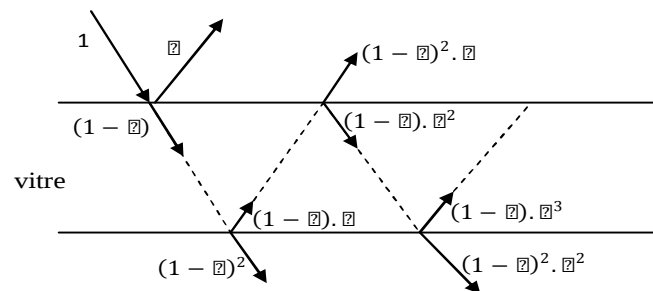


Figure III.6 : Effet des multiples réflexions sur le facteur de transmission d'une vitre.

Lorsque, il y a n vitres, on utilise la relation suivante :

$$\tau_r = (1 - \rho)^2 \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \rho^{2n} = \frac{1 - \rho}{1 + (2n - 1)\rho} \quad (III.38)$$

- Transmissivité de la couverture due à l'absorption :

Elle suit la loi d'extinction de Lambert :

$$\tau_a = \exp(-k_e \cdot n \cdot l) \quad (\text{III.39})$$

n : nombre de vitres

l : Longueur du chemin parcouru par le rayonnement dans le milieu

k_e : Coefficient d'extinction.

III.3. 3 Rendement du capteur: [1]

a) Bilan énergétique :

Le bilan énergétique d'un capteur traduit la relation entre le flux absorbé et le flux emmagasiné en tenant compte des pertes thermiques par conduction, convection et rayonnement, on écrit :

$$Q^* = Q_u + Q_p + Q_t \quad (\text{III.40})$$

Q^* : Flux solaire absorbé par le capteur.

Q_u : Flux utile transférée par le fluide caloporteur.

Q_p : Pertes thermique par conduction, convection et rayonnement du capteur.

Q_t : Flux absorbé par le capteur nécessaire à la montée en température (régime transitoire).

b) Influence de la température de l'absorbeur :

Pour étudier l'influence de la température de l'absorbeur, notée T_p , considérons un capteur plan à eau possédant une vitre et un absorbeur constitué d'une plaque plane avec des tubes à section circulaire. Les différents échanges sont représentés dans la figure ci-dessous :

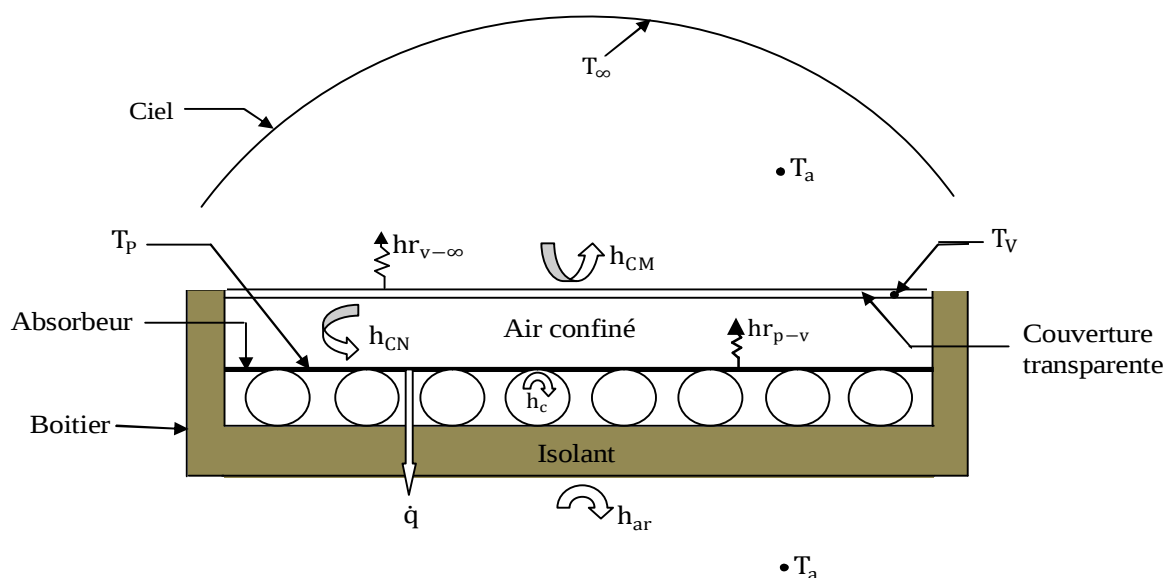


Figure III.7 : schéma représentant les différents échanges thermiques intervenants dans le capteur.

Où :

h_{CN} : Coefficient d'échange par convection naturelle entre l'absorbante et la vitre.

h_{CM} : Coefficient d'échange par convection mixte entre la vitre et l'air extérieur.

h_{ar} : Coefficient d'échange convectif arrière.

hr_{p-v} : Coefficient d'échange par rayonnement plaque absorbante-vitre.

$hr_{v-\infty}$: Coefficient d'échange par rayonnement vitre-ciel.

$\dot{q}$: Pertes thermiques par conduction.

h_c : Coefficient d'échange par convection entre la paroi et le fluide.

T_a : Température ambiante.

T_∞ : Température du ciel.

T_v : Température de la vitre.

T_p : Température de l'absorbeur.

v Hypothèses admises :

• Le régime est supposé permanent.

• La vitre et la surface absorbante sont supposées à températures uniformes.

• On néglige tous les effets de bord, c'est-à-dire que l'on suppose un capteur infini, les grandeurs étant déterminées par m^2 de surface absorbante.

• Le ciel rayonne à la température T_∞ qui est donnée par la relation empirique suivante

$$T_\infty = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (III.41)$$

Où : T_∞ et T_a sont exprimées en degrés Kelvin.

En première approximation on peut écrire l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur :

$$\dot{Q}^* = G^* \cdot \tau_v^* \cdot \alpha_p^* \quad (III.42)$$

• Bilan thermique dans la vitre :

$$G^* \cdot \alpha_v^* + (hr_{v-p} + h_{CN})(T_p - T_v) = (hr_{v-\infty} + h_{CM})(T_v - T_a) \quad (III.43)$$

• Bilan thermique dans l'absorbeur :

$$G^* \cdot \tau_v^* \cdot \alpha_p^* = (hr_{v-p} + h_{CN})(T_p - T_v) + \dot{Q}_u \quad (III.44)$$

• Coefficient d'échange radiatif:

Le Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel est donné par :

$$hr_{(v-\infty)} = \varepsilon_v \sigma (T_v^4 - T_\infty^4) / (T_v - T_a) \quad (III.45)$$

Le Coefficient d'échange par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre est donné par :

$$h_{r(p-v)} = \bar{F} \sigma (T_p^2 + T_v^2) (T_p + T_v) \quad (\text{III.46})$$

Avec :

$$\bar{F} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_p} - 1} \quad (\text{III.47})$$

- Coefficient d'échange convectif :

Coefficient de convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre séparé par la distance b est déterminé comme:

$$h_{CN} = \frac{Nu \cdot \lambda}{b} \quad (\text{III.48})$$

Où le nombre de Nusselt est déterminé à partir des corrélations suivantes : [1]

$$Gr < 1700 + 47,8 i \quad Nu = 1,013$$

$$Gr > 80000 \quad Nu = 2,5 + 0,0133(90 - i)$$

$$\text{Autrement} \quad Nu = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4}(90 - i)] Gr^{0,33}$$

i est l'angle d'inclinaison

Le nombre adimensionnel de Grashof est calculé comme suit :

$$Gr = \frac{\rho^2 g \Delta T b^3}{\mu^2 T_m} \quad (\text{III.49})$$

Avec :

T_m : La température moyenne de l'air entre la paroi et la vitre.

ρ : La masse volumique de l'air à la température moyenne.

μ : viscosité dynamique de l'air à la température moyenne.

Le coefficient de convection mixte entre la vitre et l'environnement est calculé avec la corrélation suivante: [1]

$$h_{CM} = 5,7 + 3,8 V_v \quad (\text{III.50})$$

- Analogie électrique :

Le flux thermique Q_p perdu avec l'environnement peut être déterminé par une analogie électrique comme indiqué à la figure III.6.

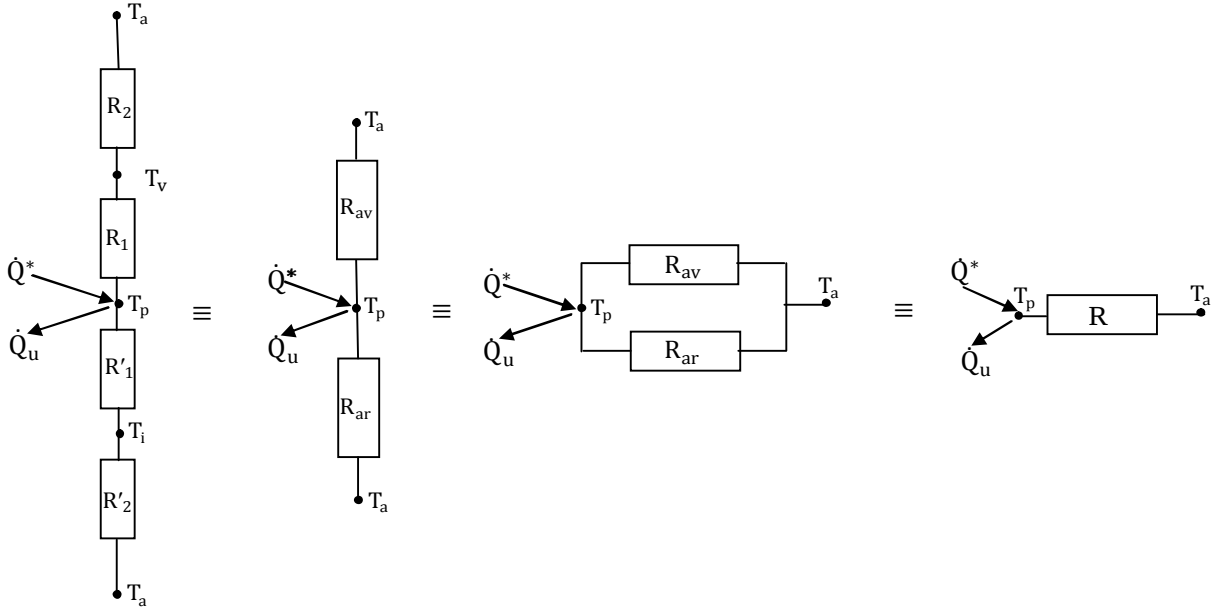


Figure III.8 : Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a

Soit R_1 la résistance thermique entre la surface absorbante à une température T_p et la vitre à la température T_v .

La résistance thermique est l'inverse de la conductance thermique K . dans notre cas, cette dernière est la somme de deux termes : une conductance due à la convection naturelle qui règne dans l'air confiné entre la surface absorbante et la vitre et une autre due au phénomène d'échange radiatif intervenant entre ces deux surfaces à températures différentes.

La résistance thermique R_1 est donnée donc comme suit :

$$R_1 = \frac{1}{h_{CN} + h_{r(p-v)}} \quad (\text{III.51})$$

Soit R_2 la résistance thermique entre la vitre et l'air extérieur qui est à une température T_a . De la même façon que pour la résistance R_1 , on a affaire à des échanges thermiques par convection et rayonnement, ce qui conduit à :

$$R_2 = \frac{1}{h_{CM} + h_{r(v-\infty)}} \quad (\text{III.52})$$

R_1 et R_2 étant en série, la résistance thermique vers l'avant du capteur R_{av} s'écrit :

$$R_{av} = R_1 + R_2 \quad (\text{III.53})$$

Soit R'_1 la résistance thermique créée par l'isolant et le boîtier. On a affaire à la conduction pure :

$$R'_1 = \frac{e_i}{\lambda_i} + \frac{e_b}{\lambda_b} \quad (\text{III.54})$$

e_i : Epaisseur de l'isolant.

e_b : Epaisseur du boîtier.

λ_i : Conductivité thermique de l'isolant.

λ_b : Conductivité thermique du boîtier.

Soit R'_2 la résistance thermique entre la face externe de l'isolant et l'air ambiant. En général cette résistance peut être négligée, la température de surface de l'isolant étant le plus souvent très proche de celle de l'air ambiant à T_a .

De la même que pour l'avant, on définit une résistance arrière R_{ar} qui s'écrit :

$$R_{ar} = R'_1 + R'_2 \quad (\text{III.55})$$

La similitude électrique permet d'écrire :

$$R = \frac{R_{av} \cdot R_{ar}}{R_{av} + R_{ar}} \quad (\text{III.56})$$

Est en utilisant la conductance thermique :

$$K = \frac{1}{R} \quad (\text{III.57})$$

La figure III.7 montre que la puissance thermique échangé avec l'environnement à T_a s'écrit :

$$\dot{Q}_p = K (T_p - T_a) \quad (\text{III.58})$$

Et la puissance utile transférée par le fluide caloporteur s'écrit :

$$\dot{Q}_u = G^* \cdot \tau_v^* \cdot \alpha_p^* - K (T_p - T_a) \quad (\text{III.59})$$

On en déduit **le rendement instantané η** , égal au rapport de l'énergie utile Q_u sur l'éclairement solaire G^* reçu par le capteur.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} = v^* - K \left(\frac{T_p - T_a}{G^*} \right) \quad (\text{III.60})$$

v^* est le rendement optique du capteur ; il est calculé comme le produit du coefficient de transmission solaire τ_c^* de la vitre par le coefficient d'absorption solaire α_p^* de la surface absorbante.

$$v^* = \tau_v^* \cdot \alpha_p^* \quad (\text{III.61})$$

Si on admet que le rendement optique ν^* du capteur ainsi que la conductance globale K ne changent pas, on obtient **la droite de rendement** représentée à la figure III.9.

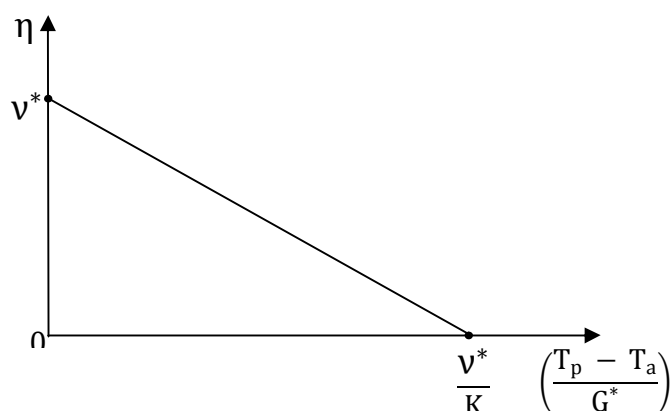


Figure III.9 : Droite du rendement d'un capteur solaire plan.

Le rendement sera d'autant meilleur que la température de l'absorbeur sera proche de la température de l'air ambiant. C'est la raison pour laquelle il ne faut pas rechercher de hautes températures du fluide caloporteur avec les capteurs solaires plans.

c) Influence de la température d'entrée du fluide caloporteur : [1]

Il paraît plus judicieux de chercher à déterminer le rendement du capteur en fonction, non pas de la température T_p de l'absorbeur, mais plutôt en fonction de la température T_{fe} du fluide caloporteur à l'entrée du capteur. Dans le paragraphe précédent on a considéré l'absorbeur isotherme à T_p . En réalité il est soumis à un champ de température non uniforme, constant en régime permanent.

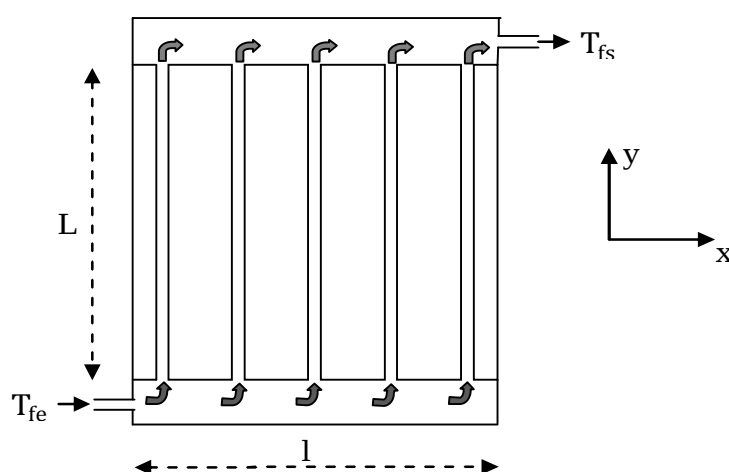


Figure III.10 : schéma du capteur plan étudié

T_{fs} est la température de sortie du fluide caloporteur

Cherchons à présent à déterminer la puissance thermique $\dot{Q}_u$ absorbée par le fluide caloporteur par mètre de longueur de tuyauterie. Cette puissance est égale à l'apport solaire $\dot{Q}^*$ diminué des pertes thermique $\dot{Q}_p$ et augmenté des apports par conduction thermique.

L'expression de cette quantité en fonction de la température T_f du fluide en régime permanent s'écrit :

$$\dot{Q}_u = [\dot{Q}^* - K (T_f - T_a)] P.F \quad (\text{III.62})$$

Avec:

P: Pas entre tuyauteries.

$$P = D_e + 2w \quad (\text{III.63})$$

$2w$: l'intervalle séparant deux tuyauteries.

F : Rendement d'irrigation qui est le rapport de la résistance thermique plaque absorbante-air sur la résistance thermique fluide-air ambiant.

$$F = \frac{1}{\frac{P}{D_e + 2 \cdot w \cdot \eta_w} + \frac{P \cdot K}{\chi \cdot h_c}} \quad (\text{III.64})$$

Avec:

$$\eta_w = \frac{th(m.w)}{m.w} \quad (\text{III.65})$$

χ : est le périmètre mouillé de la conduite.

Et m est calculé par :

$$m = \sqrt{\frac{K}{\lambda_p \cdot \delta}} \quad (\text{III.66})$$

K : Conductance globale du capteur.

λ_p : Conductivité thermique du matériau constituant l'absorbante.

δ : Epaisseur de l'absorbeur.

$$\chi = \pi \cdot D_i \quad (\text{III.67})$$

Le coefficient d'échange par convection entre la paroi et le fluide h_c est donné par la corrélation: [1]

$$h_c = 4,36 \frac{\lambda}{D_i} \quad (\text{III.68})$$

Considérons à présent un volume élémentaire de fluide (Figure III.9). L'équation de bilan thermique en régime permanent s'écrit :

$$\dot{m}.c_p.dT_f = \dot{Q}_u dy \quad (\text{III.69})$$

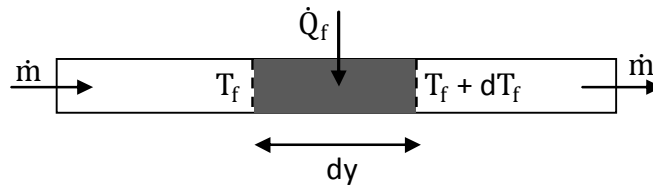


Figure III.11 : schéma servant à écrire le bilan thermique d'un volume élémentaire de fluide

Où :

$\dot{m}$: Le débit massique du fluide caloporteur (en Kg/s par conduite).

C_p : Capacité calorifique du fluide caloporteur (en KJ/Kg.K).

En remplaçant $\dot{Q}_u$ par son expression en fonction de T_f et en appliquant les conditions aux limites : $T_f = T_{fe}$ pour $y = 0$ et $T_f = T_{fs}$ pour $y = L$, on trouve :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{\dot{Q}^*}{K}}{T_{fe} - T_a - \frac{\dot{Q}^*}{K}} = \exp \left(- \frac{F.K}{\dot{M}.c_p} \right) \quad (\text{III.70})$$

Expression qui permet de connaître la température de sortie T_{fs} du fluide caloporteur en fonction de la température d'entrée T_{fe} .

Où :

$\dot{M}$: Débit massique par unité de surface de capteur (Kg/s.m²).

$$\dot{M} = \frac{\dot{m}}{P.L} \quad (\text{III.71})$$

La puissance fournie au fluide par mètre carré de capteur s'écrit :

$$Q_u = \dot{M} C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{III.72})$$

D'où l'équation du rendement instantané s'écrit :

$$\eta = F_t \left[v^* - \frac{K(T_{fe} - T_a)}{G^*} \right] \quad (\text{III.73})$$

Avec :

$$F_t = \frac{\dot{M}C_p}{K} \times \left[1 - \exp\left(\frac{-FK}{\dot{M}C_p}\right) \right] \quad (\text{III.74})$$

F_t : est un facteur de transfert thermique qui représente le rapport du flux thermique réel reçu par le fluide caloporteur sur celui qui serait récupéré si la surface absorbante était isotherme à T_{fe} . Ce facteur sera proche de l'unité dans les cas de débits importants et un fonctionnement de capteur à basse température.

Le facteur de transfert thermique F_t et la conductance thermique K varient avec la température de fonctionnement du capteur ainsi qu'avec les conditions climatiques, il s'ensuit une variation de la courbe de rendement par rapport à la droite théorique.

d) Evaluation de la température d'entrée du fluide dans le capteur :

La température de fluide (l'eau) à l'intérieur du réservoir égale à la température de fluide à l'entrée du capteur :

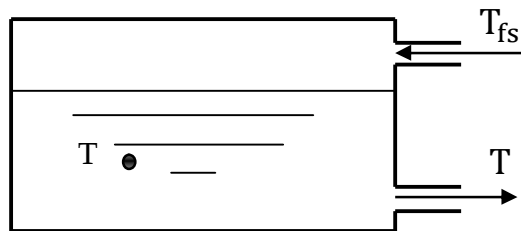


Figure III.12: schéma servant à écrire le bilan thermique dans le réservoir.

- Energie apportée : $dQ_s = \dot{m} C_p (T_{fs} - T) dt$ (III.75)

- Energie sensible : $dQ = M C_p dT$ (III.76)

L'énergie apportée égale à l'énergie sensible :

$$\dot{m} C_p (T_{fs} - T) dt = M C_p dT$$

$$\int_{t_0}^t \frac{\dot{m}}{M} dt = \int_{T_0}^{T(t)} \frac{dT}{(T_{fs} - T)}$$

$$\frac{\dot{m}}{M} t = -\log \frac{T_{fs} - T(t)}{T_{fs} - T_0}$$

$$(T_{fs} - T(t)) = (T_{fs} - T_0) e^{-\frac{\dot{m}}{M}t}$$

A partir des deux équations (III.75) et (III.76) on aboutit à :

$$T(t) = T_{fs} - (T_{fs} - T_0) e^{-\frac{\dot{m}}{M}t} \quad (\text{III.77})$$

Avec :

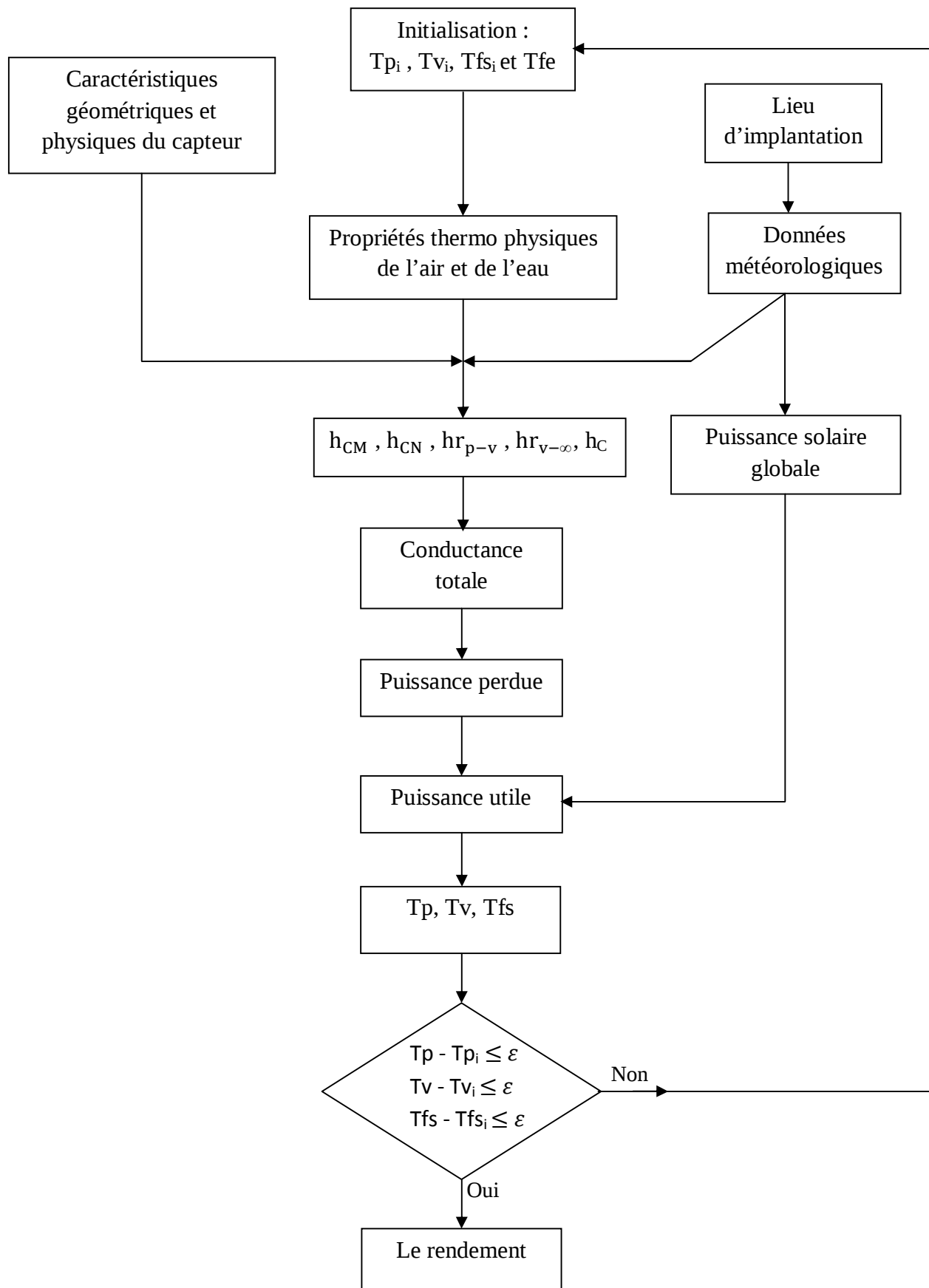
M : La masse du fluide à l'intérieur du réservoir.

T_0 : Température de fluide à l'entrée du capteur à $t = 0$.

$T(t)$: Température du fluide à l'entrée du capteur en fonction du temps t , que l'on considère dans nos calculs égale à une heure.

Pour pouvoir calculer le rendement instantané du capteur heure par heure nous avons mis au point un programme itératif sur fortran qui calcule la température de la vitre, la température de l'absorbeur et la température du sortie de fluide puis le rendement, en suivant l'organigramme ci-dessous.

Organigramme de calcul du rendement



III.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à décrire le modèle théorique que nous avons utilisé. Tout d'abord, nous avons formulé les expressions mathématiques qui décrivent les échanges thermiques dont le capteur est le siège, puis nous avons dressé les bilans thermiques qui s'établissent à l'équilibre de chacun de ces éléments, à savoir l'absorbeur, la vitre et le fluide caloporteur. Les équations qui en résultent sont résolues pas à pas et calculent toutes les températures, en particulier la température à la sortie des capteurs. Connaissant le débit et la température d'entrée, on en déduit la puissance utile et par conséquent le rendement instantané du capteur.

Les résultats de ce modèle sont présentés au chapitre suivant et sont comparés aux mesures effectuées sur le site du campus universitaire de Hasnaoua II à Tizi Ouzou.

IV.1 Introduction :

Dans cette partie nous commençons par présenter le protocole expérimental suivi pour la mesure du débit et des différentes températures, notamment la température d'entrée et de sortie de l'eau. Pour tester la validité du modèle mathématique de calcul des performances du capteur, nous avons par la suite mené une étude comparative des mesures effectuées par rapport aux résultats des simulations. Limitée pour des impondérables de temps aux seules journées pendant lesquelles nous avons pu manipuler, à savoir sept journées au courant du mois de Juillet, cette étude doit être étendue et affinée cependant, pour être significative.

IV.2 installation et instrumentation :

Comme il est montré sur la photographie de la figure V.1, le prototype du chauffe-eau solaire, objet de la présente étude, a été installé sur le toit d'un bâtiment qui abrite le Laboratoire de Mécanique Structures et Energétique (LMSE) de l'université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou.



Figure IV.1 : Vue globale de l'installation

Le système se compose du prototype de capteur que nous avons réalisé, d'un réservoir d'eau, isolé, de forme cylindrique et de capacité 140 litres placé au dessus de capteur, de la tuyauterie, d'une pompe et d'une vanne. La figure ci-après est un schéma de montage des éléments de cette installation.

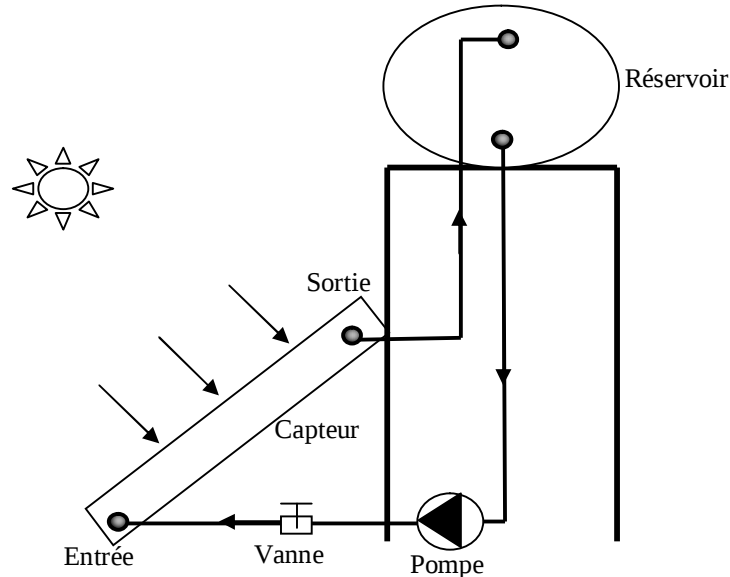


Figure IV.2 : Schéma descriptif du montage expérimental

Le fluide caloporteur froid (l'eau) entre dans le capteur par le bas et ressort chaud par le haut. Il circule en circuit fermé entre le capteur et le réservoir d'eau. Une pompe assure la remontée du fluide. Nous avons prévu une vanne à l'entrée du capteur pour permettre la variabilité du débit, ce dernier étant déduit de la mesure au chronomètre du temps de remplissage d'un vase gradué. Nous mesurons les températures sur un échantillon d'eau récupéré juste à l'entrée ou à la sortie du capteur, la mesure se faisant à l'aide d'un thermomètre à mercure gradué au degré. La température ambiante est mesurée par le même procédé, à l'ombre sur le même site.

IV.3 Mode opératoire :

Les différents tests effectués se sont déroulés sur une période de sept (07) journées du mois de juillet. Nous avons procédé comme suit :

- Pour la première série de mesures qui a duré quatre jours, nous avons fixé la valeur du débit à 70 l/h et nous avons évalué les performances du capteur pendant une journée complète pour chacune des inclinaisons du capteur aux angles de 0° , 20° , 40° et 60° .
- Pour les journées suivantes nous avons retenu l'inclinaison de 20° (qui est théoriquement la plus favorable en cet endroit et pour cette période de l'année) et nous avons testé la sensibilité du rendement à la valeur du débit (70, 144, 200 et enfin 276 l/h).

Les températures sont relevées toutes les heures de la journée, en commençant à 09 :10 Temps Légal, soit une heure après la mise en marche de l'installation, et en terminant à 17 :10 Temps légal.

Nous avons cependant remarqué que le débit réglé au moyen de la vanne est quelque peu influencé par les variations au cours de la journée des conditions météorologique, et principalement de la puissance solaire. Nous prenons la précaution d'en suivre l'évolution en le mesurant à certains moments de la journée (début, milieu et fin) et nous pouvons vérifier que ces variations ne sont pas très importantes. .

Les mesures effectuées ont pour objectif la détermination de flux utile et du rendement instantanés pour chaque journée. [1]

ü Le rendement instantané est obtenu par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Q_u}{G^*} \quad (IV.1)$$

G^* : La puissance solaire reçue (W/m^2).

Q_u : Energie récupérée par le fluide caloporteur, que nous estimerons à partir de la relation:

$$Q_u = \dot{m} \ c_p \ (T_{es} - T_{ee}) \quad (IV.2)$$

Avec :

$$\dot{m} = \frac{\rho \ \dot{Q}_v}{3600} \quad (IV.3)$$

$\dot{m}$: Débit massique (Kg/s).

c_p : Chaleur massique de l'eau ($J/Kg.^{\circ}K$).

T_{ee} : Température de l'eau à l'entrée du capteur ($^{\circ}K$)

T_{es} : Température de l'eau à la sortie du capteur ($^{\circ}K$).

ρ : Masse volumique de l'eau (Kg/m^3).

$\dot{Q}_v$: Débit volumique de l'eau (m^3/h).

ü Le rendement moyen journalier est donné par la relation suivante :

$$\eta_{moy} = \frac{E_u}{G} \quad (IV.4)$$

G : L'irradiation journalière ($KWh/m^2.jour$).

E_u : Energie transmise au fluide caloporteur durant la journée.

$$E_u = \int_{09:10}^{17:10} Q_u \ dt \quad (IV.5)$$

IV.4 Comparaison entre les résultats de simulations et expérimentaux :

Dans cette partie, notre objectif était de réaliser le capteur, puis mesurer son rendement et le comparer à celui que l'on a obtenu par le modèle théorique.

Les résultats pratiques sont présentés sous forme de tableaux pour les sept journées de manipulation. Nous les avons représentés sous forme de graphiques et comparés aux valeurs obtenues théoriquement. Les puissances solaires utilisées dans le modèle sont calculées à partir de la donnée de l'irradiation journalière pour le jour considéré (voir paragraphe III.2.5).

- **15 juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,7 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va = 2,55 m/s								
TL(h)	TSV(h)	G*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	$\eta(\%)$
09:10	08:30	452,0	27,0	35,0	38,0	66	228,3	50,5
10:10	09:30	662,0	29,0	36,0	41,0	66	380,2	57,4
11:10	10:30	834,5	30,0	38,0	44,5	66	493,8	59,2
12:10	11:30	931,4	31,0	41,0	47,0	67	462,3	49,6
13:10	12:30	931,4	32,0	43,0	49,0	67	462,1	49,6
14:10	13:30	834,5	33,0	45,0	50,0	69	400,1	48,0
15:10	14:30	662,0	33,0	49,0	52,0	69	240,0	36,3
16:10	15:30	452,0	33,0	52,0	54,0	69	159,9	35,4
17:10	16:30	269,5	33,0	53,5	54,0	69	39,6	14,7
Rendement moyen								44,5

Tableau IV.1: Résultats expérimentaux pour le 15/07/2013

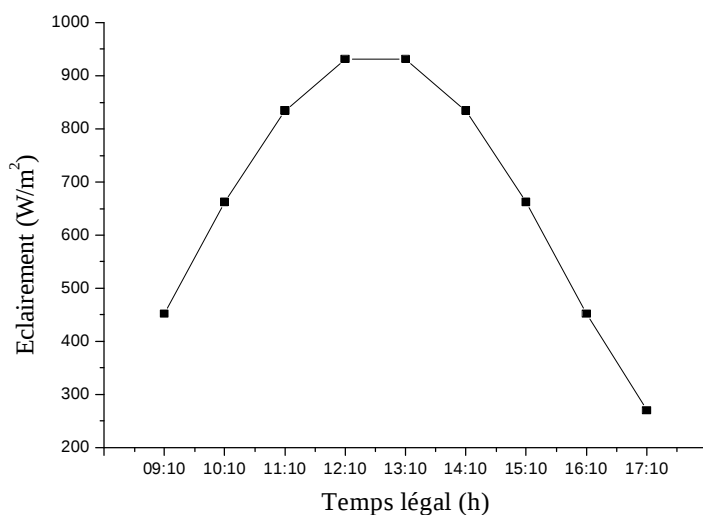


Figure IV.3 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

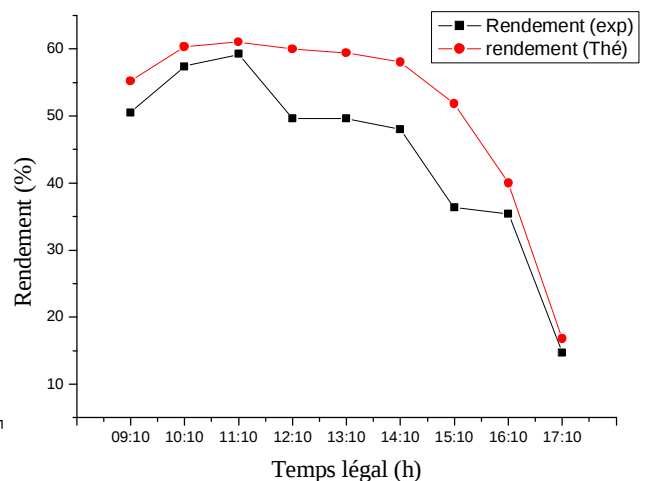


Figure IV.4 : Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

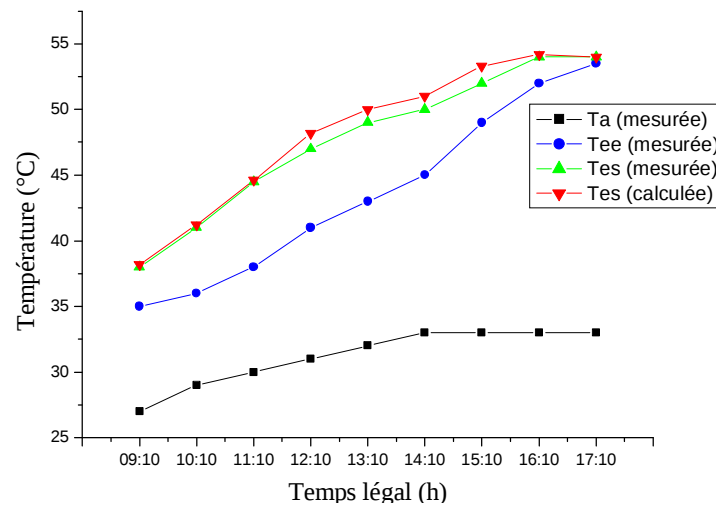


Figure IV.5 : Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.

- **16 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 40^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,58 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va= 2,06 m/s								
TL(h)	TSV(h)	G*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	η(%)
09:10	08:30	405,2	27	33	36	66	228,5	56,4
10:10	09:30	609,9	29	36	41	66	380,2	62,3
11:10	10:30	779,1	32	38	44	66	455,9	58,5
12:10	11:30	874,7	34	41	47	67	462,2	52,8
13:10	12:30	874,7	35	44	50	67	461,8	52,8
14:10	13:30	779,1	38	47	51	68	312,2	40,1
15:10	14:30	609,9	36	47	48	68	78,1	12,8
16:10	15:30	405,2	35	47	49	68	156,2	38,5
17:10	16:30	246,6	35	47	48	68	78,1	31,7
Rendement moyen								45,1

Tableau IV.2: Résultats expérimental pour le 16/07/2013

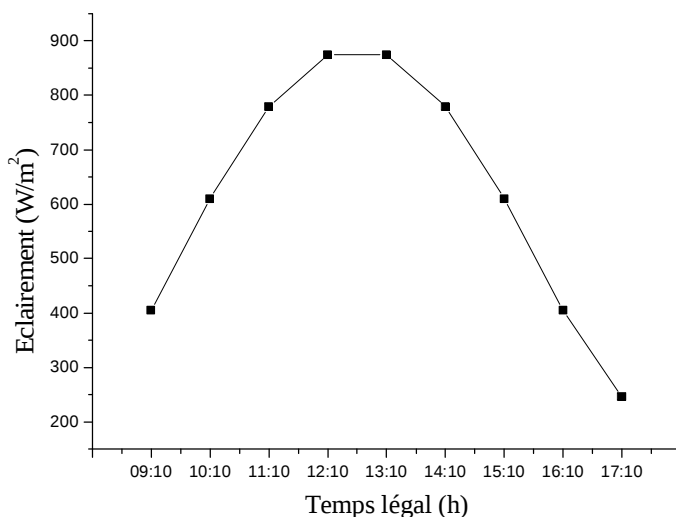


Figure IV.6 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

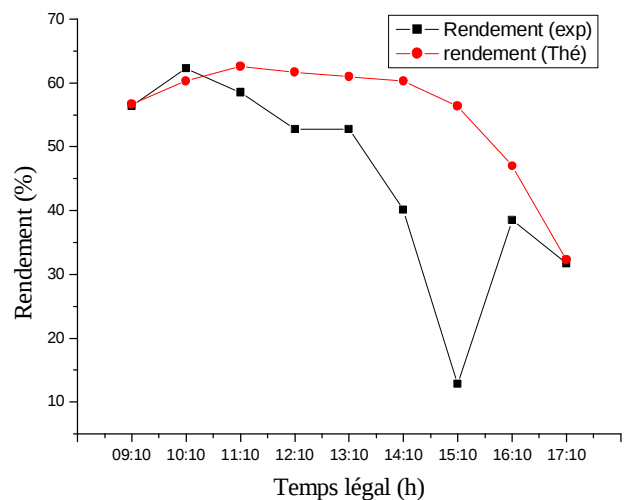


Figure IV.7 : Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

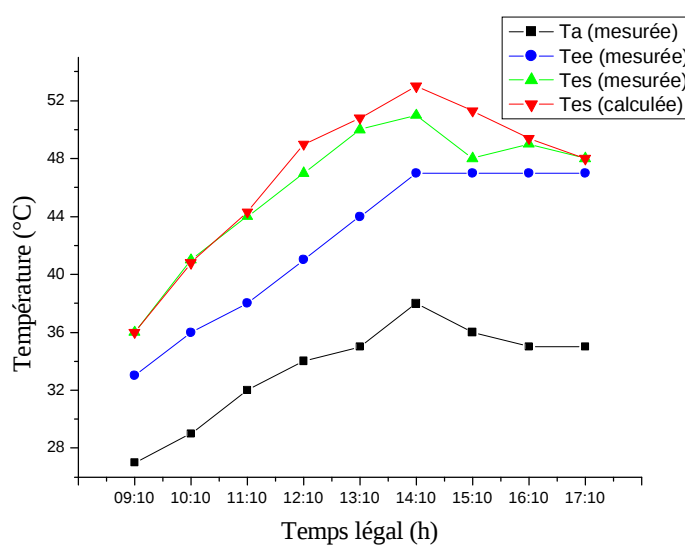


Figure IV.8 : Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.

- **17 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 60^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,53 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va = 3,06 m/s								
TL(h)	TSV(h)	Gs*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	η(%)
09:10	08:30	338,3	28	34	36	62	143	42,3
10:10	09:30	525,2	29	36	40	62	285,8	54,4
11:10	10:30	680,8	31	38,5	43,5	62	356,9	52,4
12:10	11:30	768,9	32	41	46	62	356,6	46,4
13:10	12:30	768,9	33	43	48,5	63	398,3	51,8
14:10	13:30	680,8	32	45	49,5	63	325,7	47,8
15:10	14:30	525,2	34	46	48	63	144,7	27,6
16:10	15:30	338,3	33	46	47	63	72,4	21,4
17:10	16:30	210	33	45,5	46	63	36,2	17,2
Rendement moyen								40,1

Tableau IV.3: Résultats expérimental pour le 17/07/2013

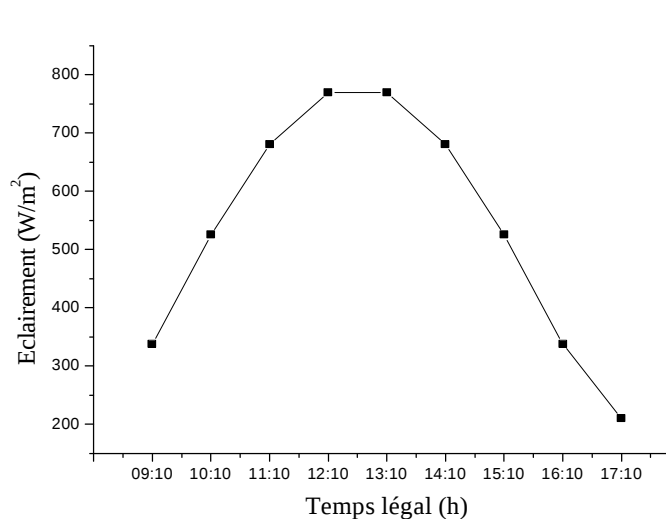


Figure IV.9 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

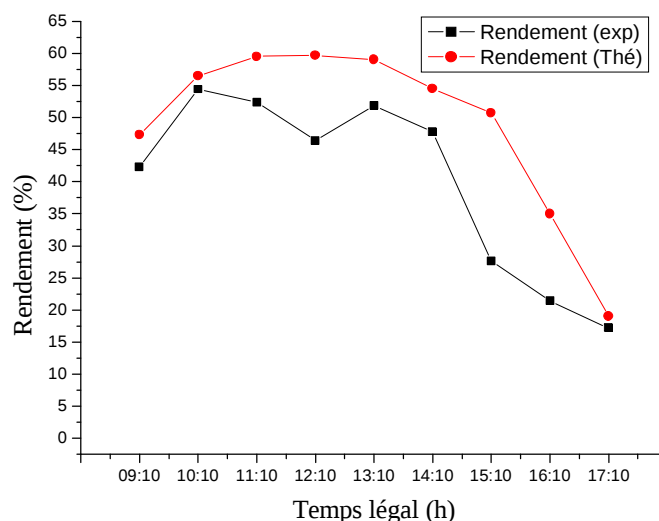


Figure IV.10 : Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

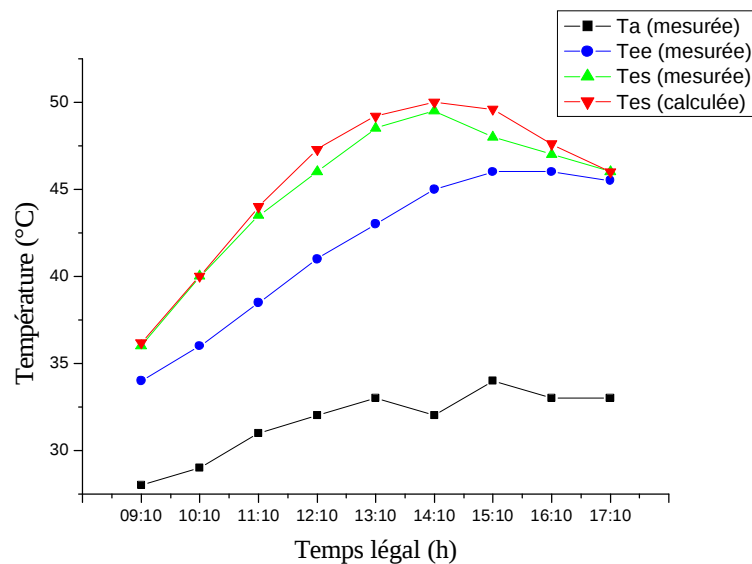


Figure IV.11 : Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.

- **18 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,52 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va = 3,02 m/s								
TL(h)	TSV(h)	Gs*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	η(%)
09:10	08:30	442,3	27	32,5	34	144	249,4	56,4
10:10	09:30	648,7	28	35	37,5	144	415,0	64
11:10	10:30	818,1	28	38	41	144	497,7	60,8
12:10	11:30	913,4	31	41,5	45	144	580	63,5
13:10	12:30	913,4	32	44,5	48	144	579,2	63,4
14:10	13:30	818,1	33	46,5	49	144	413,5	50,5
15:10	14:30	648,7	33	48,5	50,5	144	330,6	51
16:10	15:30	442,3	34	49	50	144	165,2	37,4
17:10	16:30	260,8	32	49	49,5	144	82,7	31,7
Rendement moyen								53,2

Tableau IV.4: Résultats expérimental pour le 18/07/2013

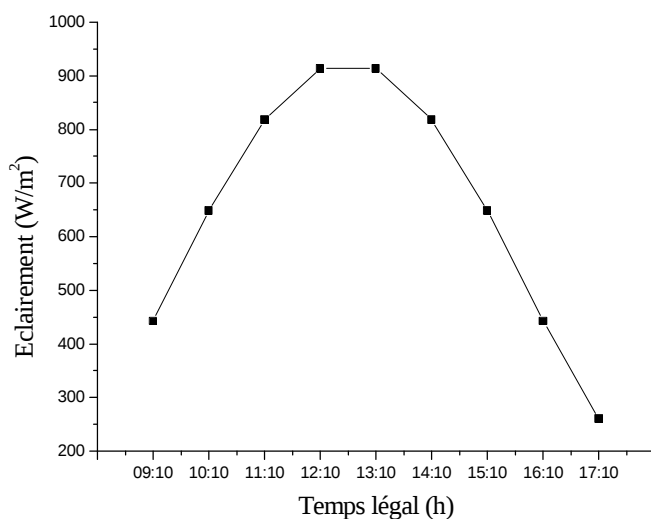


Figure IV.12 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

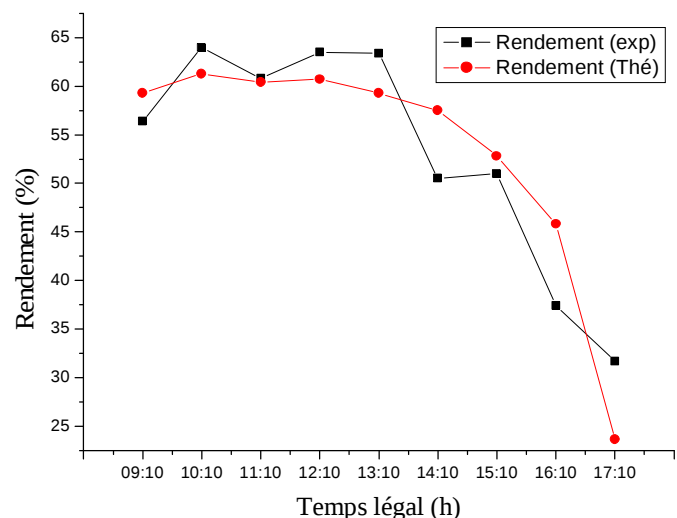


Figure IV.13 : Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

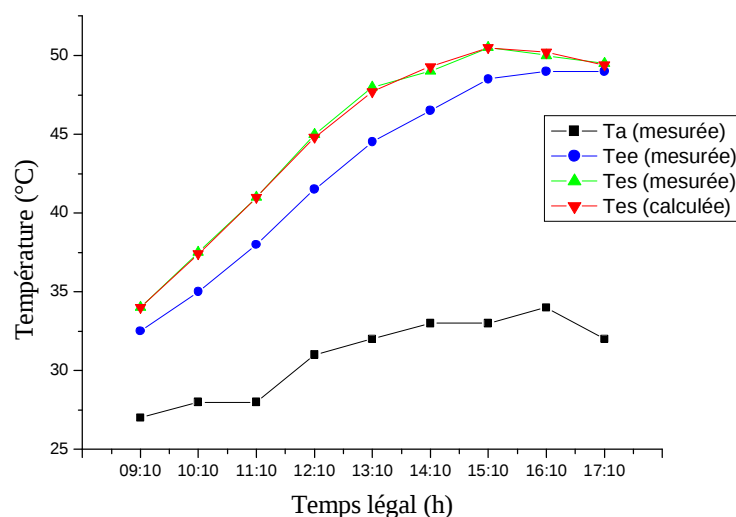


Figure IV.14: Evolution des températures de sortie de l'eau calculée et mesurée.

- **19 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,53 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va = 2,23 m/s								
TL(h)	TSV(h)	Gs*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	η(%)
09:10	08:30	443,1	28	34,5	35,5	200	230,7	52,1
10:10	09:30	650,5	31	37,5	39	200	345,7	53,2
11:10	10:30	820,7	33	41	43	200	460,3	56,1
12:10	11:30	916,6	34	44	46,5	200	574,9	62,7
13:10	12:30	916,6	36	47	49,5	200	573,9	62,6
14:10	13:30	820,7	37	49,5	51,5	200	459	55,9
15:10	14:30	650,5	38	51,5	53	200	344	52,9
16:10	15:30	443,1	35	52	53	200	229,3	51,8
17:10	16:30	260,4	34	51,5	52	200	114,7	44
Rendement moyen								54,6

Tableau IV.5: Résultats expérimental pour le 19/07/2013

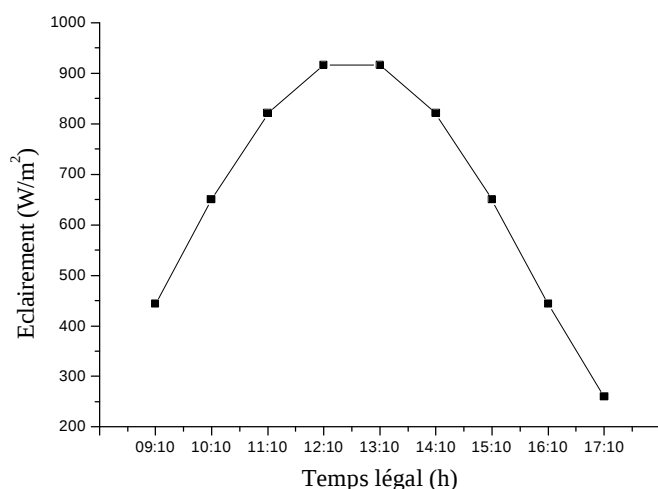


Figure IV.15 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

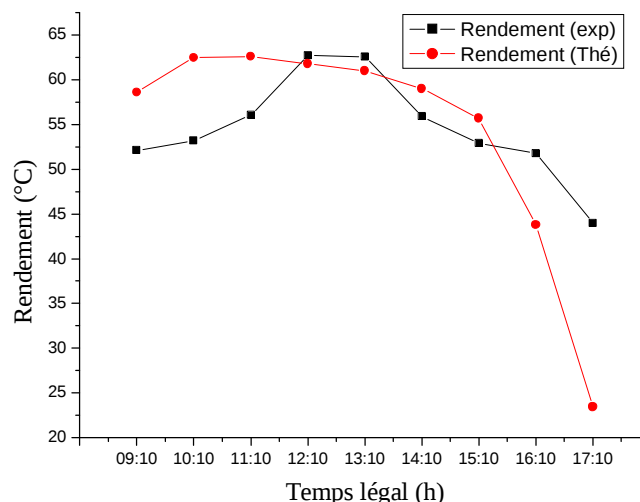


Figure IV.16: Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

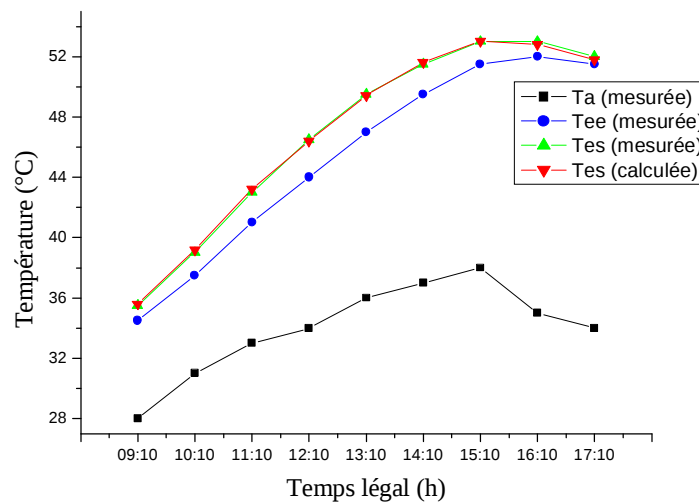


Figure IV.17: Evolution des températures de sortie et d'entrée l'eau mesurée et calculée.

- **25 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,43 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va = 2,32 m/s								
TL(h)	TSV(h)	Gs*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	η(%)
09:10	08:30	438,9	27	31,5	32,5	276	318,7	72,6
10:10	09:30	647,6	30	34,5	36	276	477,6	73,7
11:10	10:30	819,3	34	38,5	40,5	276	635,9	77,6
12:10	11:30	916,1	36	42,5	44,5	276	634,9	69,3
13:10	12:30	916,1	37	46	48	276	634,1	69,2
14:10	13:30	819,3	37	49	50,5	276	475	58
15:10	14:30	647,6	39	51	52	276	316,5	48,9
16:10	15:30	438,9	38	51,5	52	276	158,2	36,1
17:10	16:30	251,4	38	51,5	52	276	158,2	62,9
Rendement moyen								63,1

Tableau IV.6: Résultats expérimental pour le 25/07/2013

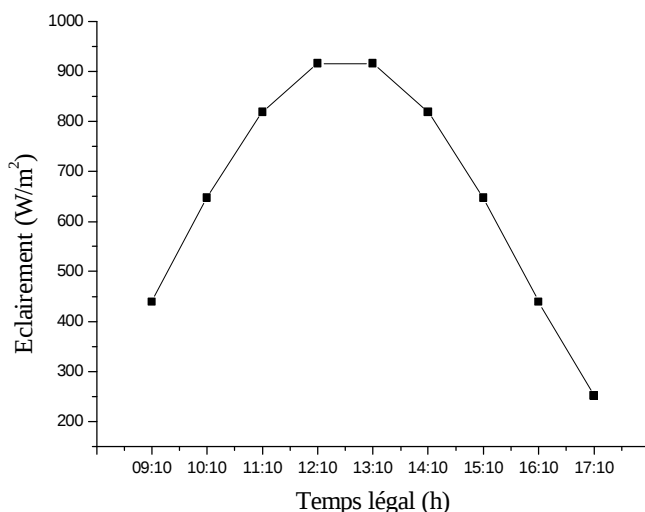


Figure IV.18 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

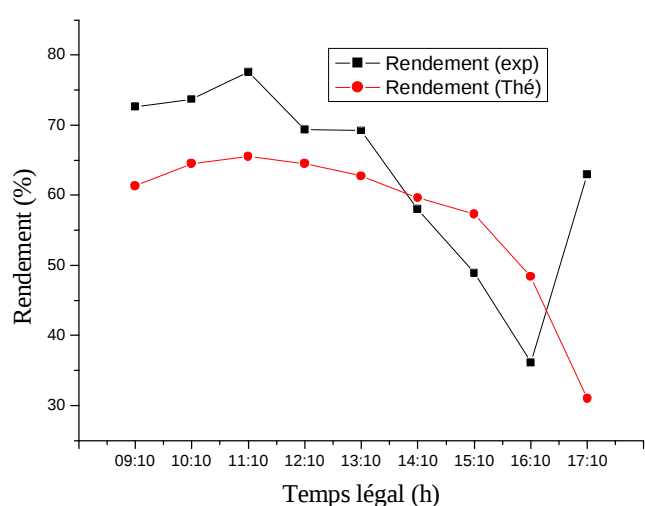


Figure IV.19: Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

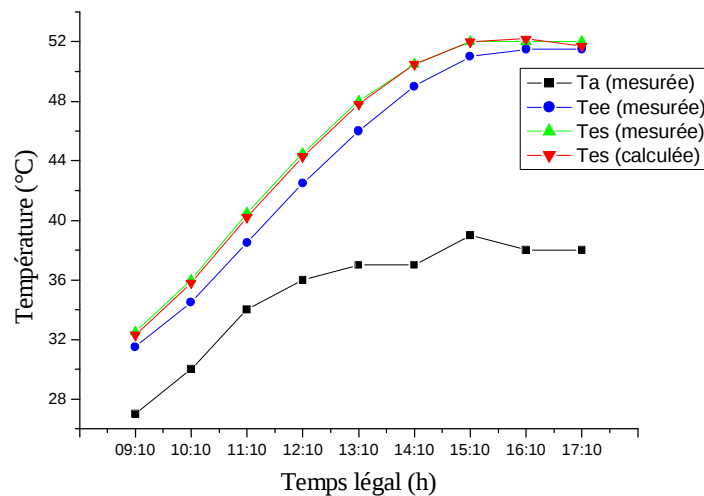


Figure IV.20: Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.

- **28 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 0^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,2 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va = 2,45 m/s								
TL(h)	TSV(h)	Gs*(W/m ²)	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Qv(l/h)	QU(W)	η(%)
09:10	08:30	430,4	29	33	36	66	228,4	53,1
10:10	09:30	619,3	31	36	40,5	66	342,3	55,3
11:10	10:30	773,5	34	39	44	66	379,8	49,1
12:10	11:30	860,1	34	42	48	67	462,2	53,7
13:10	12:30	860,1	34	46	51	67	384,7	44,7
14:10	13:30	773,5	34	47	52	68	390,3	50,5
15:10	14:30	619,3	34	47,5	51,5	68	312,1	50,4
16:10	15:30	430,4	34	48	50	68	156,1	36,3
17:10	16:30	245,6	32	47,5	48	68	39,1	15,9
Rendement moyen								48

Tableau IV.7: Résultats expérimental pour le 28/07/2013

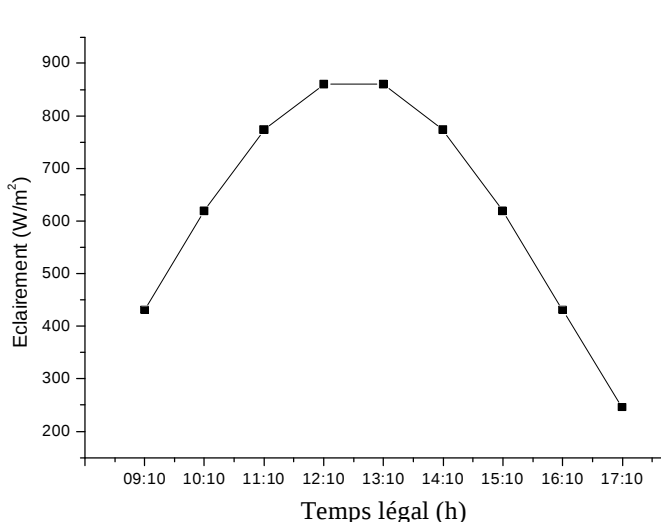


Figure IV.21: Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

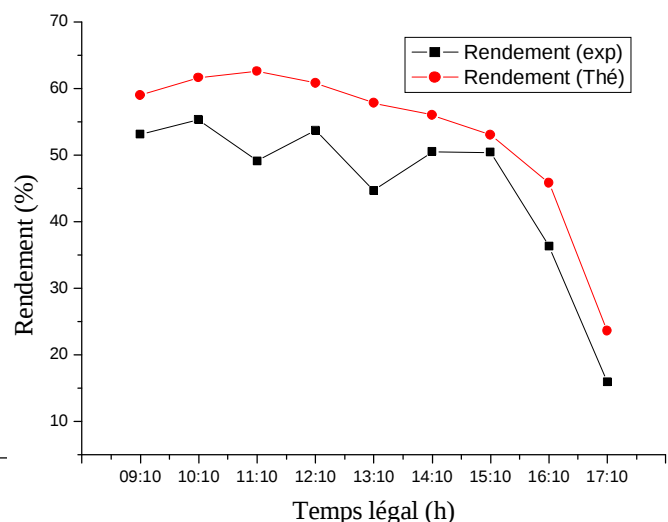


Figure IV.22: Evolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental.

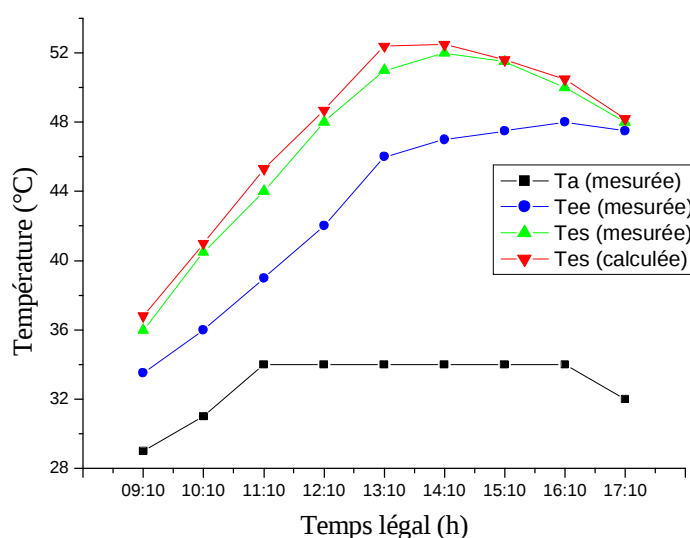


Figure IV.23: Evolution des températures de sortie et d'entrée de l'eau mesurée et calculée.

• Interprétation des résultats :

D'une manière générale, les courbes montrent un bon accord entre l'évolution des rendements thermiques instantanés théorique et expérimental. Ils suivent pratiquement la même allure pour toutes les journées de manipulation, à l'exception d'une journée où on a enregistré de larges passages nuageux.

On remarque dans les figures (IV.4), (IV.10), (IV.13), (IV.16), (IV.19), et (IV.22), que l'écart entre le rendement thermique théorique et expérimental est faible. Cet écart augmente légèrement en milieu de journée mais reste inférieur à 20% des valeurs. Cette différence s'explique par le fait que des paramètres influant grandement sur le rendement instantané du capteur comme les valeurs instantanées de l'éclairement solaire, ou encore celles de la vitesse du vent, ne sont pas mesurées en continu sur le site.

Comme par exemple, dans la figure (IV.7), la « chute » du rendement expérimental entre 13h et 15h TL constatée sur le graphe, est provoquée par un passage nuageux au cours de cette période. Ce passage diminue considérablement la puissance solaire réelle absorbée par le capteur. Or le calcul du rendement expérimental ne tient pas compte de cette perturbation et par conséquent sa valeur « dite expérimentale » est sous-estimée considérablement dans de tels cas de figure.

Il faut également signaler un problème lié à la précision du thermomètre utilisé dans les mesures. Quand l'écart entre la température de sortie et d'entrée dans le capteur est trop faible, la précision sur la mesure de cette différence de température et par conséquent sur le rendement expérimental, est sévèrement affectée. C'est ce qui se passe en fin de journées. En effet, une erreur de lecture de 0,5°C sur le thermomètre peut induire une fluctuation de 30 à 40% de la valeur du rendement, surtout lorsque le débit est élevé (200 l/h et 276 l/h). Ainsi,

sur les figures (IV.16) et (IV.19), on peut constater un écart important sur les valeurs du rendement à 17h.

A l'inverse ces phénomènes ont moins d'influence sur les courbes de température. Ainsi, les résultats théoriques collent parfaitement aux valeurs mesurées.

Les figures (IV.5), (IV.8), (IV.11) et (IV.23), montrent que les températures de sortie mesurée et calculée sont très proches surtout dans les extrémités de la journée ; l'écart ne dépasse guère 2°C à l'exception la journée du 16/07/2013 (figure IV.8), marquée par le passage nuageux). Durant cette période, l'écart de température a atteint 4°C.

Quand le débit est important (144 l/h – 276 l/h), comme montré à la figure (IV.14), (IV.17) et (IV.20), l'écart des températures de sortie mesurée et calculée tout au long de la journée est très réduit (0,2°C à 0,3°C).

IV.5 Conclusion :

Mise à part quelques faibles écarts, constatés surtout aux extrémités de la journée, le modèle de calcul que nous avons développé est validé par l'expérience. Les résultats du modèle, tant pour les températures de sortie que pour le rendement sont satisfaisants et concordent avec les résultats expérimentaux. Dans ce qui va suivre, nous allons utiliser ce programme de calcul numérique des températures et des rendements thermiques pour simuler le comportement du capteur tout au long de l'année.

V.1 Introduction :

Après avoir validé notre modèle mathématique et décrit la méthode de résolution, nous nous proposons dans cette partie de présenter les résultats obtenus numériquement sur les transferts thermiques dans le capteur et le ballon de stockage, ainsi que sur le rendement instantané et les différentes températures. Plusieurs situations ont été considérées. Nous allons commencer les simulations des journées de Juillet, en cherchant à mettre en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison du capteur et du débit d'eau. Nous nous intéresserons par la suite aux performances annuelles du capteur à différents angles d'inclinaison en simulant le fonctionnement du système pour chacun des mois de l'année. La méthode utilisée est celle de la journée représentative du mois.

A la fin de ce chapitre, nous avons consacré un paragraphe dans lequel nous traitons de l'aspect économique de cette installation, avec en finalité la question déterminante de la rentabilité d'un tel investissement et l'opportunité de sa mise en œuvre.

V.2 Présentation des résultats des simulations :

V.2.1 Simulation du comportement du capteur au mois de juillet :

Les résultats obtenus par simulation ont permis de suivre l'évolution des performances thermiques du capteur, notamment la température de sortie et d'entrée de l'eau, la température de la vitre et de l'absorbeur, le rendement et le flux utile pour chaque heure. Les journées représentées ci-après correspondent aux journées où nous avons effectué les mesures de la température de l'air ambiant et des températures d'entrée et sortie de l'eau dans le capteur. Les valeurs de l'irradiation globale journalière et de la vitesse moyenne du vent pour ces journées sont extraites des fichiers de la NASA (annexe D). Les puissances solaires sont calculées heure par heure, à partir de l'irradiation journalière, par un modèle de distribution simplifié.

- **15 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,7 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va = 2,55 m/s											
TL(h)	TSV(h)	G*(W/m ²)	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	$\eta(\%)$
09:10	08:30	452	0,83	27,0	35,0	38,2	42,6	29,8	66,0	249,4	55,2
10:10	09:30	662	0,84	29,0	36,0	41,2	48,0	33,4	66,0	399,5	60,3
11:10	10:30	834,5	0,84	30,0	38,0	44,6	53,2	36,0	66,0	508,2	61,0
12:10	11:30	931,4	0,84	31,0	41,0	48,2	57,6	38,4	67,0	560,0	60,0
13:10	12:30	931,4	0,84	32,0	43,0	50,0	59,4	39,7	67,0	553,5	59,4
14:10	13:30	834,5	0,84	33,0	45,0	51,0	59,2	40,2	69,0	483,4	58,0
15:10	14:30	662	0,84	33,0	49,0	53,3	59,0	40,0	69,0	343,5	51,8
16:10	15:30	452	0,83	33,0	52,0	54,2	57,3	39,0	69,0	181,3	40,0
17:10	16:30	269,5	0,80	33,0	53,5	54,0	54,8	37,8	69,0	45,4	16,8
rendement moyen											55,1

Tableau V.1: Résultats obtenus par simulation pour le 15/07/2013.

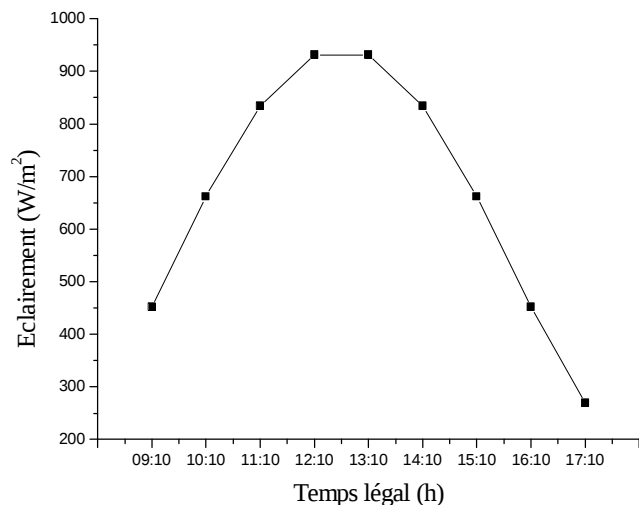


Figure V.1: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

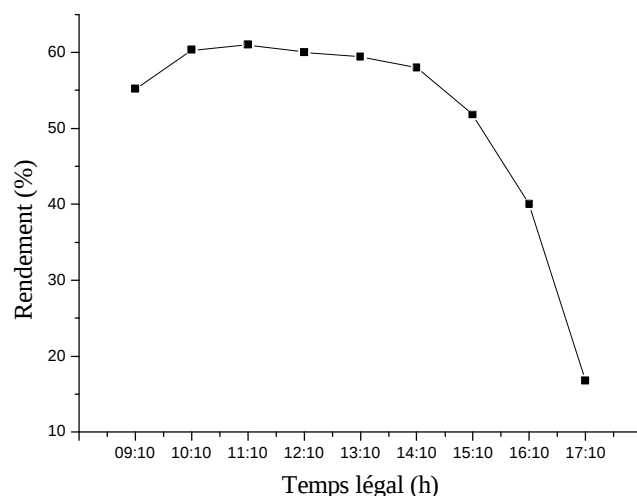


Figure V.2: Evolution du rendement en fonction du temps.

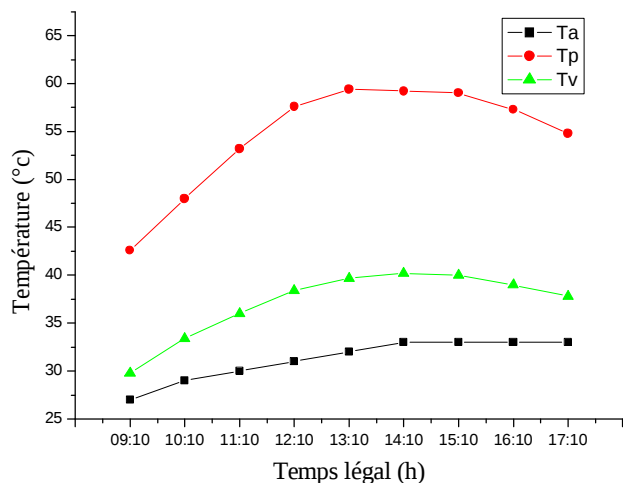


Figure V.3: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

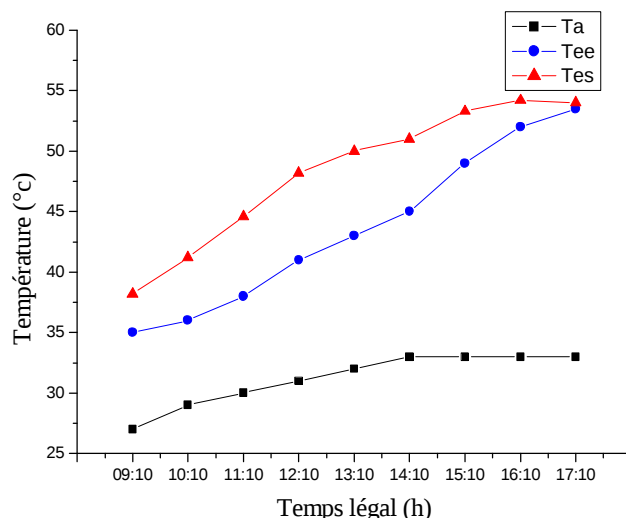


Figure V.4: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **16 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 40^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,58 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va= 2,06 m/s											
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qv(l/h)	Qu(W)	$\eta(\%)$
09:10	08:30	405,2	0,81	27	33	36	39,8	29	66	225,6	56,7
10:10	09:30	609,9	0,84	29	36	40,8	47	33	66	368	60,3
11:10	10:30	779,1	0,84	32	38	44,3	52,6	37,5	66	487,5	62,6
12:10	11:30	874,6	0,84	34	42	49	58	41	67	539,6	61,7
13:10	12:30	874,6	0,84	35	44	50,8	59,8	42,3	67	533,4	61
14:10	13:30	779,1	0,84	38	47	53	60,8	44,7	68	469,6	60,3
15:10	14:30	609,9	0,84	36	47	51,3	57,2	41,7	68	344,3	56,4
16:10	15:30	405,2	0,81	35	47	49,4	52,7	39	68	191	47
17:10	16:30	246,6	0,77	35	47	48	49,4	37,7	68	79,7	32,3
rendement moyen											58

Tableau V.2: Résultats obtenus par simulation pour le 16/07/2013

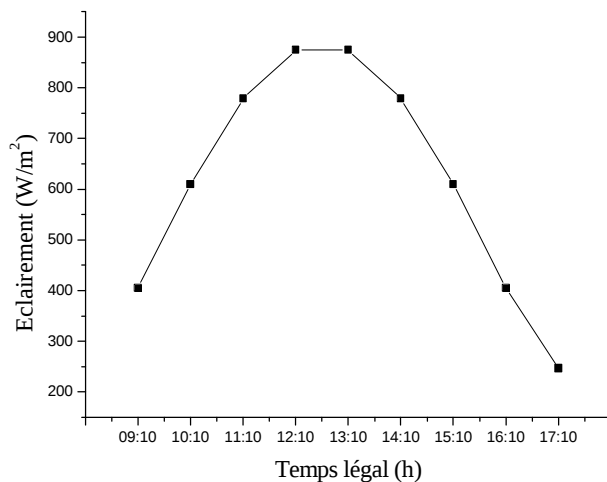


Figure V.5: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

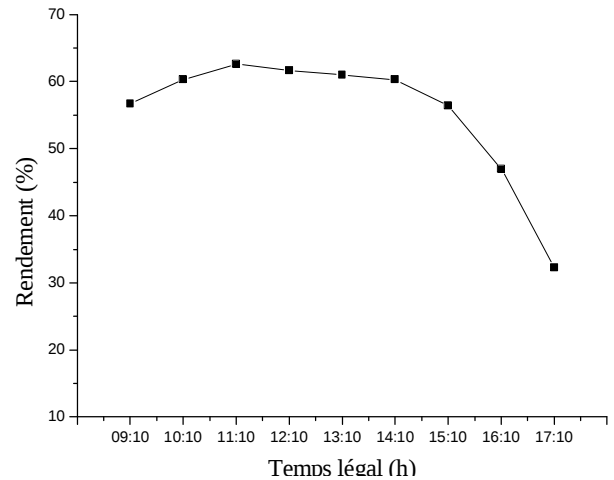


Figure V.6: Evolution du rendement en fonction du temps.

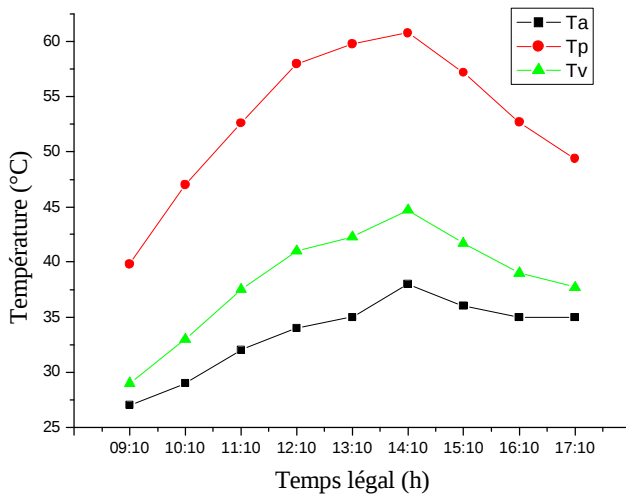


Figure V.7: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

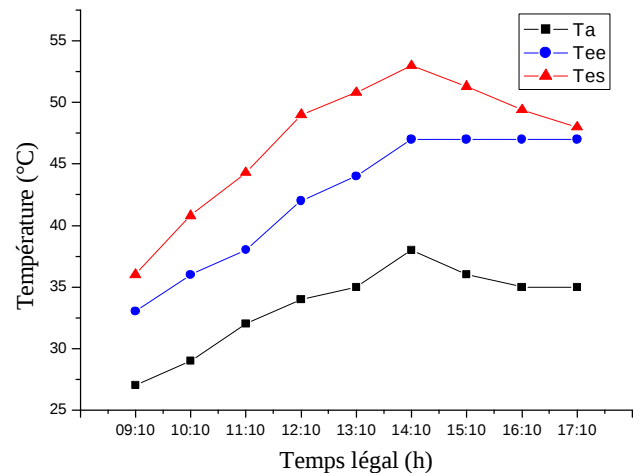


Figure V.8: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **17 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 60^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,53 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va = 3,06 m/s											
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qu(W)	Qv(l/h)	$\eta(\%)$
09:10	08:30	338,3	0,73	28	34	36,2	39	29	160	62	47,3
10:10	09:30	525,2	0,81	29	36	40	45	31,8	297	62	56,5
11:10	10:30	680,7	0,83	31	38,5	44	50,8	35,3	404,8	62	59,5
12:10	11:30	768,9	0,84	32	41	47,3	55	37,4	459,5	62	59,7
13:10	12:30	768,9	0,84	33	43	49,2	56,7	38,7	453,4	63	59
14:10	13:30	680,7	0,83	32	45	50	56,2	37,6	371	63	54,5
15:10	14:30	525,2	0,81	34	46	49,6	54	38,3	266,5	63	50,7
16:10	15:30	338,3	0,73	33	46	47,6	49,6	36	118,7	63	35
17:10	16:30	210	0,69	33	45,5	46	46,7	35	40	63	19
Rendement moyen											53,2

Tableau V.3: Résultats obtenus par simulation pour le 17/07/2013

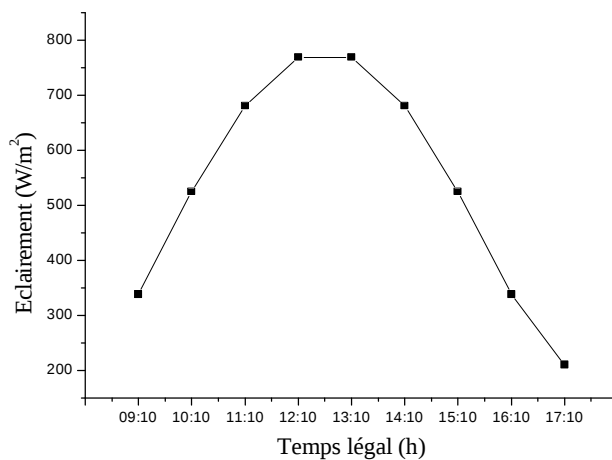


Figure V.9: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

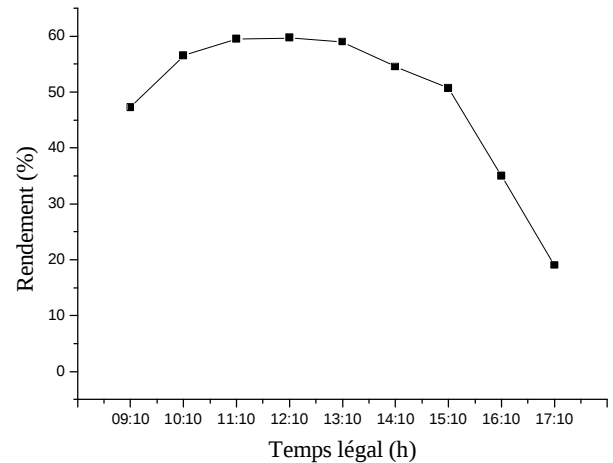


Figure V.10: Evolution du rendement en fonction du temps.

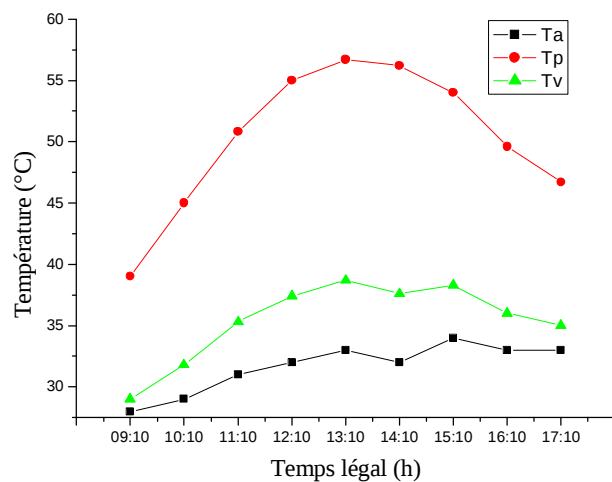


Figure V.11: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

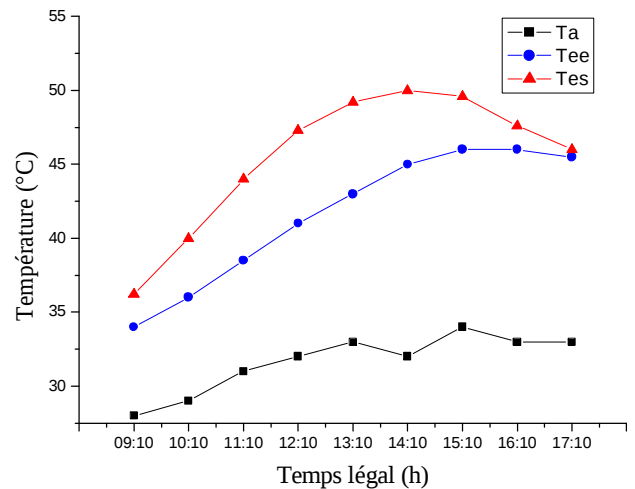


Figure V.12: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **18 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,52 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

$V_a = 3,02 \text{ m/s}$											
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qu(w)	Qv(l/h)	$\eta(\%)$
09:10	08:30	442,3	0,83	27	32,5	34	39,6	28,8	262,5	144	59,3
10:10	09:30	648,7	0,84	28	35	37,4	45,6	31,6	397,8	144	61,3
11:10	10:30	818,1	0,84	28	38	41	51	33,5	493,8	144	60,4
12:10	11:30	913,4	0,84	31	41,5	44,8	56	37,5	554,7	144	60,7
13:10	12:30	913,4	0,84	32	44,5	47,7	58,7	39	541,3	144	59,3
14:10	13:30	818,1	0,84	33	46,5	49,3	58,8	39,7	470,2	144	57,5
15:10	14:30	648,7	0,84	33	48,5	50,5	57,5	39	342,7	144	52,8
16:10	15:30	442,3	0,83	34	49	50,2	54,3	38,5	202,5	144	45,8
17:10	16:30	260,8	0,80	32	49	49,4	50,6	35,5	61,6	144	23,6
Rendement moyen											56,3

Tableau V.4: Résultats obtenus par simulation pour le 18/07/2013

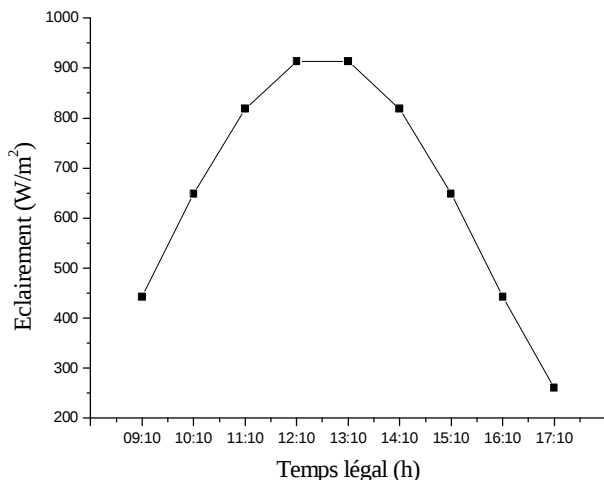


Figure V.13: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

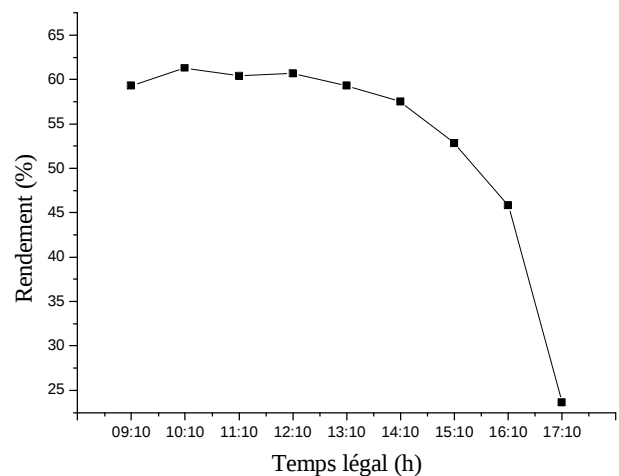


Figure V.14: Evolution du rendement en fonction du temps.

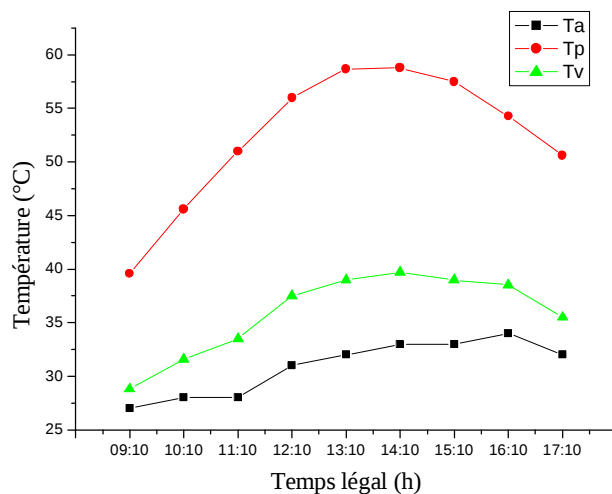


Figure V.15: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

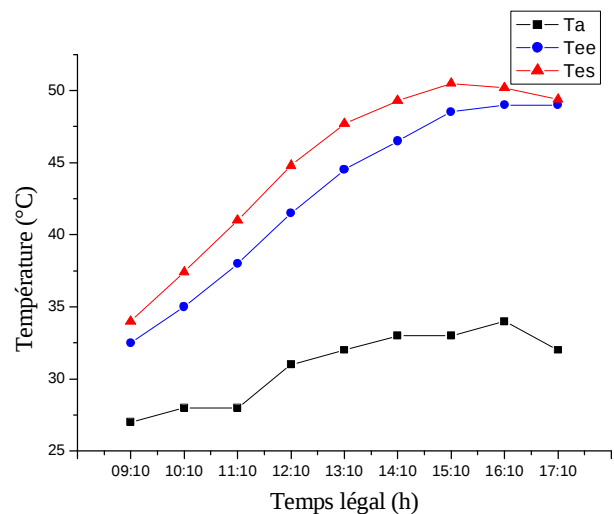


Figure V.16: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **19 Juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,53 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

$V_a = 2,23 \text{ m/s}$											
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T_{ee}(^{\circ}\text{C})$	$T_{es}(^{\circ}\text{C})$	$T_p(^{\circ}\text{C})$	$T_v(^{\circ}\text{C})$	$Q_u(\text{W})$	$Q_v(\text{l/h})$	$\eta(\%)$
09:10	08:30	443,1	0,83	28	34,5	35,6	41,3	30,2	259,4	200	58,6
10:10	09:30	650,5	0,84	31	37,5	39,2	48	35	406,4	200	62,5
11:10	10:30	820,7	0,84	33	41	43,2	54,2	38,8	514	200	62,6
12:10	11:30	916,6	0,84	34	44	46,4	58,4	41	567	200	61,8
13:10	12:30	916,6	0,84	36	47	49,4	61,2	43,6	560,3	200	61
14:10	13:30	820,7	0,84	37	49,5	51,6	61,8	44,3	485	200	59
15:10	14:30	650,5	0,84	38	51,5	53	60,6	44,4	362,3	200	55,7
16:10	15:30	443,1	0,83	35	52	52,8	57	40,5	194,4	200	43,8
17:10	16:30	260,4	0,80	34	51,5	51,8	53	38,2	61	200	23,4
Rendement moyen											57,6

Tableau V.5: Résultats obtenus par simulation pour le 19/07/2013

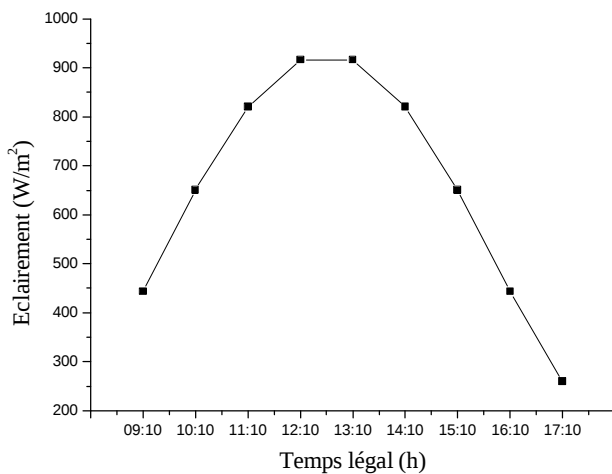


Figure V.17: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

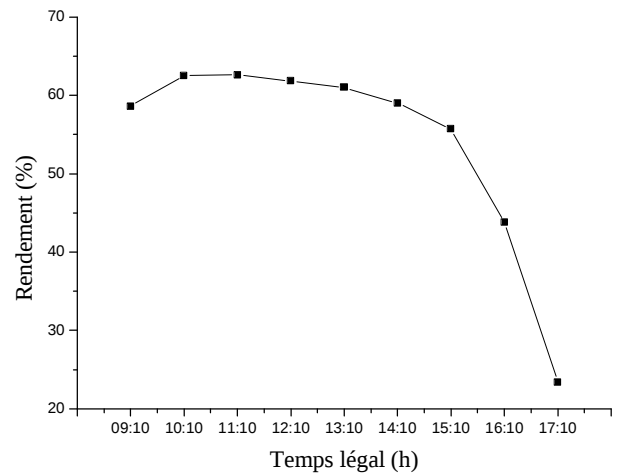


Figure V.18: Evolution du rendement en fonction du temps.

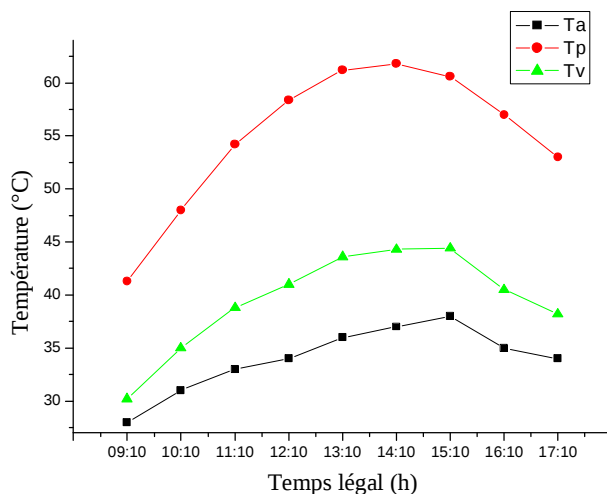


Figure V.19: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

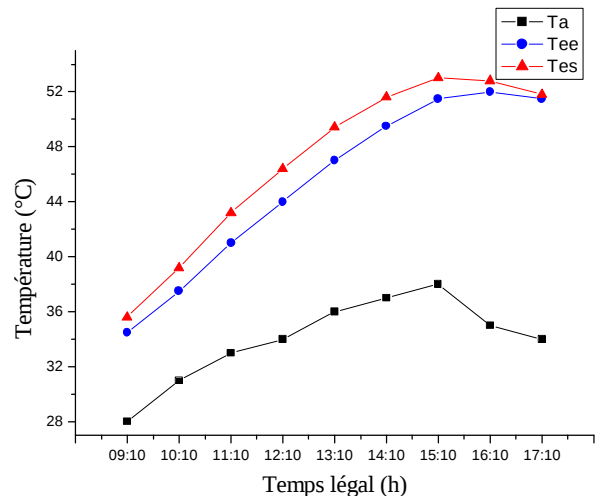


Figure V.20: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **25 juillet** : angle d'inclinaison $i = 20^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,43 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jr}$.

Va = 2,32 m/s												
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qu(W)	Qv(l/h)	$\eta(\%)$	
09:10	08:30	438,9	0,83	27	31,5	32,3	38,4	28,6	269,3	276	61,3	
10:10	09:30	647,6	0,84	30	34,5	35,8	45	33,3	417,8	276	64,5	
11:10	10:30	819,3	0,84	34	38,5	40,2	52	38,8	536,6	276	65,5	
12:10	11:30	916,1	0,84	36	42,5	44,3	57,2	42	590,6	276	64,5	
13:10	12:30	916,1	0,84	37	46	47,8	60,2	44	574,5	276	62,7	
14:10	13:30	819,3	0,84	37	49	50,5	61	44	488,7	276	59,6	
15:10	14:30	647,6	0,84	39	51	52	60,2	45	371	276	57,3	
16:10	15:30	438,9	0,83	38	51,5	52,2	56,8	42,7	214,3	276	48,4	
17:10	16:30	251,4	0,79	38	51,5	51,7	53,4	41,3	78,2	276	31	
Rendement moyen											60,1	

Tableau V.6: Résultats obtenus par simulation pour le 25/07/2013

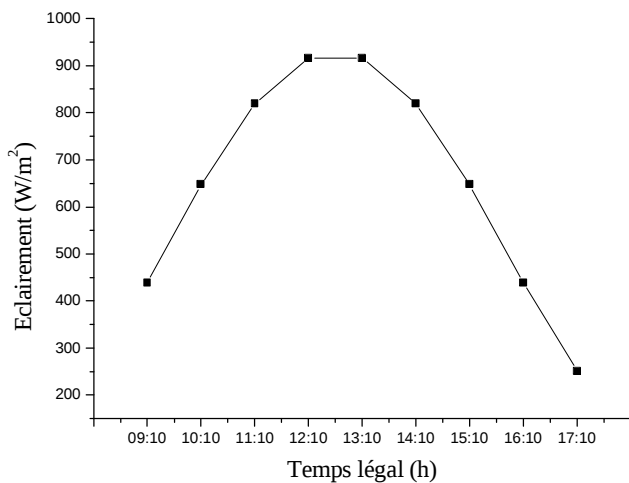


Figure V.21: Evolution de l'éclairement global G^* en fonction du temps.

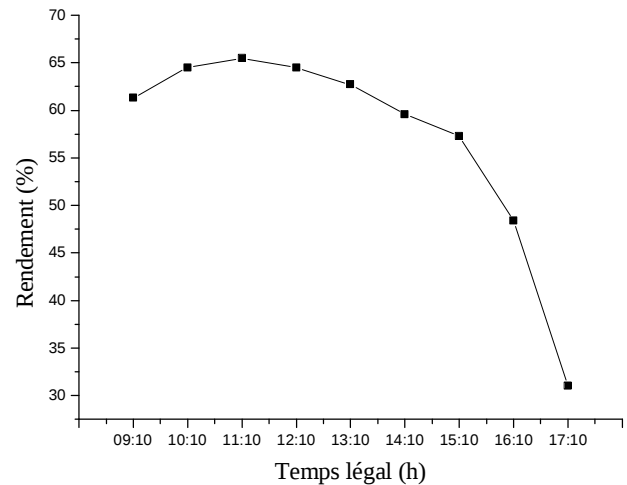


Figure V.22: Evolution du rendement en fonction du temps.

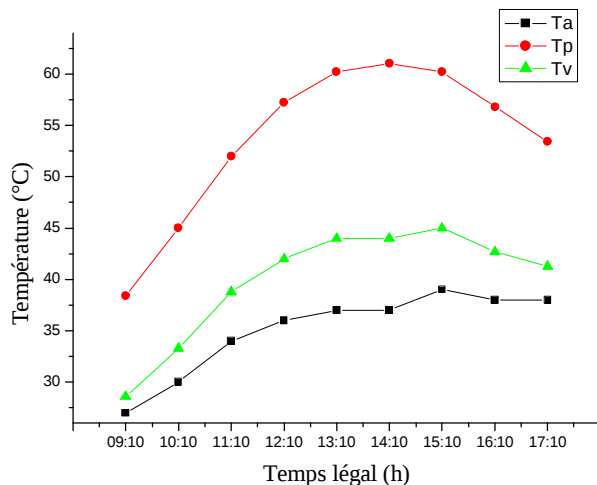


Figure V.23: Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

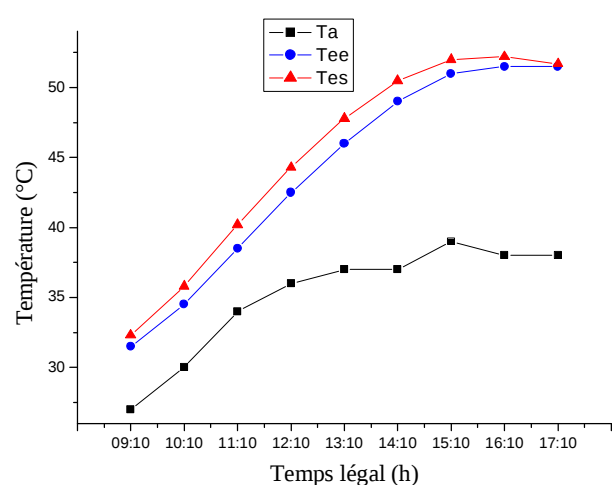


Figure V.24: Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

- **28 Juillet :** angle d'inclinaison $i = 0^\circ$, l'irradiation globale journalière $G = 7,2 \text{ KWh/m}^2.\text{jr}$.

Va = 2,45 m/s												
TL(h)	TSV(h)	$G^*(\text{W/m}^2)$	τ	Ta(°C)	Tee(°C)	Tes(°C)	Tp(°C)	Tv(°C)	Qu(W)	Qv(l/h)	$\eta(^\circ\text{C})$	
09:10	08:30	430,4	0,83	29	33,5	36,8	41,2	31	254,6	66	59	
10:10	09:30	619,3	0,84	31	36	41	47,5	34,8	381,7	66	61,6	
11:10	10:30	773,5	0,84	34	39	45,3	53,5	39,2	484,5	66	62,6	
12:10	11:30	860,1	0,84	34	42	48,7	57,5	40,7	523,4	67	60,8	
13:10	12:30	860,1	0,84	34	46	52,4	60,7	41,7	497,7	67	57,8	
14:10	13:30	773,5	0,84	34	47	52,5	59,8	41,3	434,4	68	56	
15:10	14:30	619,3	0,84	34	47,5	51,6	57,2	40,2	329	68	53	
16:10	15:30	430,4	0,83	34	48	50,5	53,8	38,7	197	68	45,8	
17:10	16:30	245,6	0,79	32	47,5	48,2	49,2	35,4	58	68	23,6	
Rendement moyen											56,3	

Tableau V.7: Résultats obtenus par simulation pour le 28/07/2013

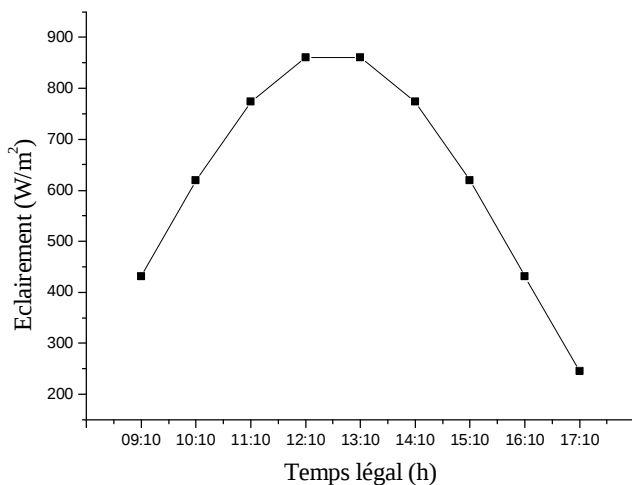


Figure V.25 : Evolution de l'éclairement solaire global G^* en fonction du temps.

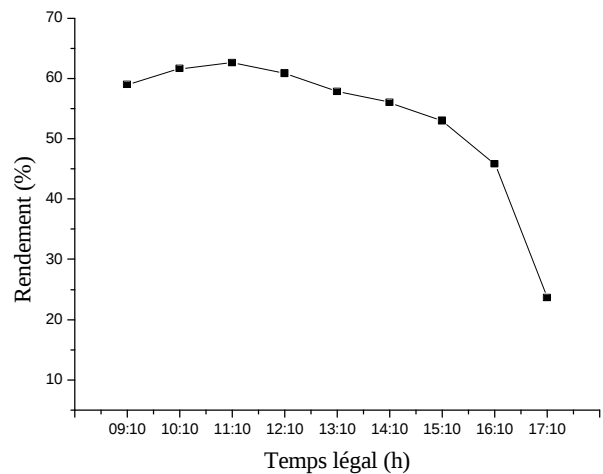


Figure V.26 : Evolution du rendement en fonction du temps.

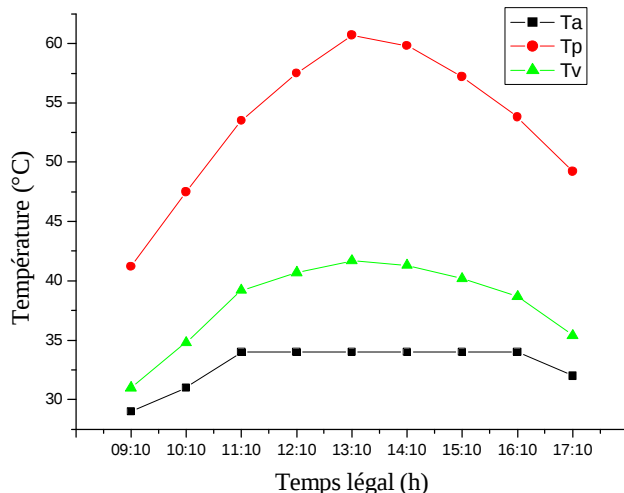


Figure V.27 : Evolution de la température de l'absorbeur et de la vitre.

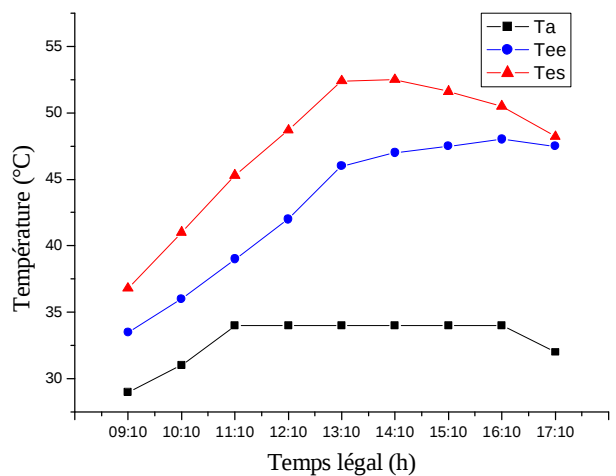


Figure V.28 : Evolution de la température d'entrée et de sortie de l'eau.

• Interprétation des résultats:

Les courbes caractérisant l'évolution du rendement instantané sont classiques et se ressemblent pour toutes les journées simulées. Sa valeur augmente en début de journée, jusqu'aux environs de 10h30 TSV, puis se stabilise pendant quelques heures avant de décliner en milieu d'après midi. On constate que la valeur moyenne du rendement n'est pas très affectée, moins de 10%, par l'inclinaison du capteur dans l'intervalle étudié (0° - 60°) ; l'angle le plus favorable à cette période de l'année pour Tizi Ouzou n'a pas été déterminé dans cette étude mais nous pouvons néanmoins avancer qu'il se situe entre 20° et 40° .

On peut également constater que le rendement augmente avec le débit ; ce résultat est caractéristique des capteurs et s'explique en grande partie par le fait que les niveaux de températures de l'eau et de l'absorbeur baissent sensiblement avec le débit et se rapprochent

de la température ambiante. Ce qui entraîne la diminution des pertes thermiques du capteur. Ainsi à inclinaison égale (20°), le rendement journalier pour un débit de 276 l/h vaut 60,1% et il vaut 56,3%, à 66 l/h.

La température d'entrée dans le capteur, prise égale dans nos calculs à la température de l'eau dans le réservoir, a pratiquement la même allure dans tous les cas traités. Elle augmente dans la matinée jusqu'à une valeur maximale, atteinte en général vers 13h 30 TSV puis demeure à ce niveau jusqu'en fin d'après-midi (17h), en subissant une très légère baisse.

Quant aux températures de sortie du capteur, elles suivent la même allure que les températures d'entrée jusqu'au milieu de la journée mais par la suite elles déclinent un peu plus que ces dernières en après midi.

A même débit, l'inclinaison n'a pas beaucoup d'influence sur le niveau des températures, même si on peut constater que les performances du capteur à 20° d'inclinaison sont légèrement meilleures. Ainsi la température maximale à 20° est supérieure d'environ 4°C à celle que l'on atteint à 60° d'inclinaison.

La valeur maximale de la température de l'eau atteinte en sortie de capteur pour ce mois de Juillet à Tizi Ouzou à un débit de 70 l/h et par m^2 est d'environ 55°C . Toutefois il est possible de dépasser ce niveau de température en réduisant le débit.

V.2.2 Influence du débit et de l'inclinaison sur le rendement et la température de sortie du capteur :

Les figures présentées ci-après montrent l'évolution du rendement et la température de sortie en fonction respectivement du débit et de l'inclinaison, tracées pour chaque une des journées à midi solaire.

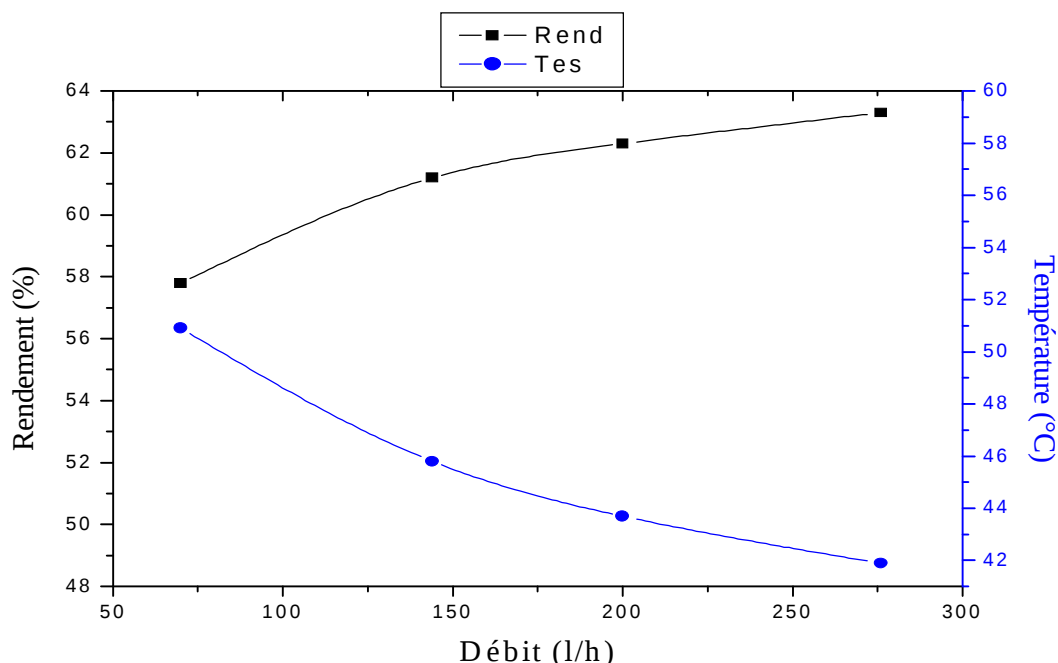


Figure V.29 : Evolution du rendement instantané et de la température de sortie en fonction du débit à 12h30mn TSV (journée du 15 Juillet).

L'augmentation du débit d'eau dans le capteur engendre celle de l'énergie récupérée par le fluide caloporteur et la diminution des pertes thermiques avec l'ambiance, cela a pour conséquent l'augmentation du rendement. Par contre, la température de sortie de l'eau diminue sensiblement avec le débit due à l'augmentation de la vitesse de circulation du fluide à l'intérieur des tubes.

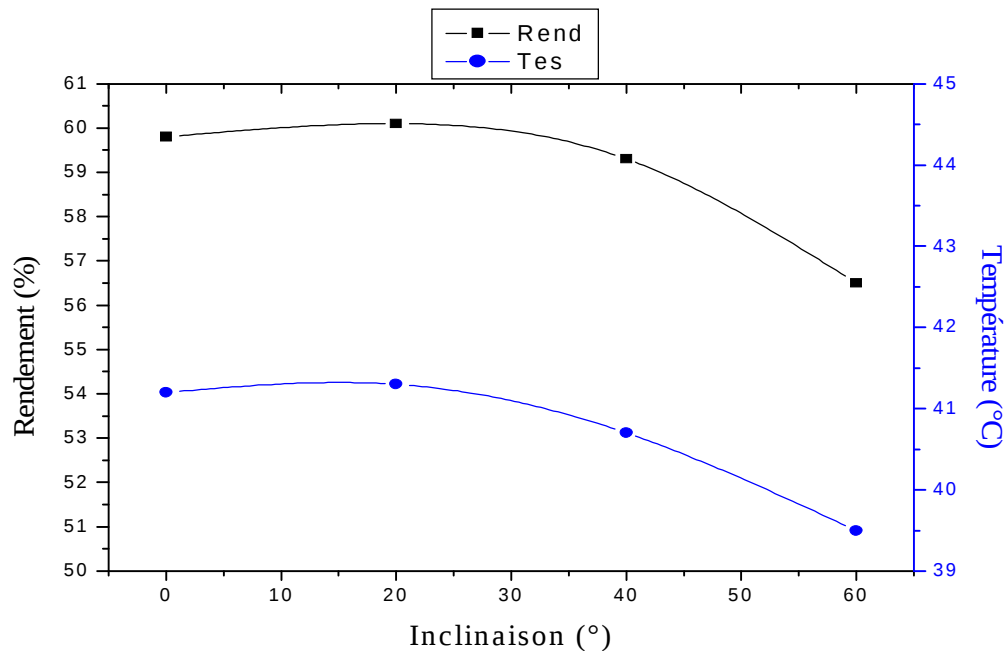


Figure V.30 : Evolution du rendement instantané et de la température de sortie en fonction de l'inclinaison à 12h30mn TSV (journée du 15 Juillet).

A même débit, on constate que l'inclinaison n'a pas beaucoup d'influence sur le rendement et la température de sortie de l'eau.

V.2.3 Simulation des performances annuelles du capteur :

Les courbes ci-dessous représentent l'évolution, de l'éclairement solaire, du rendement et de la température d'entrée et de sortie de l'eau, en fonction du temps légal et à différentes inclinaisons. Les tableaux de valeurs de toutes ces fonctions sont portés en annexe C. Les calculs s'appuient sur des fichiers de mesures effectuées sur le site, de l'irradiation mensuelle, de la vitesse du vent et de la température ambiante moyennées sur 22 années (annexe D).

• **Mois de Janvier :**

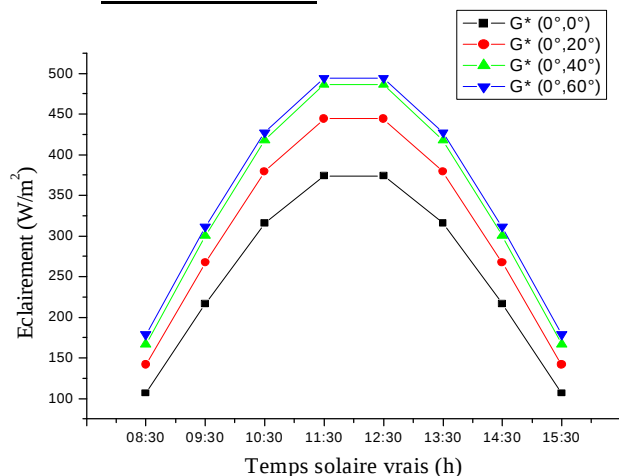


Figure V.31: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

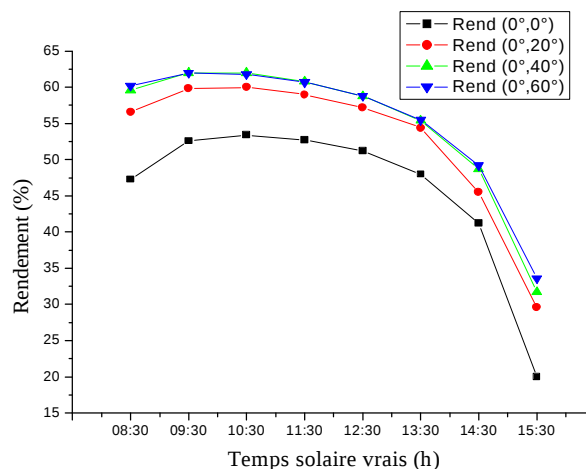


Figure V.32: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

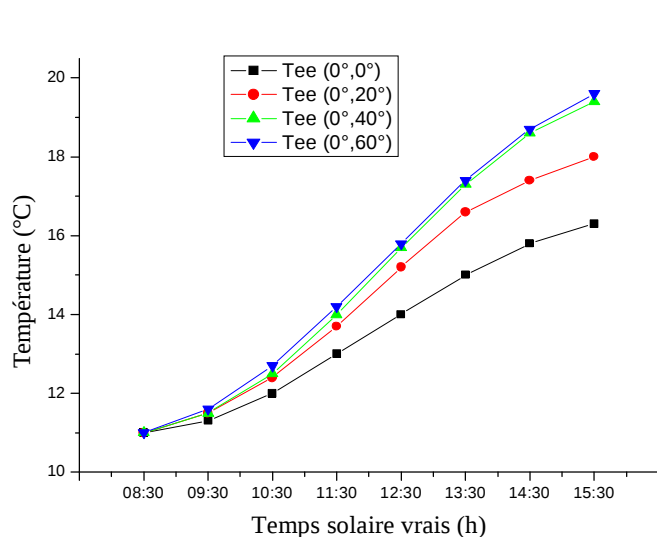


Figure V.33: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

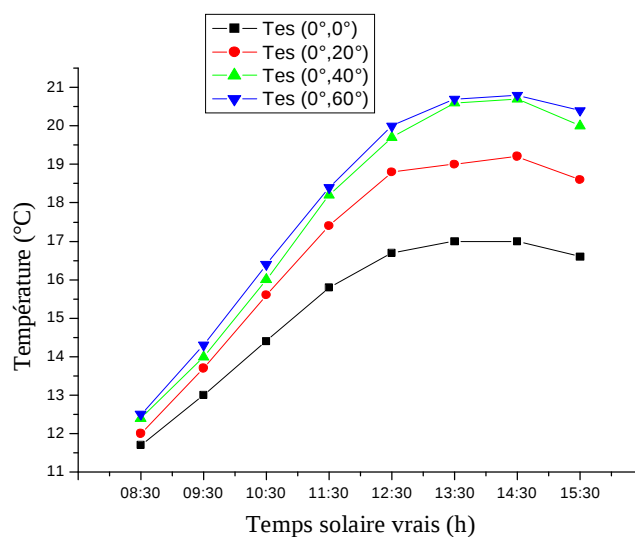


Figure V.34: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois de Février :**

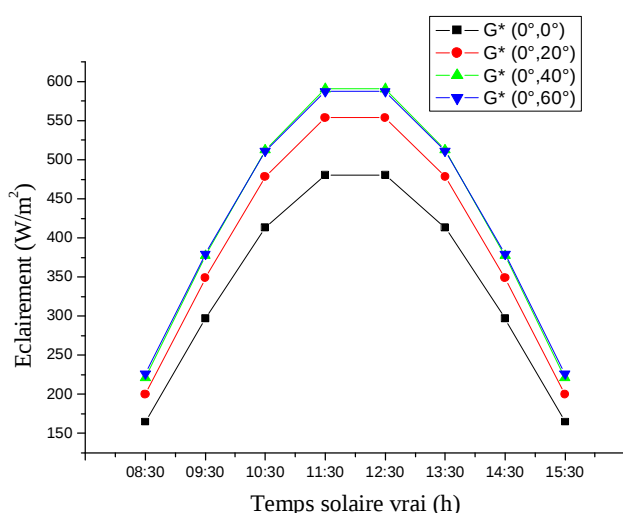


Figure V.35: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

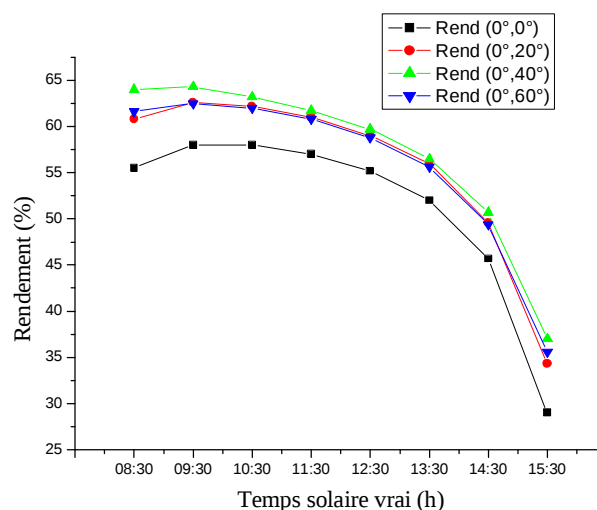


Figure V.36: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

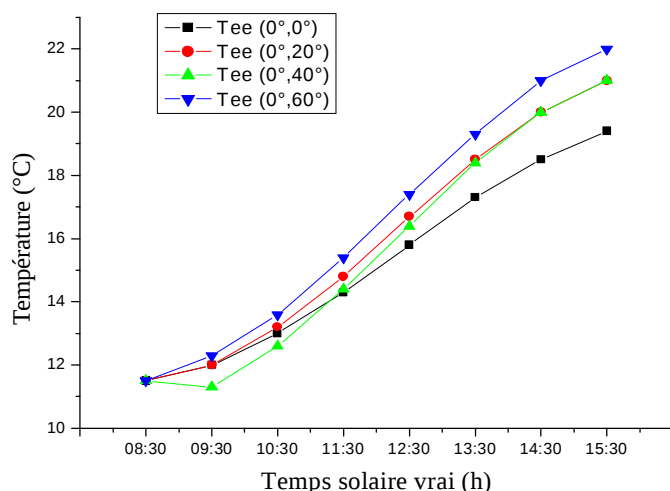


Figure V.37: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

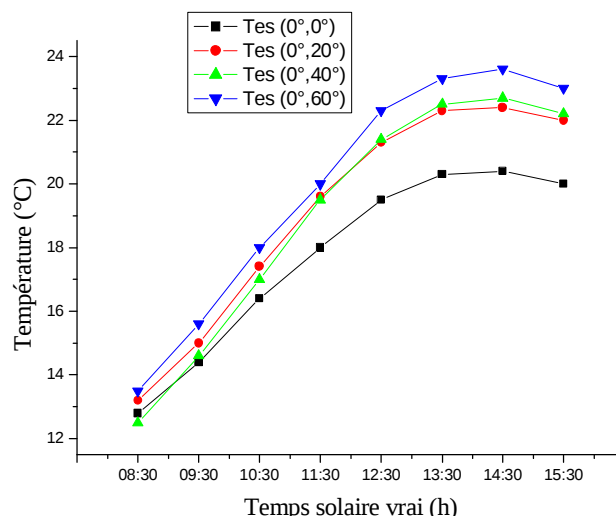


Figure V.38: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois de Mars :**

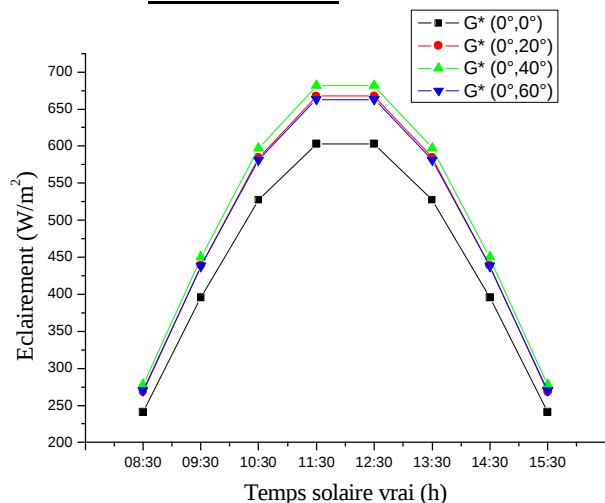


Figure V.39: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

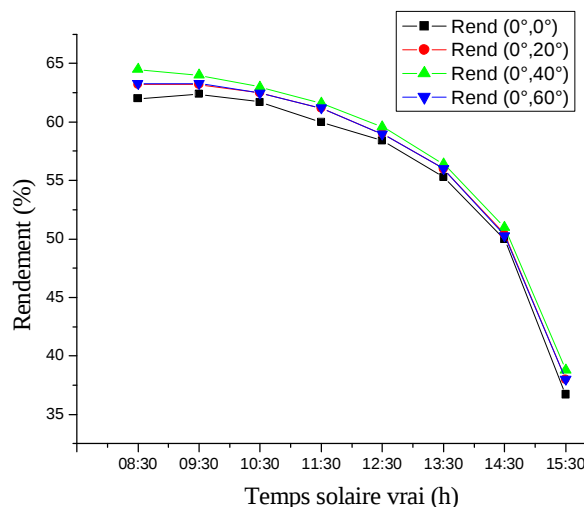


Figure V.40: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

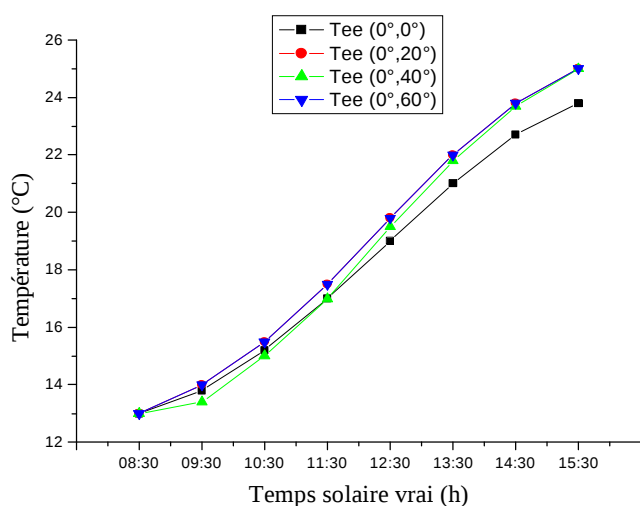


Figure V.41: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

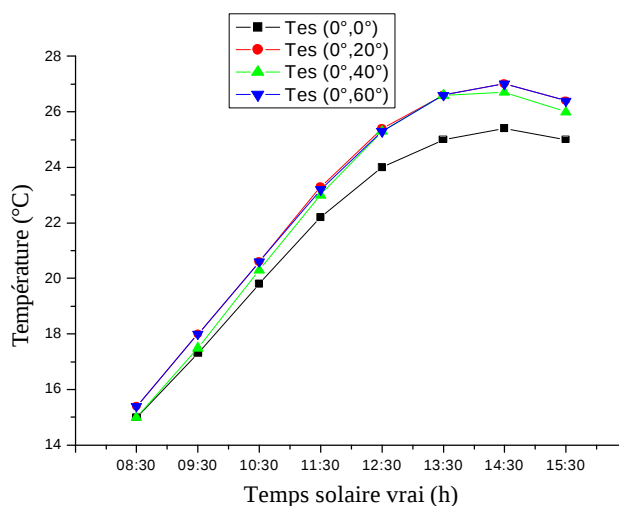


Figure V.42: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• Mois d'Avril :

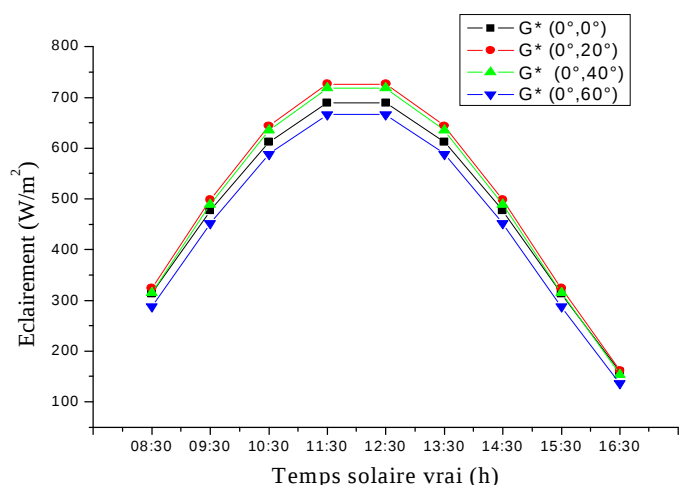


Figure V.43: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

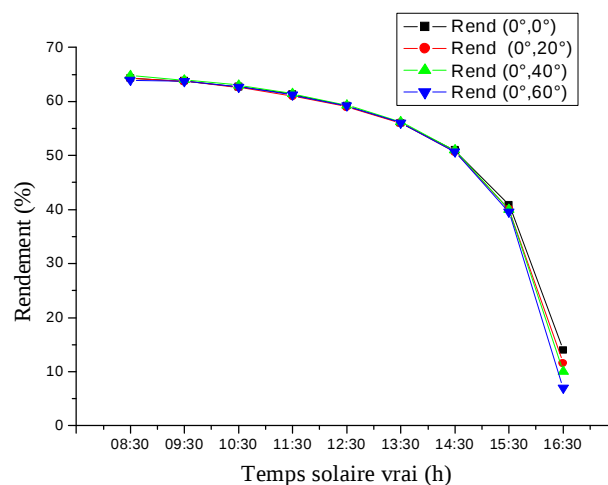


Figure V.44: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

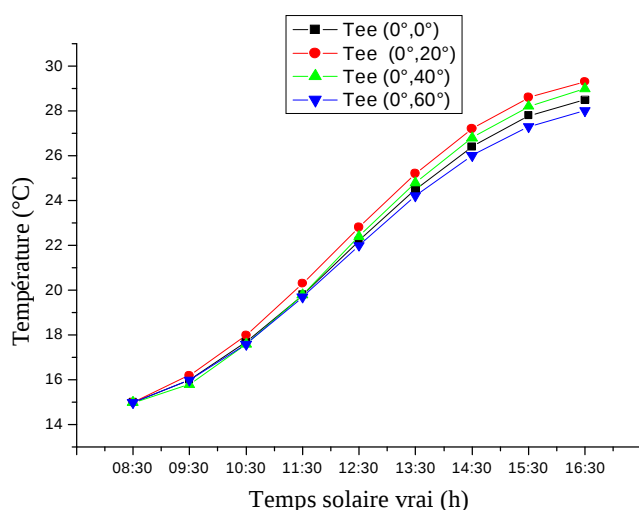


Figure V.45: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

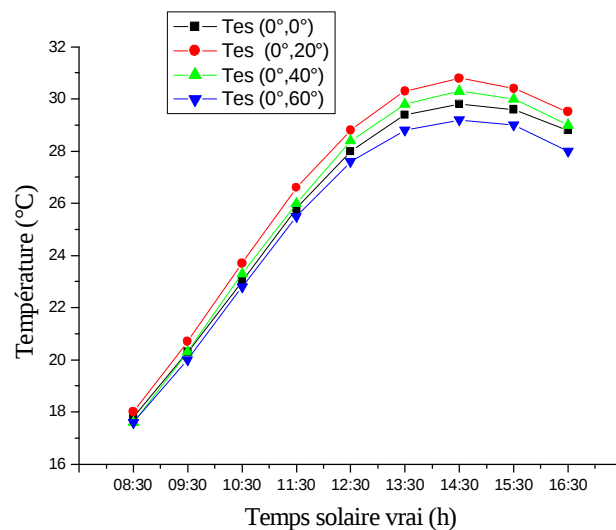


Figure V.46: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• Mois de Mai :

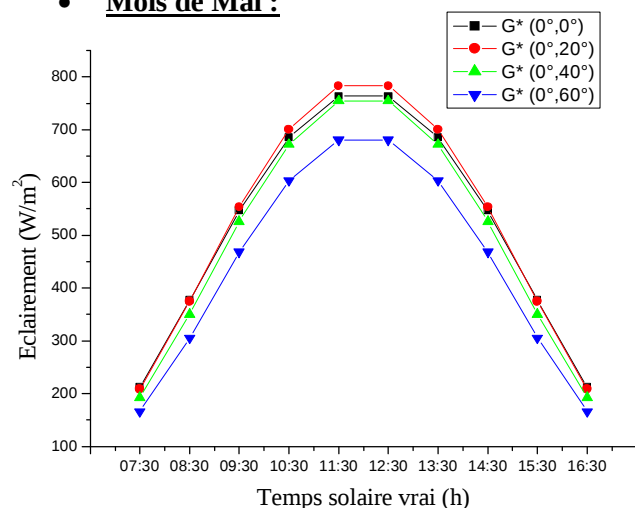


Figure V.47: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

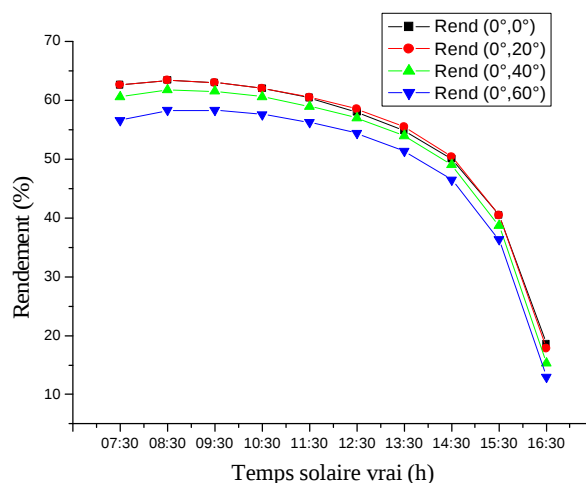


Figure V.48: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

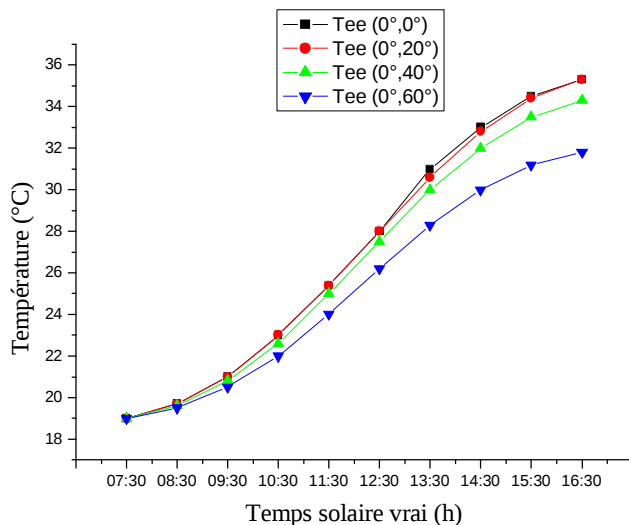


Figure V.49: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

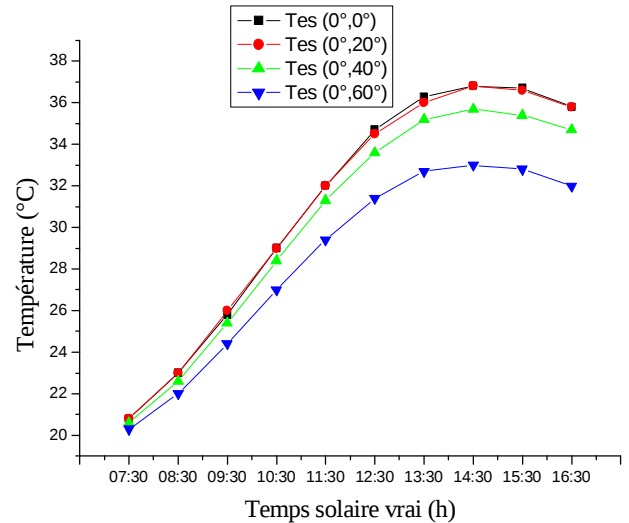


Figure V.50: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois de juin :**

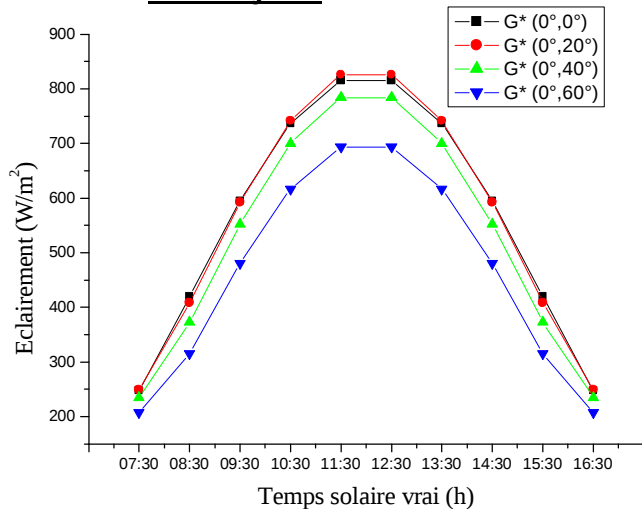


Figure V.51: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

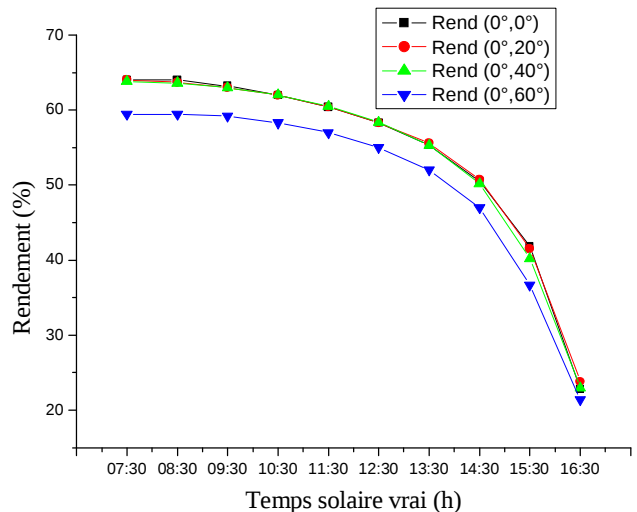


Figure V.52: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

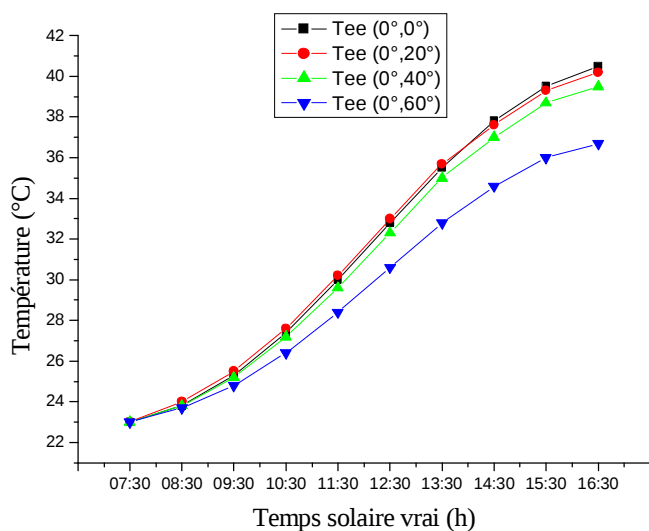


Figure V.53: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

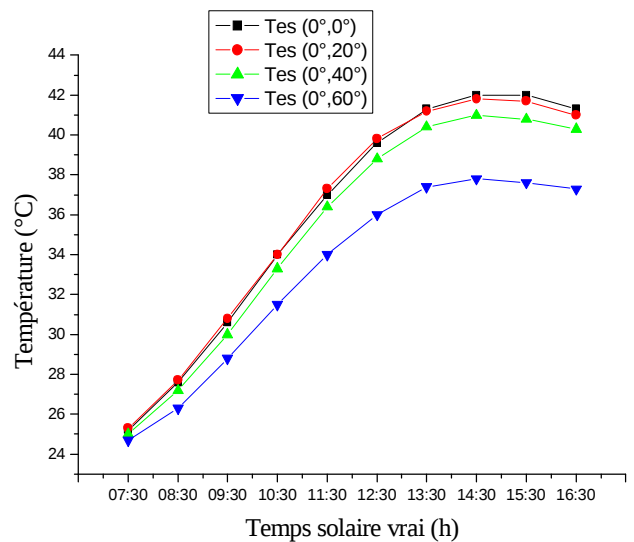


Figure V.54: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois de Juillet :**

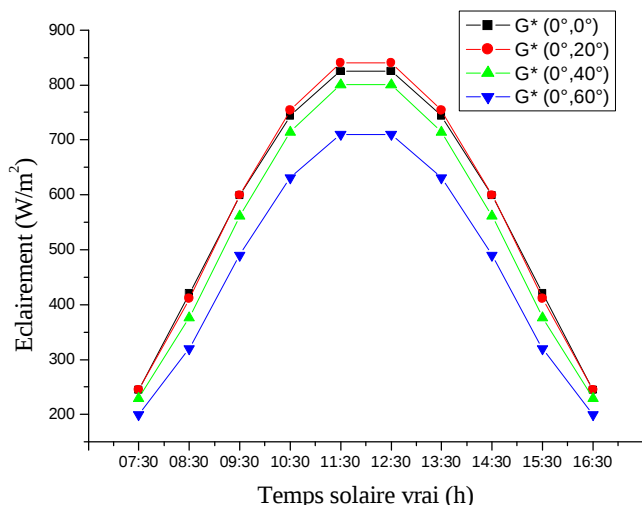


Figure V.55: Evolution de l'éclairement solaire global G^* à différents angles d'inclinaison.

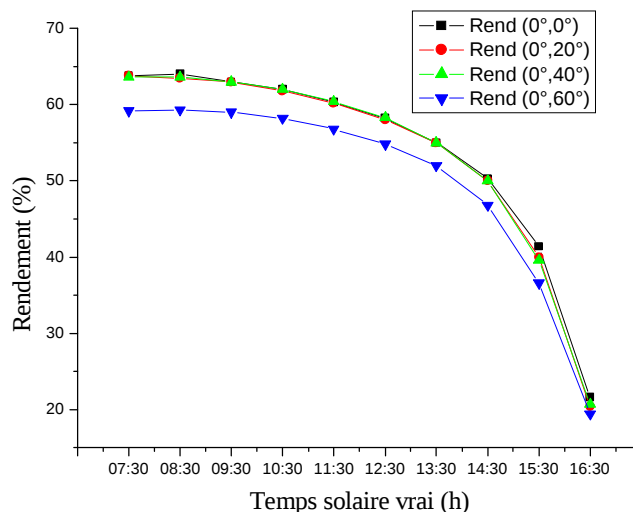


Figure V.56: Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

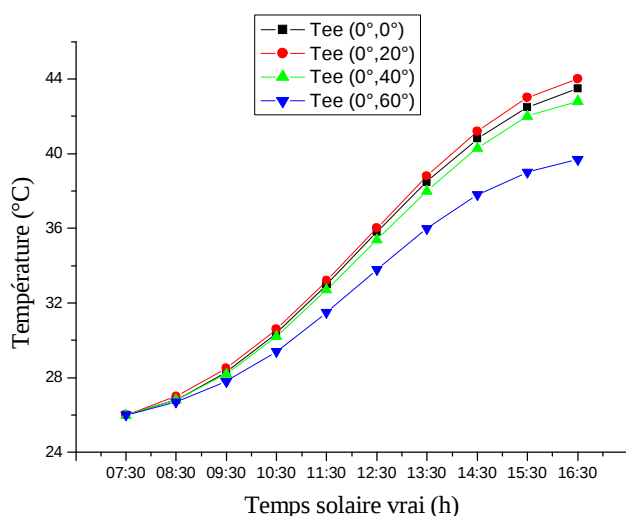


Figure V.57: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

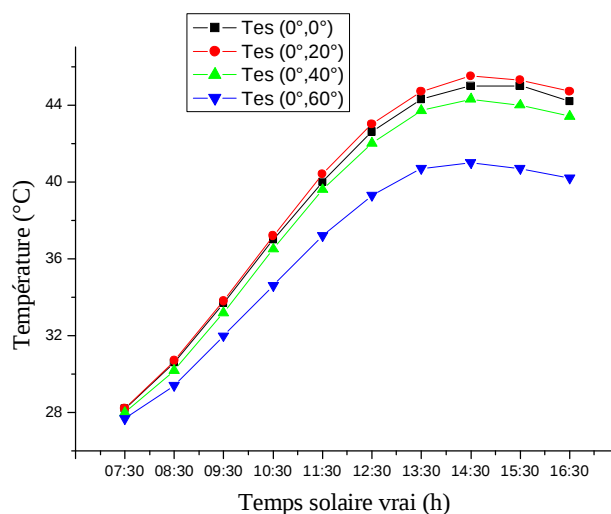


Figure V.58: Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois d'Août :**

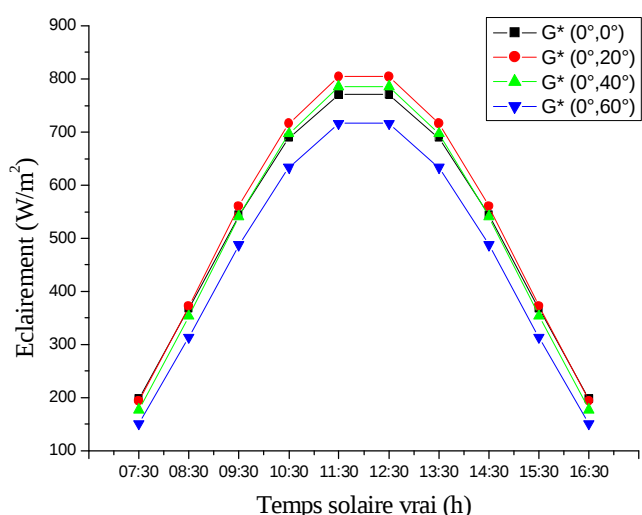


Figure V.59 : Evolution de l'éclairement solaire G^* à différents angles d'inclinaison.

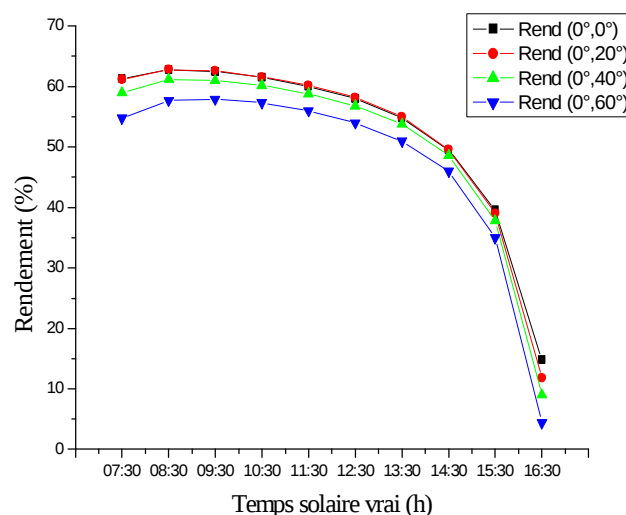


Figure V.60 : Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

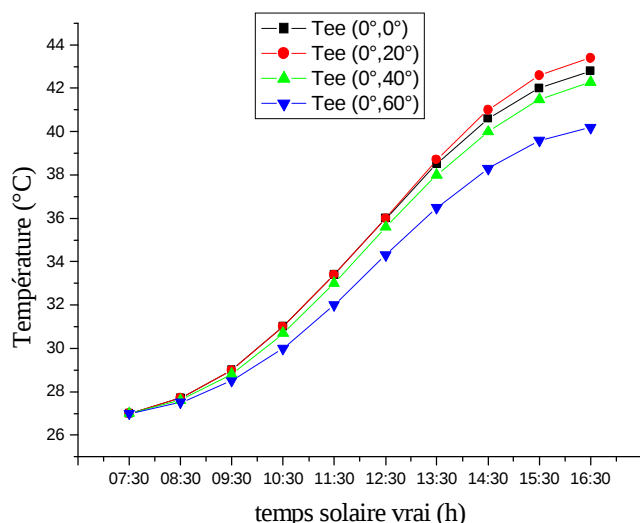


Figure V.61: Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

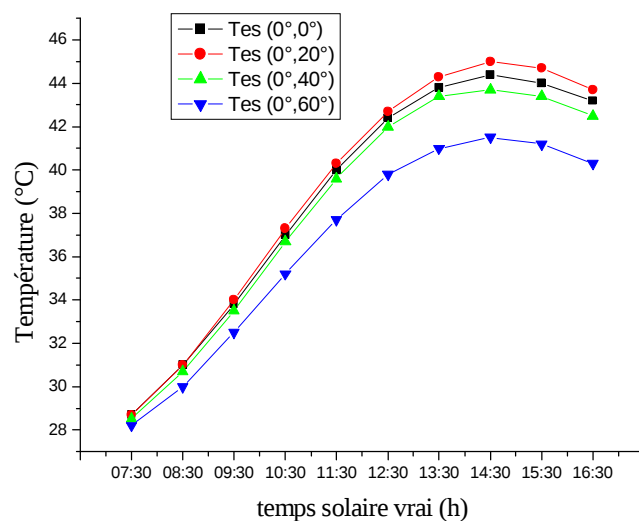


Figure V.62 : Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• Mois de Septembre :

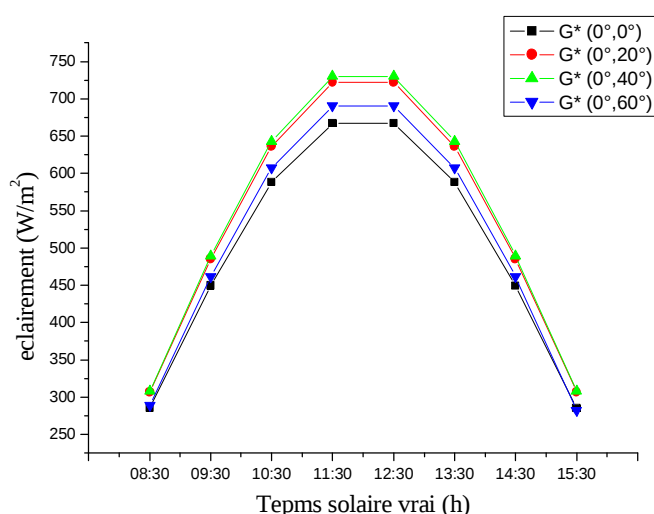


Figure V.63 : Evolution de l'éclairement solaire G^* à différents angles d'inclinaison.

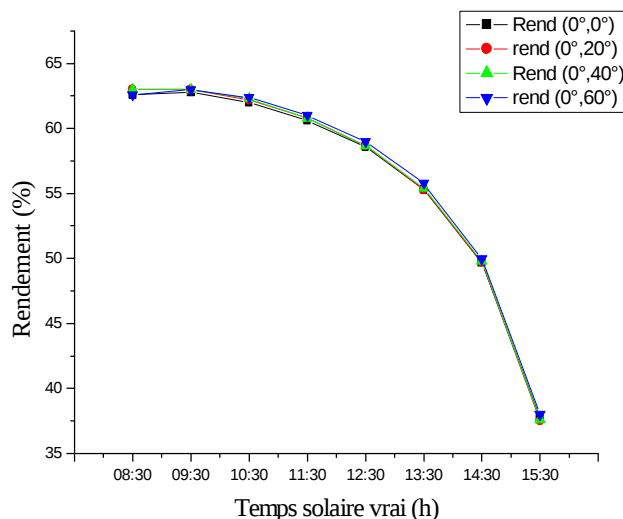


Figure V.64 : Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

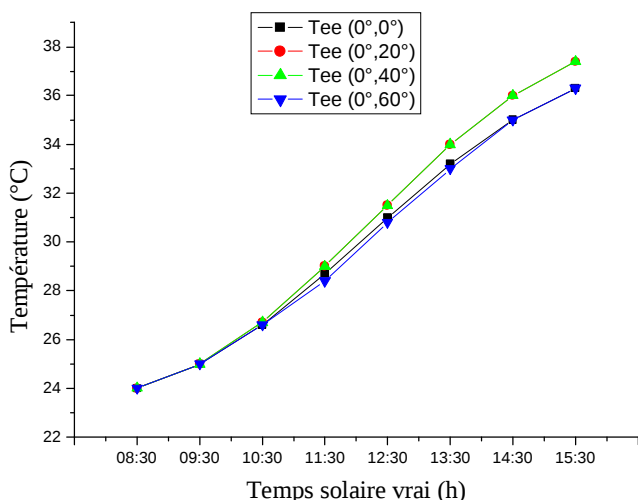


Figure V.65 : Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

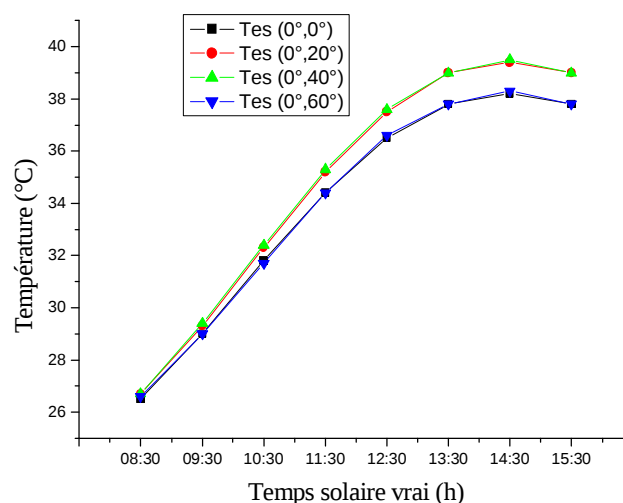
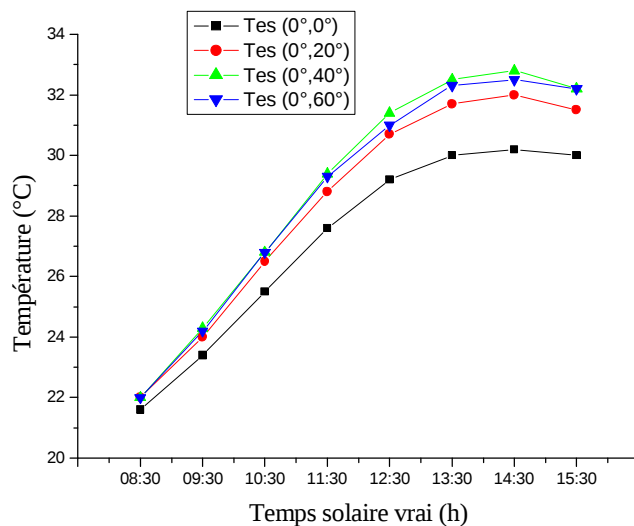
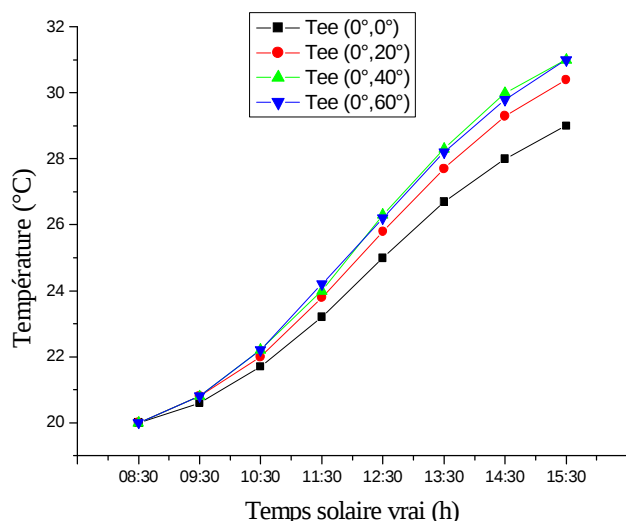
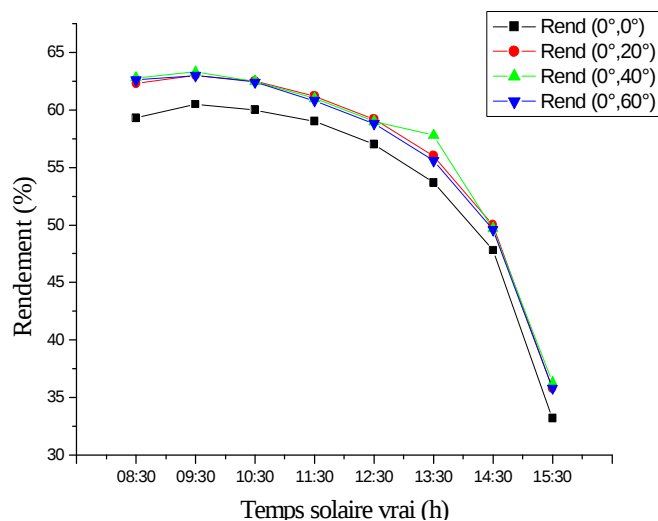
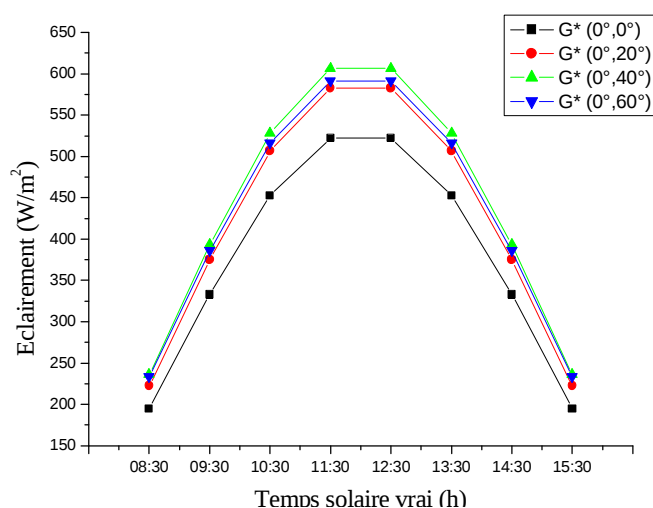
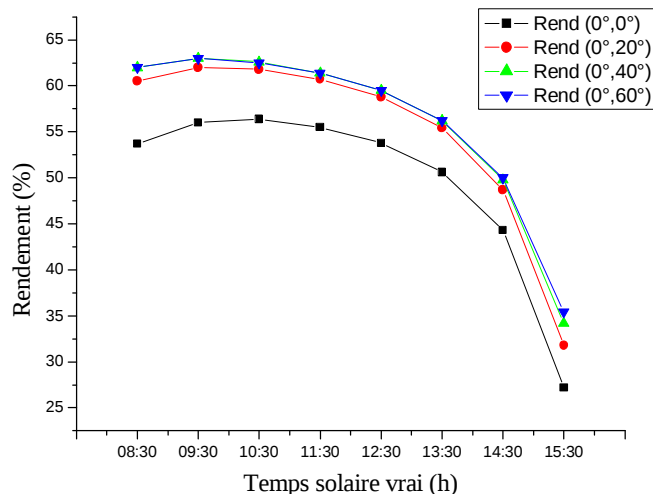
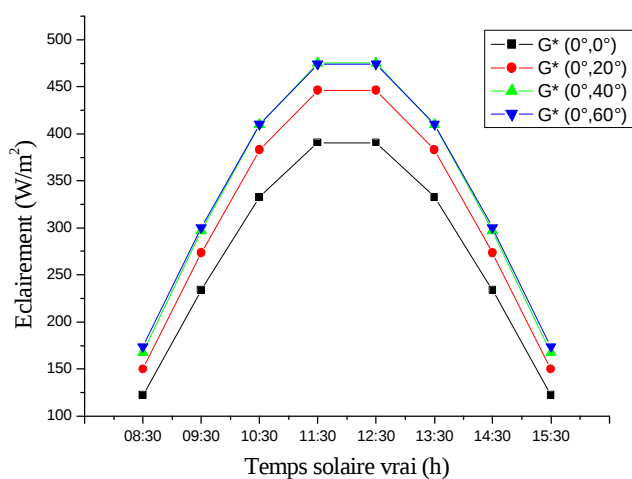


Figure V.66 : Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• Mois d'Octobre :



• Mois de Novembre :



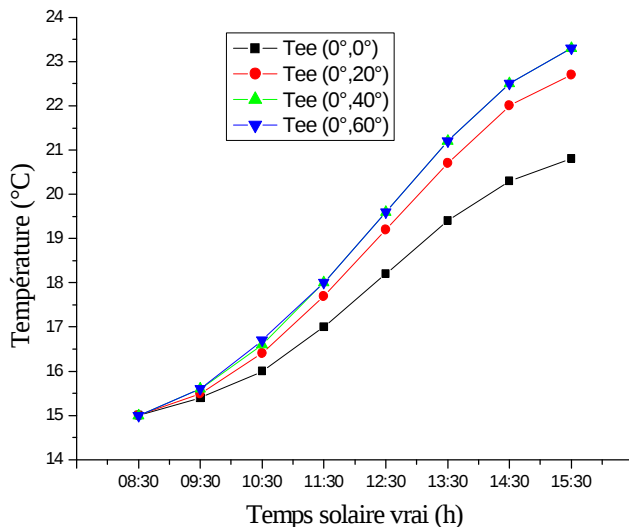


Figure V.73 : Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

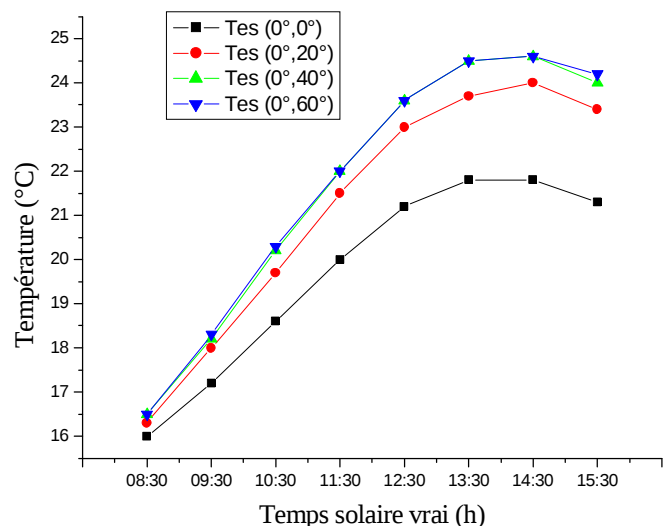


Figure V.74 : Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• **Mois de Décembre :**

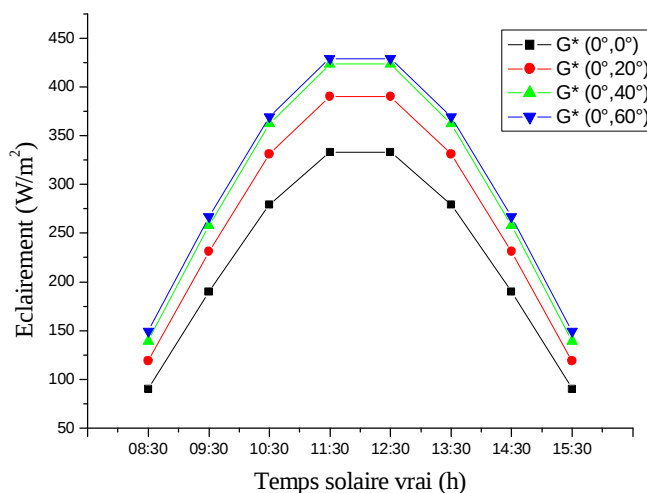


Figure V.75 : Evolution de l'éclairement solaire G^* à différents angles d'inclinaison.

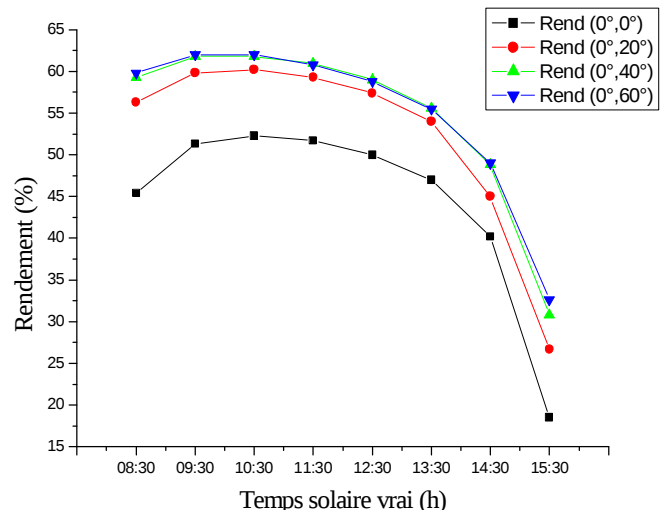


Figure V.76 : Evolution du rendement à différents angles d'inclinaison.

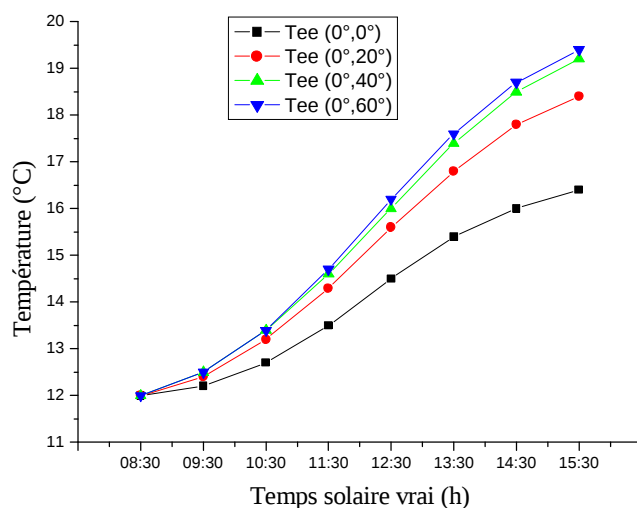


Figure V.77 : Evolution de la température d'entrée à différents angles d'inclinaison.

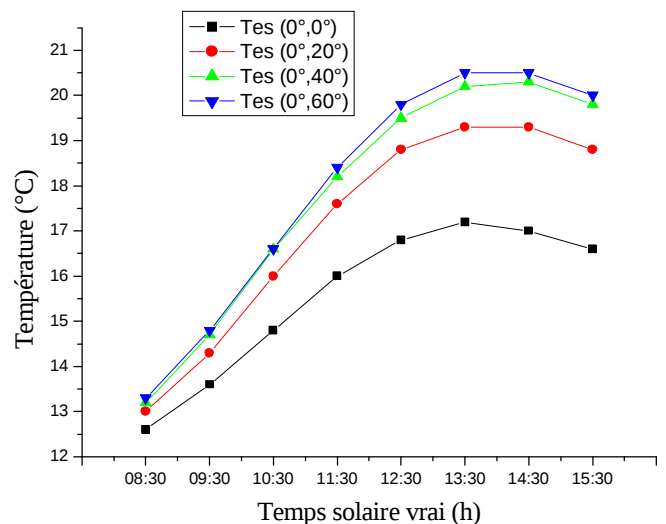


Figure V.78 : Evolution de la température de sortie à différents angles d'inclinaison.

• Commentaires :

Les courbes ci-dessus paramétrées en fonction de l'inclinaison décrivent l'évolution mois par mois de l'éclairement, du rendement et des températures d'entrée et sortie. Chaque saison présente un angle d'inclinaison favorable, qui correspond au maximum de puissance solaire pouvant être recueillie par l'absorbeur.

Nous avons déterminé l'angle d'inclinaison favorable du point de vue de l'éclairement reçu au milieu de chacune des quatre saisons; nous avons obtenu les résultats suivants:

ü Janvier : $i_{op}=60^\circ$, $G_{max}^* = 503,2 \text{ W/m}^2$, $\eta_{moy} = 56,9\%$, $T_{ee \text{ max}} = 19,6 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{es \text{ max}} = 20,8 \text{ }^\circ\text{C}$

ü Avril : $i_{op} = 20^\circ$, $G_{max}^* = 737 \text{ W/m}^2$, $\eta_{moy} = 56,4\%$, $T_{ee \text{ max}} = 29,3 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{es \text{ max}} = 30,8 \text{ }^\circ\text{C}$

ü Juillet : $i_{op} = 20^\circ$, $G_{max}^* = 853 \text{ W/m}^2$, $\eta_{moy} = 55,9\%$, $T_{ee \text{ max}} = 44 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{es \text{ max}} = 45,5 \text{ }^\circ\text{C}$

ü Octobre : $i_{op} = 40^\circ$, $G_{max}^* = 622,8 \text{ W/m}^2$, $\eta_{moy} = 57,6\%$, $T_{ee \text{ max}} = 31 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_{es \text{ max}} = 32,8 \text{ }^\circ\text{C}$.

V.3 Rendement annuel du capteur:

A partir des tableaux de l'annexe (C), nous allons estimer le rendement annuel du capteur, en calculant les énergies utiles et solaires mensuelles et annuelles en fonction de l'angle d'inclinaison du capteur dans l'intervalle ($0^\circ - 60^\circ$).

Le rendement annuel est calculé comme suit : [1]

$$\eta_{an} = \frac{E_{u \text{ an}}}{E_{s \text{ an}}} \quad (\text{V.1})$$

η_{an} est le rendement annuel et $E_{u \text{ an}}$ est l'énergie utile annuelle récupérée par le fluide caloporteur, calculée comme suit :

$$E_{u \text{ an}} = \sum_{i=1}^{12} E_{u \text{ m}} \quad (\text{V.2})$$

Où $E_{u \text{ m}}$ est l'énergie utile mensuelle, donnée par:

$$E_{u \text{ m}} = \eta_m \times E_{s \text{ m}} \quad (\text{V.3})$$

Le rendement moyen mensuel η_m est pris égal au rendement moyen de la journée type du mois.

$E_{s \text{ m}}$ est l'énergie solaire mensuelle, et sera calculée par :

$$E_{s \text{ m}} = E_{s \text{ j}} \times n \quad (\text{V.4})$$

E_{sj} est l'irradiation journalière en moyenne mensuelle et n représente le nombre de jours du mois considéré.

Finalement l'énergie solaire annuelle E_{san} reçue par le capteur est :

$$E_{san} = \sum_{i=1}^{12} E_{sm} \quad (V.5)$$

Les résultats obtenus à partir de ces équations sont portés sur les tableaux ci-dessous, avec une représentation graphique de l'évolution du rendement annuel en fonction de l'angle d'inclinaison.

	0°			20°		
	$G_s(Kwh/m^2)$	$E_u(Kwh/m^2)$	$\eta(\%)$	$G_s(Kwh/m^2)$	$E_u(Kwh/m^2)$	$\eta(\%)$
Janvier	62,8	30,5	48,6	76,4	42,2	55,2
Février	76,5	40,7	53,1	89,3	51,2	57,4
Mars	109,6	62,4	57,0	121,5	70,2	57,8
Avril	130,3	73,7	56,6	136,4	76,9	56,4
Mai	160,2	89,5	55,9	162,4	91,1	56,1
Juin	168,9	95,1	56,3	169,2	95,3	56,3
Juillet	175,6	98,6	56,1	176,7	98,7	55,9
Aout	159,3	88,2	55,4	164,1	91,0	55,4
Septembre	119,4	68,3	57,2	129,0	73,7	57,1
Octobre	93,2	51,5	55,2	104,5	60,2	57,6
Novembre	64,7	33,5	51,7	75,1	42,7	56,9
Décembre	55,3	26,3	47,5	66,4	36,5	55,0
Annuels	1375,9	758,2	55,1	1471,0	829,7	56,4

	40°			60°		
	$G_s(Kwh/m^2)$	$E_u(Kwh/m^2)$	$\eta(\%)$	$G_s(Kwh/m^2)$	$E_u(Kwh/m^2)$	$\eta(\%)$
Janvier	85,0	48,2	56,7	87,5	49,8	56,9
Février	96,1	54,1	56,3	98,3	55,0	55,9
Mars	124,5	72,7	58,4	121,1	70,0	57,8
Avril	134,1	76,0	56,7	123,7	69,7	56,3
Mai	154,7	84,5	54,6	137,9	71,5	51,9
Juin	158,7	89,2	56,2	138,8	73,2	52,7
Juillet	166,3	92,8	55,8	145,7	76,6	52,6
Aout	158,4	85,8	54,2	142,7	73,3	51,4
Septembre	130,5	73,1	56,0	122,7	70,8	57,7
Octobre	97,0	63,0	65,0	107,1	61,4	57,3
Novembre	81,0	44,1	54,5	81,5	47,1	57,8
Décembre	73,3	41,7	56,8	75,3	42,8	56,8
Annuels	1459,4	831,6	56,5	1382,3	761,2	55,1

Tableaux V.8 : Résultats des énergies et du rendement mensuels et annuels pour différents angles d'inclinaisons.

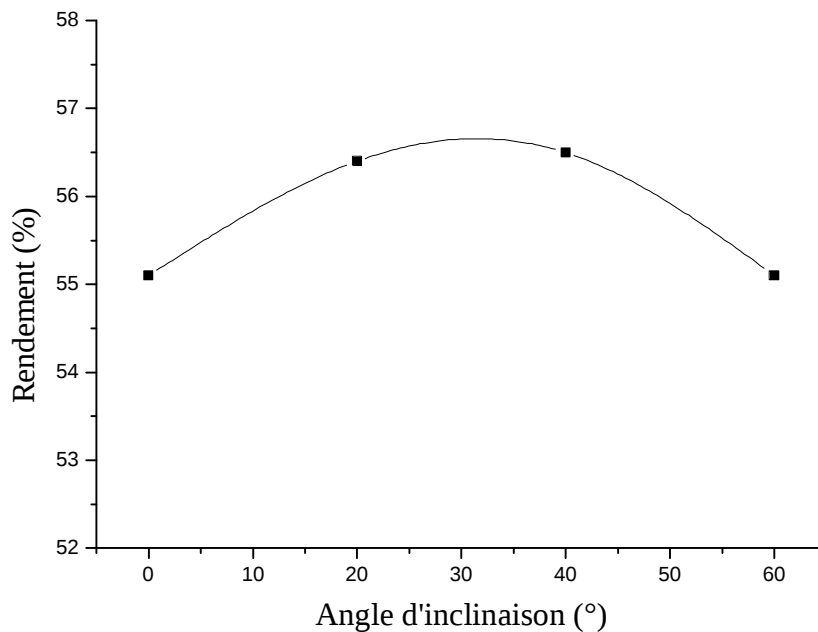


Figure V.26 : Evolution du rendement annuel théorique en fonction de l'inclinaison.

Globalement, l'inclinaison dans l'intervalle choisi n'a pas beaucoup d'influence sur le rendement. Par contre on peut constater que l'énergie utile récupérée est plus importante aux environs de 40°.

V.4 Considérations économiques:

Après avoir étudié sur le plan technique le capteur solaire à effet de serre, il nous a paru intéressant d'estimer sa rentabilité économique. Cette étude simplifiée consiste à évaluer en premier lieu le coût total du prototype réalisé puis l'économie éventuelle en supposant une durée de vie de 15 années pour le prototype.

. Durant cette période nous avons prévu deux opérations:

- Ø de changement de mastic colle utilisé pour l'assemblage des canettes.
- Ø de réfection de la peinture noire des canettes.

Ce sont les seuls coûts de maintenance prévus.

- **Evaluation du coût de capteur**

- 1) Coût des matières :

Sur le tableau V.9, nous avons mentionné les prix actuels des matériaux utilisés lors de la fabrication du prototype.

Désignation	Quantité	P.U (DA)	Total (DA)
Bois d'épaisseur 1 cm	1,19 m ²	695	827
Bois d'épaisseur 1,8 cm	1,21 m ²	868	1050
Tôle galvanisée 0.3 mm	0,2 m ²	425	85
Polystyrène 3 cm	1,8 m ²	400	720
Tube galvanisée 26/34 mm	0,3 m	250	75
Vitrage ordinaire 5 mm	1,15 m ²	783	900
Mastic de silicone	2 tubes	550	1100
Mastic	0,25 Kg	120	30
Papier Aluminium	1 rouleau	100	100
Peinture noire	½ Kg	250	125
Vis	10	2	20
Clous	0,25 Kg	120	30
Canettes	81	1	81
Le montant total C (DA)			5143

Tableau V.9 : Montant total « C_{mt} » des composants du prototype.

2) Coûts de fabrication :

Ces coûts comprennent le perçage des canettes et la main d'œuvre.

$$C_F = C_P + C_{MO}$$

Les coûts de perçage sont estimés à 5 Da l'unité, soit

$$C_P = 5 \times 81 = 405 \text{ DA}$$

Nous avons estimé à 3 jours, le temps nécessaire à deux ouvriers qualifiés pour peindre et coller les canettes puis assembler les différents éléments du capteur. Les frais de main d'œuvre calculés sur la base de 800 DA par jour et par ouvrier, est donc :

$$C_{MO} = 2 \times 3 \times 800 = 4800 \text{ DA}$$

Soit : $C_F = 5205 \text{ DA}$

3) Coût de maintenance :

Le coût de maintenance C_m est calculé comme suit :

$$C_m = 2(P_m + P_p)$$

P_m : Prix du mastic colle

P_p : Prix de la peinture.

$$C_m = 2(1100 + 125) = 2450 \text{ DA}$$

Le coût total du prototype de capteur de surface 1m^2 est ainsi égal à :

$$C_c = C_{mt} + C_F + C_m = \mathbf{12798 \text{ DA}}$$

Il paraît évident que l'industrialisation du processus de fabrication ne peut que baisser le prix de revient de ce système.

- **Indice de rentabilité** : [2]

$$IR = \frac{D_v \cdot E_{uan} \cdot C_e}{C_c} \quad (V.6)$$

Avec :

D_v : Durée de vie du capteur (Ans).

C_e : Coût d'un KWh d'électricité (4,25 DA/KWh).

Si on suppose que le capteur est utilisé dans une installation de chauffage et/ou production d'eau chaude sanitaire qui fonctionne 8 mois sur 12, entre Octobre et Mai, l'énergie économisée est la somme des énergies utiles mensuelles (voir tableau V.8) recueillies pendant cette période, soit 485 KWh.

Ainsi, l'indice de rentabilité est égal :

$$IR = \frac{15 \times 485 \times 4,25}{12798 \times 1} = \mathbf{2.41}$$

- **Délai de retour sur l'investissement** :

Le calcul du délai de retour sur l'investissement A_0 (durée d'amortissement) se fait comme suit :

$$A_0 = \frac{C_c}{E_{uan} \cdot C_e} = \frac{12798}{485 \times 4,25} = \mathbf{6.2 \text{ ans}} \quad (V.7)$$

V.5 Conclusion :

Ces résultats montrent qu'en utilisation estivale du capteur, il faut donner une légère inclinaison (20°) pour espérer un meilleur rendement de l'installation tandis que lorsqu'on prévoit de l'utiliser en saison froide, il faut augmenter cet angle.

Le rendement moyen mensuel du capteur ne varie pas énormément au cours de l'année. Il est de l'ordre de 57% à 2% près.

L'étude économique du prototype de capteur, réalisé avec des moyens simples et des matériaux de récupération montre que la contribution d'un tel système à l'économie d'énergie est très intéressante et que sa rentabilité est assurée.

Conclusion générale

Notre objectif a été atteint : nous avons mené à terme l'opération de fabrication d'un capteur solaire thermique écologique utilisant des canettes de récupération jetées dans la nature. Ces canettes ont été récupérées, transformées et assemblées pour former des conduits de fluide caloporteur et d'absorbeur pour le rayonnement solaire.

Nous avons élaboré un modèle mathématique de calcul à partir des expressions mathématiques qui décrivent les échanges thermiques dans le capteur. Ce modèle est validé dans les limites des moyens utilisés par comparaison aux mesures expérimentales de températures et rendements. Par exemple, pour la journée du 15 Juillet nous avons obtenu un rendement moyen théorique de 55,1% contre un rendement moyen expérimental de 44,5%. La température maximale calculée vaut 54,2°C et celle qui est mesurée est 54°C. L'écart des rendements peut paraître important mais il s'explique par l'incidence des passages nuageux qui ne sont pas pris en compte dans le calcul du gisement solaire

Après avoir validé notre modèle, nous l'avons utilisé pour l'évaluation des performances thermiques annuelles du capteur en simulant la journée caractéristique de chaque mois et en se basant sur des données météorologiques tels que l'irradiation, la vitesse du vent et la température ambiante journalières moyennées sur 22 années de mesures sur le site de Tizi Ouzou. Cela nous a permis d'évaluer le rendement annuel du capteur et d'en déduire l'énergie annuelle utile pouvant être recueillie sur ce type de capteur. A 40° d'inclinaison, qui correspond à l'inclinaison la plus favorable, le rendement est de 57% et l'énergie utile produite est évaluée à 830 KWh/m². Ces performances sont de même niveau que celles des capteurs solaires plans à absorbeur non sélectif, actuellement disponible sur le marché.

Nous avons fait une évaluation économique simple de ce projet. Le coût total du capteur est estimé à 12798 DA, -ce qui le situe très en dessous des 40000 Da du type Giordano importé par le CDER - et sa durée d'amortissement est de l'ordre de 6,2 années. Ces chiffres, qui ont peut être besoin de confirmation par une étude économique plus approfondie, sont très prometteurs et représentent un encouragement certain à développer l'idée de la fabrication et du développement à grande échelle de ce prototype.

Références bibliographiques

- [1] : Jacques BERNARD, Energie solaire ; calculs et optimisation. Edition ellipses, 2004.
- [2] : John A.Duffie et William A.Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes (Second Edition), 1991.
- [3] : J.F.Sacadura, Initiations aux transferts thermiques, 1993.
- [4] : Mémoire de fin d'étude (Ingénieur) « Etude technico-économique d'une installation de chauffage solaire et d'eau chaude sanitaire d'une maison individuelle » U.M.M.T.O, 2011. (Par : B.BEDJAOUI et S.GHAZI).
- [5] : Mémoire de magister « Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan » U.Montouri de Contantine, 2010. (Par : S.SAADI).
- [6] : Mémoire de magister « Etude du potentiel d'énergie solaire thermique utilisée pour la production de l'eau chaude dans l'industrie agro-alimentaire » U.HADJ LAKHDAR de Batna, 2012. (Par : A.BOUAKAZ).
- [7] : <http://www.hauguelenergy.com/ifrbdab-comparaison-entre-capteur-solaire-sous-vide-et-capteur-plan.htm>.
- [8] : Fichier météo établit par le logiciel « RETscran plus ».
- [9] : <https://www.eosweb.larc.nasa.gov/sse/>.

Annexe A :

Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur d'un capteur solaire plan sont regroupés dans le tableau (1.A). [1]

Métal	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09

Tableau 1.A : Caractéristiques thermo-physiques de matériaux métalliques pouvant constituer la plaque de capteurs solaires plans.

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes [1], sont listées dans le tableau (2.A).

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Conductivité thermique (W/m. K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Polyméthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Polyster armé	1	77-90	1400	1050	0.21
Polyfluoroéthyle propylène	0.05	97	2.15	1170	0.25
Polyfluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12

Tableau 2.A : propriétés de quelques surfaces transparentes au rayonnement solaire mais opaques au rayonnement infrarouge, pouvant servir à réaliser l'effet de serre.

Le tableau (3.A) donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants. [1], [5]

Matériau	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Diffusivité thermique 10 ⁻⁷ m ² /s
Air à 20 °C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Papier	0.14	700	1340	1.5
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc	0.153	1200	2170	0.6
Pvc	0.166	1380	1000	1.2
Bois de chêne	0.198	825	2400	1.0
Plâtre	0.35	800	800	5.5
Brique	0.697	1700	900	4.6

Tableau 3.A : Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant.

Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives figurent dans le tableau (4.A). [1], [5]

Support et traitement	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface	Effet de l'humidité
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07	Variable
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09	Sans effet
Acier et chrome noir	0.91	0.07	Oxydation rapide
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14	Peu d'effets
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16	Couche sélective pèle rapidement
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15	
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08	Peu d'effets
Alu et oxyde de manganèse	0.70	0.08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0.90	0.16	Peu d'effets
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2	Peu d'effets
Peinture noire	0.97	0.88	Peu d'effets

Tableau 4.A : Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives.

Annexe B :

Caractéristiques thermo-physique de l'eau et de l'air.

Les caractéristique thermo-physique de l'eau sont donnés par le tableau suivant : [10]

Température	Pression référence	Pression de vapeur saturante	Masse volumique (Densité)	Chaleur sensible (Enthalpie spécifique)		Chaleur spécifique (ou massique)		Chaleur volumique	Viscosité dynamique de l'eau
°C	Pa	Pa	kg/m3	kJ/kg	kcal/kg	kJ/kg	kcal/kg	kJ/m3	kg/m.s
0.00	101325	611	999.82	0.06	0.01	4.217	1.007	4216.10	0.001792
1.00	101325	657	999.89	4.28	1.02	4.213	1.006	4213.03	0.001731
2.00	101325	705	999.94	8.49	2.03	4.210	1.006	4210.12	0.001674
3.00	101325	757	999.98	12.70	3.03	4.207	1.005	4207.36	0.001620
4.00	101325	813	1000.00	16.90	4.04	4.205	1.004	4204.74	0.001569
5.00	101325	872	1000.00	21.11	5.04	4.202	1.004	4202.26	0.001520
6.00	101325	935	999.99	25.31	6.04	4.200	1.003	4199.89	0.001473
7.00	101325	1001	999.96	29.51	7.05	4.198	1.003	4197.63	0.001429
8.00	101325	1072	999.91	33.70	8.05	4.196	1.002	4195.47	0.001386
9.00	101325	1147	999.85	37.90	9.05	4.194	1.002	4193.40	0.001346
10.00	101325	1227	999.77	42.09	10.05	4.192	1.001	4191.42	0.001308
11.00	101325	1312	999.68	46.28	11.05	4.191	1.001	4189.51	0.001271
12.00	101325	1402	999.58	50.47	12.06	4.189	1.001	4187.67	0.001236
13.00	101325	1497	999.46	54.66	13.06	4.188	1.000	4185.89	0.001202
14.00	101325	1597	999.33	58.85	14.06	4.187	1.000	4184.16	0.001170
15.00	101325	1704	999.19	63.04	15.06	4.186	1.000	4182.49	0.001139
16.00	101325	1817	999.03	67.22	16.06	4.185	1.000	4180.86	0.001109
17.00	101325	1936	998.86	71.41	17.06	4.184	0.999	4179.27	0.001081
18.00	101325	2063	998.68	75.59	18.05	4.183	0.999	4177.72	0.001054
19.00	101325	2196	998.49	79.77	19.05	4.182	0.999	4176.20	0.001028
20.00	101325	2337	998.29	83.95	20.05	4.182	0.999	4174.70	0.001003
21.00	101325	2486	998.08	88.14	21.05	4.181	0.999	4173.23	0.000979
22.00	101325	2642	997.86	92.32	22.05	4.181	0.999	4171.78	0.000955
23.00	101325	2808	997.62	96.50	23.05	4.180	0.998	4170.34	0.000933
24.00	101325	2982	997.38	100.68	24.05	4.180	0.998	4168.92	0.000911
25.00	101325	3166	997.13	104.86	25.04	4.180	0.998	4167.51	0.000891
26.00	101325	3360	996.86	109.04	26.04	4.179	0.998	4166.11	0.000871
27.00	101325	3564	996.59	113.22	27.04	4.179	0.998	4164.71	0.000852
28.00	101325	3779	996.31	117.39	28.04	4.179	0.998	4163.31	0.000833
29.00	101325	4004	996.02	121.57	29.04	4.179	0.998	4161.92	0.000815
30.00	101325	4242	995.71	125.75	30.04	4.178	0.998	4160.53	0.000798

Annexes

31.00	101325	4491	995.41	129.93	31.03	4.178	0.998	4159.13	0.000781
32.00	101325	4754	995.09	134.11	32.03	4.178	0.998	4157.73	0.000765
33.00	101325	5029	994.76	138.29	33.03	4.178	0.998	4156.33	0.000749
34.00	101325	5318	994.43	142.47	34.03	4.178	0.998	4154.92	0.000734
35.00	101325	5622	994.08	146.64	35.03	4.178	0.998	4153.51	0.000720
36.00	101325	5940	993.73	150.82	36.02	4.178	0.998	4152.08	0.000705
37.00	101325	6274	993.37	155.00	37.02	4.178	0.998	4150.65	0.000692
38.00	101325	6624	993.00	159.18	38.02	4.178	0.998	4149.20	0.000678
39.00	101325	6991	992.63	163.36	39.02	4.179	0.998	4147.74	0.000666
40.00	101325	7375	992.25	167.54	40.02	4.179	0.998	4146.28	0.000653
41.00	101325	7777	991.86	171.71	41.01	4.179	0.998	4144.80	0.000641
42.00	101325	8198	991.46	175.89	42.01	4.179	0.998	4143.30	0.000629
43.00	101325	8639	991.05	180.07	43.01	4.179	0.998	4141.80	0.000618
44.00	101325	9100	990.64	184.25	44.01	4.179	0.998	4140.28	0.000607
45.00	101325	9582	990.22	188.43	45.01	4.180	0.998	4138.75	0.000596
46.00	101325	10085	989.80	192.61	46.00	4.180	0.998	4137.20	0.000586
47.00	101325	10612	989.36	196.79	47.00	4.180	0.998	4135.64	0.000576
48.00	101325	11161	988.92	200.97	48.00	4.180	0.998	4134.06	0.000566
49.00	101325	11735	988.47	205.15	49.00	4.181	0.999	4132.47	0.000556
50.00	101325	12335	988.02	209.33	50.00	4.181	0.999	4130.87	0.000547
51.00	101325	12960	987.56	213.51	51.00	4.181	0.999	4129.25	0.000538
52.00	101325	13612	987.09	217.69	52.00	4.182	0.999	4127.61	0.000529
53.00	101325	14292	986.62	221.88	52.99	4.182	0.999	4125.97	0.000521
54.00	101325	15001	986.14	226.06	53.99	4.182	0.999	4124.30	0.000512
55.00	101325	15740	985.65	230.24	54.99	4.183	0.999	4122.63	0.000504
56.00	101325	16510	985.16	234.42	55.99	4.183	0.999	4120.94	0.000496
57.00	101325	17312	984.66	238.61	56.99	4.183	0.999	4119.24	0.000489
58.00	101325	18146	984.16	242.79	57.99	4.184	0.999	4117.52	0.000481
59.00	101325	19015	983.64	246.97	58.99	4.184	0.999	4115.79	0.000474
60.00	101325	19919	983.13	251.16	59.99	4.185	0.999	4114.05	0.000467
61.00	101325	20859	982.60	255.34	60.99	4.185	1.000	4112.30	0.000460
62.00	101325	21837	982.07	259.53	61.99	4.186	1.000	4110.53	0.000453
63.00	101325	22854	981.54	263.72	62.99	4.186	1.000	4108.75	0.000447
64.00	101325	23910	981.00	267.90	63.99	4.187	1.000	4106.97	0.000440
65.00	101325	25008	980.45	272.09	64.99	4.187	1.000	4105.17	0.000434
66.00	101325	26148	979.90	276.28	65.99	4.188	1.000	4103.36	0.000428
67.00	101325	27332	979.34	280.46	66.99	4.188	1.000	4101.54	0.000422
68.00	101325	28561	978.78	284.65	67.99	4.189	1.000	4099.71	0.000416
69.00	101325	29837	978.21	288.84	68.99	4.189	1.001	4097.88	0.000410
70.00	101325	31161	977.63	293.03	69.99	4.190	1.001	4096.03	0.000404
71.00	101325	32533	977.05	297.22	70.99	4.190	1.001	4094.18	0.000399
72.00	101325	33957	976.47	301.41	71.99	4.191	1.001	4092.31	0.000394

73.00	101325	35433	975.88	305.60	72.99	4.192	1.001	4090.45	0.000388
74.00	101325	36963	975.28	309.79	73.99	4.192	1.001	4088.57	0.000383
75.00	101325	38548	974.68	313.99	74.99	4.193	1.001	4086.69	0.000378
76.00	101325	40190	974.08	318.18	76.00	4.194	1.002	4084.80	0.000373
77.00	101325	41890	973.46	322.37	77.00	4.194	1.002	4082.91	0.000369
78.00	101325	43650	972.85	326.57	78.00	4.195	1.002	4081.01	0.000364
79.00	101325	45473	972.23	330.76	79.00	4.196	1.002	4079.11	0.000359
80.00	101325	47359	971.60	334.96	80.00	4.196	1.002	4077.20	0.000355
81.00	101325	49310	970.97	339.16	81.01	4.197	1.002	4075.29	0.000351
82.00	101325	51328	970.33	343.35	82.01	4.198	1.003	4073.38	0.000346
83.00	101325	53415	969.69	347.55	83.01	4.199	1.003	4071.46	0.000342
84.00	101325	55572	969.04	351.75	84.01	4.200	1.003	4069.54	0.000338
85.00	101325	57803	968.39	355.95	85.02	4.200	1.003	4067.62	0.000334
86.00	101325	60107	967.73	360.15	86.02	4.201	1.003	4065.70	0.000330
87.00	101325	62488	967.07	364.35	87.02	4.202	1.004	4063.78	0.000326
88.00	101325	64947	966.41	368.56	88.03	4.203	1.004	4061.85	0.000322
89.00	101325	67486	965.74	372.76	89.03	4.204	1.004	4059.93	0.000319
90.00	101325	70108	965.06	376.96	90.04	4.205	1.004	4058.00	0.000315
91.00	101325	72814	964.38	381.17	91.04	4.206	1.005	4056.08	0.000311
92.00	101325	75607	963.70	385.38	92.05	4.207	1.005	4054.15	0.000308
93.00	101325	78488	963.01	389.58	93.05	4.208	1.005	4052.23	0.000304
94.00	101325	81460	962.31	393.79	94.06	4.209	1.005	4050.31	0.000301
95.00	101325	84525	961.62	398.00	95.06	4.210	1.006	4048.39	0.000298
96.00	101325	87685	960.91	402.21	96.07	4.211	1.006	4046.47	0.000295
97.00	101325	90943	960.20	406.42	97.07	4.212	1.006	4044.55	0.000291
98.00	101325	94301	959.49	410.64	98.08	4.213	1.006	4042.64	0.000288
99.00	101325	97760	958.78	414.85	99.09	4.214	1.007	4040.73	0.000285
100.00	101325	101325	958.05	419.06	100.09	4.216	1.007	4038.82	0.000282

Tableau 1.B : propriétés thermo-physiques de l'eau.

Les caractéristique thermo-physique de l'air sont donnés par le tableau suivant : [1]

Température °C	Masse volumique (Kg/m ³)	Chaleur spécifique (J/Kg.K)	Viscosité dynamique (10 ⁻⁶ PL)	Conductivité thermique (W/m.K)	Diffusivité (10 ⁻⁶ m ² /s)
0	1,292	1000	17,0	23,8	18,4
5	1,269	1001	17,3	24,1	19,0
10	1,247	1001	17,5	24,4	19,6
15	1,225	1002	17,8	24,8	20,2
20	1,204	1003	18,0	25,1	20,8

25	1,184	1003	18,2	25,5	21,4
30	1,164	1004	18,5	25,8	22,0
35	1,146	1005	18,7	26,1	22,7
40	1,127	1006	18,9	26,4	23,3
45	1,110	1006	19,2	26,8	24,0
50	1,092	1007	19,4	27,1	24,6
55	1,076	1008	19,6	27,4	25,3
60	1,060	1009	19,9	27,7	25,9
65	1,044	1010	20,1	28,0	26,6
70	1,029	1010	20,3	28,3	27,3

Tableau 2.B : propriétés thermo-physiques de l'air.

Annexe C :

Résultats obtenus par simulation de la journée représentative de chaque mois

Journée caractéristique du mois de janvier : $G = 2.29 \text{ KWh/m.jour}$, $V_v = 4,03 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 10 \text{ C}^\circ$

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,73$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	106,8	11	11,7	12,6	8	50	47,3
09:30	216,8	11,3	13	15	8,8	114	52,6
10:30	315,8	12	14,4	17,5	9,5	168,7	53,4
11:30	374	13	15,8	19,4	10	197,3	52,7
12:30	374	14	16,7	20,2	10,2	191,7	51,2
13:30	315,8	15	17	20	10	152	48
14:30	216,8	15,8	17	18,7	9,6	89,4	41,2
15:30	106,8	16,3	16,6	17	9	21,5	20
Rendement moyen							48,6

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,81$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	141,8	11	12	13,6	8,4	80	56,6
09:30	267,5	11,5	13,7	16,7	9,3	160	59,8
10:30	379	12,4	15,6	19,8	10	227,6	60
11:30	444,3	13,7	17,4	22	10,8	262,7	59
12:30	444,3	15,2	18,8	23,4	11	254,2	57,2
13:30	379	16,6	19	22,8	10,8	206,3	54,4
14:30	267,5	17,4	19,2	21,5	10,4	127,2	45,5
15:30	141,8	18	18,6	19,4	9,6	42	29,6
Rendement moyen							55,2

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	167	11	12,4	14,2	8,6	99	59,6
09:30	300,4	11,5	14	17,5	9,5	186	62
10:30	417,8	12,5	16	20,8	10,4	258,3	62
11:30	486	14	18,2	23,5	11,2	295,6	60,8
12:30	486	15,7	19,7	24,8	11,5	286	58,8
13:30	417,8	17,3	20,6	24,7	11,3	231,2	55,4
14:30	300,4	18,6	20,7	23,3	10,8	146,2	48,7
15:30	167	19,4	20	21	10	52,6	31,7
Rendement moyen							56,7

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	179	11	12,5	14,5	8,7	108,2	60,2
09:30	311,6	11,6	14,3	17,8	9,6	193,2	62
10:30	427,3	12,7	16,4	21,2	10,5	264	61,8
11:30	494,3	14,2	18,4	23,8	11,2	300	60,7
12:30	494,3	15,8	20	25	11,5	290,8	58,8
13:30	427,3	17,4	20,7	25	11,4	237,4	55,5
14:30	311,6	18,7	20,8	23,6	11	153,4	49,2
15:30	179	19,6	20,4	21,5	10,2	60	33,6
Rendement moyen							56,9

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Février** : $G = 3,18 \text{ KWh/m}^2 \cdot \text{jour}$, $V_v = 4,12 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$,
Ta= 10,5 C°

i= 0°	$\tau_v=0,78$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	164,5	11,5	12,8	14,5	9	91	55,5
09:30	296,8	12	14,4	17,6	10	172	58
10:30	413	13	16,4	20,8	10,8	239,3	58
11:30	480,3	14,3	18	23	11,4	273,8	57
12:30	480,3	15,8	19,5	24,3	11,7	265,3	55,2
13:30	413	17,3	20,3	24	11,6	215	52
14:30	296,8	18,5	20,4	22,8	11	135,6	45,7
15:30	164,5	19,4	20	21	10,4	47	29
Rendement moyen							53,1

i= 20°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	199,5	11,5	13,2	15,4	9,3	121,5	60,8
09:30	348,6	12	15	19	10,3	218,4	62,6
10:30	478,5	13,2	17,4	22,8	11,3	298	62,2
11:30	553,6	14,8	19,6	25,6	12	338,4	61
12:30	553,6	16,7	21,3	27	12,5	327,5	59
13:30	478,5	18,5	22,3	27	12,3	267,5	56
14:30	348,6	20	22,4	25,5	11,8	173	49,6
15:30	199,5	21	22	23	11	68,5	34,3
Rendement moyen							57,4

i= 40°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	221	11,5	12,5	15	9,3	139,4	64
09:30	377,3	11,3	14,6	19	10,3	238,6	64,3
10:30	512,6	12,6	17	22,8	11,4	319,4	63,2
11:30	590,7	14,4	19,5	26,2	12,2	360	61,7
12:30	590,7	16,4	21,4	27,6	12,7	348,3	59,7
13:30	512,6	18,4	22,5	27,5	12,5	286,2	56,5
14:30	377,3	20	22,7	26	12	189,2	50,7
15:30	221	21	22,2	23,6	11,2	80,4	37
Rendement moyen							57,6

i= 60°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	226,2	11,5	13,5	16	9,5	139	61,6
09:30	379,4	12,3	15,6	20	10,5	237	62,5
10:30	511,3	13,6	18	23,8	11,6	317,3	62
11:30	587,3	15,4	20	26,8	12,5	357,2	60,8
12:30	587,3	17,4	22,3	28,4	12,8	345,6	58,8
13:30	511,3	19,3	23,3	28,4	12,7	284,4	55,6
14:30	379,4	21	23,6	27	12,2	187,6	49,4
15:30	226,2	22	23	24,6	11,4	80	35,6
Rendement moyen							57,2

Annexes

Journée caractéristique du mois de Mars : $G = 4,34 \text{ KWh/m}^2.\text{jour}$, $V_v = 4,08 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 12,4 \text{ }^\circ\text{C}$

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,82$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee ($^\circ\text{C}$)	Tes ($^\circ\text{C}$)	Tp ($^\circ\text{C}$)	Tv ($^\circ\text{C}$)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	241	13	15	17,8	11,4	149	62
09:30	395,5	13,8	17,3	21,8	12,5	246,8	62,4
10:30	527,5	15,2	19,8	25,7	13,6	325,4	61,7
11:30	603	17	22,2	28,6	14,4	364,3	60
12:30	603	19	24	30,2	14,8	352,6	58,4
13:30	527,5	21	25	30,2	14,7	291,8	55,3
14:30	395,5	22,7	25,4	29	14,2	196	50
15:30	241	23,8	25	26,6	13,4	88,6	36,7
Rendement moyen							57

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee ($^\circ\text{C}$)	Tes ($^\circ\text{C}$)	Tp ($^\circ\text{C}$)	Tv ($^\circ\text{C}$)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	268,71	13	15,4	18,5	11,6	168	63,2
09:30	439,04	14	18	23	12,8	277,8	63,2
10:30	584,23	15,5	20,6	27,2	14	365,3	62,5
11:30	667,45	17,5	23,3	30,5	15	408,4	61,2
12:30	667,45	19,8	25,4	32,3	15,4	394,8	59
13:30	584,23	22	26,6	32,3	15,3	327,2	56
14:30	439,04	23,8	27	30,8	14,7	221,3	50,4
15:30	268,71	25	26,4	28,2	13,8	102	38
Rendement moyen							57,8

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee ($^\circ\text{C}$)	Tes ($^\circ\text{C}$)	Tp ($^\circ\text{C}$)	Tv ($^\circ\text{C}$)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	278	13	15	18,2	11,5	178,8	64,5
09:30	450	13,4	17,5	22,7	12,8	288,5	64
10:30	597,5	15	20,3	27	14	376,8	63
11:30	682	17	23	30,5	15	420,2	61,6
12:30	682	19,5	25,3	32,4	15,5	406,2	59,6
13:30	597,5	21,8	26,6	32,5	15,4	337,2	56,4
14:30	450	23,7	23,7	31	14,8	229,2	51
15:30	278	25	25	28,4	14	107,4	38,8
Rendement moyen							58,4

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee ($^\circ\text{C}$)	Tes ($^\circ\text{C}$)	Tp ($^\circ\text{C}$)	Tv ($^\circ\text{C}$)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	270,16	13	15,4	18,5	11,6	171	63,3
09:30	438,2	14	18	23	12,8	277,3	63,3
10:30	581,16	15,5	20,6	27	14	363,3	62,5
11:30	663,01	17,5	23,2	30,4	15	405,6	61,2
12:30	663,01	19,8	25,3	32,2	15,4	392	59
13:30	581,16	22	26,6	32,3	15,3	325,3	56
14:30	438,2	23,8	27	30,8	14,8	220	50,3
15:30	270,16	25	26,4	28,2	13,8	102,8	38
Rendement moyen							57,8

Annexes

Journée caractéristique du mois d'Avril : G = 5,39 KWh/m².jour , Vv = 4,13 m/s , Qv= 60 l/h , Ta= 14,7 C°

i= 0°	$\tau_v=83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	313,4	15	17,8	21,5	14,2	201,4	64,3
09:30	476,6	16	20,3	25,7	15,4	304,2	63,8
10:30	612,4	17,7	23	30	16,6	384	62,7
11:30	689,4	19,8	25,8	33,2	17,5	422,4	61,3
12:30	689,4	22,2	28	35	18	408	59,2
13:30	612,4	24,5	29,4	35,3	18	343,86	56
14:30	476,6	26,4	29,8	34	17,4	243,4	51
15:30	313,4	27,8	29,6	31,8	16,6	127,8	40,8
16:30	159,8	28,5	28,8	29,2	15,7	22,3	14
Rendement moyen							56,6

i= 20°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	324,1	15	18	21,7	14,2	208,6	64,3
09:30	498,23	16,2	20,7	26,3	15,6	317,4	63,7
10:30	643,65	18	23,7	30,8	16,8	403	62,6
11:30	726,19	20,3	26,6	34,3	17,8	443,6	61
12:30	726,19	22,8	28,8	36,3	18,3	428,5	59
13:30	643,65	25,2	30,3	36,5	18,3	360	56
14:30	498,23	27,2	30,8	35	17,7	252,8	50,7
15:30	324,1	28,6	30,4	32,7	16,8	130	40
16:30	161,18	29,3	29,5	29,8	15,8	18	11,5
Rendement moyen							56,4

i= 40°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	315	15	17,6	21,3	14,2	204,3	64,8
09:30	489,4	15,8	20,3	26	15,4	313,6	64
10:30	635,3	17,6	23,3	30,3	16,7	399,7	63
11:30	718,2	19,8	26	33,8	17,7	441	61,4
12:30	718,2	22,4	28,4	35,8	18,2	426	59,3
13:30	635,3	24,8	29,8	36	18	357,2	56,2
14:30	489,4	26,8	30,3	34,6	17,6	249,5	51
15:30	315	28,2	30	32,2	16,7	126,6	40
16:30	153	29	29	29,4	15,8	15,34	10
Rendement moyen							56,7

i= 60°	$\tau_v=0,8$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	287,63	15	17,6	21	14	184,2	64
09:30	451,09	16	20	25,2	15,2	287,3	63,7
10:30	588,36	17,6	22,8	29,3	16,4	368,8	62,7
11:30	666,48	19,7	25,5	32,6	17,3	408	61,2
12:30	666,48	22	27,6	34,4	17,8	394,3	59,2
13:30	588,36	24,2	28,8	34,6	17,7	329,8	56
14:30	451,09	26	29,2	33,2	17	229	50,7
15:30	287,63	27,3	29	30,8	16,3	113,8	39,5
16:30	136,4	28	28	28,3	15,5	9,7	7
Rendement moyen							56,4

Annexes

Journée caractéristique du mois de Mai : $G = 6,33 \text{ KWh/m}^2\text{jour}$, $V_v = 3,52 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 18,6 \text{ C}^\circ$

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	212	19	20,8	23,2	17,5	132,8	62,6
08:30	377	19,7	23	27,3	18,7	239,2	63,4
09:30	546,6	21	25,8	32	20,2	344,4	63
10:30	685,4	23	29	36,3	21,5	424,4	62
11:30	763,4	25,4	32	39,8	22,6	461,3	60,4
12:30	763,4	28	34,7	42,2	23,3	443,2	58
13:30	685,4	31	36,3	42,7	23,3	376,3	54,8
14:30	546,6	33	36,8	41,5	22,7	273,2	50
15:30	377	34,5	36,7	39,2	21,8	152,8	40,5
16:30	212	35,3	35,8	36,5	20,8	39,4	18,6
Rendement moyen							55,9

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30:00	208,51	19	20,8	23,2	17,5	130,5	62,6
08:30	374,69	19,7	23	27,3	18,7	237,7	63,4
09:30	553,26	21	26	32	20,2	348,8	63
10:30	700,28	23	29	36,6	21,6	434,2	62
11:30	783,14	25,4	32	40,2	22,7	474,3	60,5
12:30	783,14	28	34,5	42,3	23,3	458,5	58,5
13:30	700,28	30,6	36	42,7	23,3	388,4	55,5
14:30	553,26	32,8	36,8	41,5	22,7	278,8	50,4
15:30	374,69	34,4	36,6	39	21,8	152	40,5
16:30	208,51	35,3	35,8	36,4	20,8	37	17,8
Rendement moyen							56,1

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,81$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30:00	192,5	19	20,6	22,7	17,4	116,7	60,6
08:30	349,8	19,6	22,6	26,5	18,5	216	61,8
09:30	526	20,8	25,4	31	20	323,6	61,5
10:30	671,8	22,6	28,4	35,4	21,3	407,2	60,6
11:30	754,3	25	31,3	39	22,4	445,8	59
12:30	754,3	27,5	33,6	41	23	430,8	57
13:30	671,8	30	35,2	41,3	22,8	363	54
14:30	526	32	35,7	40	22,3	257,5	49
15:30	349,8	33,5	35,4	37,7	21,4	135,5	38,7
16:30	192,5	34,3	34,7	35,2	20,5	29,4	15,3
Rendement moyen							54,6

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,77$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30:00	166,1	19	20,3	22	17,2	94	56,6
08:30	305,35	19,5	22	25,2	18	178	58,3
09:30	468,21	20,5	24,4	29,2	19,4	273	58,3
10:30	603,67	22	27	33	20,5	347,7	57,6
11:30	680,39	24	29,4	36	21,5	383	56,3
12:30	680,39	26,2	31,4	37,8	22	370	54,4
13:30	603,67	28,3	32,7	38	21,8	310,6	51,4
14:30	468,21	30	33	36,8	21,3	217,7	46,5
15:30	305,35	31,2	32,8	34,7	20,5	110,8	36,3
16:30	166,1	31,8	32	32,5	19,7	21,7	13
Rendement moyen							51,9

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Juin** : $G = 6,98 \text{ KWh/m}^2.\text{jour}$, $V_v = 3,44 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 22,9 \text{ C}^\circ$

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	247,5	23	25,2	28	22,2	158	64
08:30	420,3	23,8	27,6	32,3	23,5	269	64
09:30	595	25,3	30,6	37	25	376,2	63,2
10:30	736,8	27,4	34	41,6	26,4	457	62
11:30	816	30	37	45,3	27,5	493,3	60,4
12:30	816	32,8	39,6	47,5	28,2	476	58,3
13:30	736,8	35,5	41,3	48	28,2	407,6	55,3
14:30	595	37,8	42	47	27,7	300,7	50,5
15:30	420,3	39,5	42	45	26,8	176	41,8
16:30	247,5	40,5	41,3	42,2	25,8	56,4	22,8
Rendement moyen							56,3

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	249,2	23	25,3	28	22,2	159,6	64
08:30	409	24	27,7	32,2	23,4	260,5	63,7
09:30	592,4	25,5	30,8	37,2	25	373,3	63
10:30	742,3	27,6	34	42	26,5	459,6	62
11:30	826,5	30,2	37,3	45,7	27,7	499	60,4
12:30	826,5	33	39,8	47,8	28,3	481,7	58,3
13:30	742,3	35,7	41,2	48	28,2	412,4	55,6
14:30	592,4	37,6	41,8	46,8	27,6	300,3	50,7
15:30	409	39,3	41,7	44,5	26,7	169,8	41,5
16:30	249,2	40,2	41	42	25,8	59,4	23,8
Rendement moyen							56,3

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	235	23	25	27,8	22	150	63,8
08:30	372,6	23,8	27,2	31,3	23,2	237	63,6
09:30	552,6	25,2	30	36,2	24,7	348,8	63
10:30	700,5	27,2	33,3	40,73	26	434,7	62
11:30	784	29,6	36,4	44,3	27,2	474,6	60,5
12:30	784	32,3	38,8	46,5	27,8	458,2	58,4
13:30	700,5	35	40,4	46,8	27,8	387,6	55,3
14:30	552,6	37	41	45,7	27,2	277,3	50,2
15:30	372,6	38,7	40,8	43,3	26,3	149,7	40,2
16:30	235	39,5	40,3	41,2	25,5	54	23
Rendement moyen							56,3

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,78$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	206,7	23	24,7	27	21,8	123	59,4
08:30	315,4	23,7	26,3	29,6	22,7	187,3	59,4
09:30	480,2	24,8	28,8	33,7	24	284	59,2
10:30	616,7	26,4	31,5	37,7	25,2	359,7	58,3
11:30	693,8	28,4	34	40,7	26	395,6	57
12:30	693,8	30,6	36	42,5	26,6	382,4	55
13:30	616,7	32,8	37,4	42,8	26,5	321,5	52
14:30	480,2	34,6	37,8	41,6	26	226,3	47
15:30	315,4	36	37,6	39,6	25,2	116	36,7
16:30	206,7	36,7	37,3	38	24,6	44,2	21,4
Rendement moyen							52,7

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Juillet** : $G = 7 \text{ KWh/m}^2\text{jour}$, $V_v = 3,59 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 25,8 \text{ C}^\circ$.

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	244,6	26	28,2	31	25,2	156	63,8
08:30	420,3	26,8	30,6	35,2	26,5	268,5	64
09:30	598,8	28,3	33,7	40	28	377,8	63
10:30	744	30,4	37	44,7	29,4	460,6	62
11:30	825,2	33	40	48,3	30,6	497,7	60,3
12:30	825,2	35,8	42,6	50,6	31,2	480	58,2
13:30	744	38,5	44,3	51	31,2	410,3	55
14:30	598,8	40,8	45	50	30,7	301,3	50,3
15:30	420,3	42,5	45	47,8	29,8	174	41,4
16:30	244,6	43,5	44,2	45	28,8	53	21,6
Rendement moyen							56,1

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	245	26	28,2	31	25,2	156,4	63,8
08:30	411,3	27	30,7	35,2	26,5	261,4	63,5
09:30	599,4	28,5	33,8	40,3	28	377	63
10:30	753,6	30,6	37,2	45	29,6	465,6	61,8
11:30	840,2	33,2	40,4	48,8	30,7	506,2	60,2
12:30	840,2	36	43	51	31,4	488,6	58
13:30	753,6	38,8	44,7	51,5	31,4	414,6	55
14:30	599,4	41,2	45,5	50,4	30,8	299	50
15:30	411,3	43	45,3	48	29,8	165	40
16:30	245	44	44,7	45,7	29	50	20,4
Rendement moyen							55,9

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	229,5	26	28	30,6	25	146	63,6
08:30	376,3	26,8	30,2	34,3	26,2	239,2	63,6
09:30	561,5	28,2	33,2	39,2	27,7	354	63
10:30	714,2	30,2	36,5	44	29,2	442,4	62
11:30	800,3	32,7	39,6	47,6	30,3	483,4	60,4
12:30	800,3	35,4	42	49,8	31	466,3	58,3
13:30	714,2	38	43,7	50,2	31	393,6	55
14:30	561,5	40,3	44,3	49	30,3	280	50
15:30	376,3	42	44	46,5	29,4	141	39,6
16:30	229,5	42,8	43,4	44,2	28,5	47,7	20,7
Rendement moyen							55,8

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,78$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
07:30	200	26	27,7	29,7	24,8	118,3	59,2
08:30	319,5	26,7	29,4	32,7	25,7	189,4	59,3
09:30	489,5	27,8	32	36,8	27	289,2	59
10:30	630,5	29,4	34,6	40,8	28,3	367,2	58,2
11:30	710,3	31,5	37,2	44	29,2	404	56,8
12:30	710,3	33,8	39,3	45,8	29,7	389,8	54,8
13:30	630,5	36	40,7	46	29,7	327,2	52
14:30	489,5	37,8	41	44,8	29	229,4	46,8
15:30	319,5	39	40,7	42,6	28,2	117	36,6
16:30	200	39,7	40,2	41	27,6	38,8	19,4
Rendement moyen							52,6

Annexes

Journée caractéristique du mois d'Août : $G = 6,23 \text{ KWh/m}^2\text{.jour}$, $V_v = 3,45 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 26,2^\circ\text{C}$.

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	$G_s \text{ (W/m}^2\text{)}$	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
07:30	198,5	27	28,7	30,8	25,4	121,8	61,3
08:30	367,5	27,7	31	35	26,7	230,6	62,8
09:30	543,6	29	33,8	39,6	28,2	339,8	62,5
10:30	688,8	31	37	44	29,6	423,4	61,5
11:30	770,7	33,4	40	47,7	30,7	462,4	60
12:30	770,7	36	42,4	49,7	31,3	446,3	58
13:30	688,8	38,5	43,8	50	31,3	377,3	54,8
14:30	543,6	40,6	44,4	48,8	30,7	269,4	49,5
15:30	367,5	42	44	46,7	29,7	145,5	39,6
16:30	198,5	42,8	43,2	43,7	28,7	29,5	14,8
Rendement moyen							55,4

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	$G_s \text{ (W/m}^2\text{)}$	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W/m2)	Rend (%)
07:30	194	27	28,7	30,7	25,4	118,8	61,2
08:30	372,5	27,7	31	35	26,7	234	62,8
09:30	560,5	29	34	40	28,3	351	62,6
10:30	716,3	31	37,3	44,7	29,8	441,5	61,6
11:30	804,4	33,4	40,3	48,3	31	484,4	60,2
12:30	804,4	36	42,7	50,4	31,5	468,2	58,2
13:30	716,3	38,7	44,3	50,8	31,5	394	55
14:30	560,5	41	45	49,5	31	276	49,6
15:30	372,5	42,6	44,7	47	30	145	39
16:30	194	43,4	43,7	44	28,8	23	11,8
Rendement moyen							55,4

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,81$						
TSV (h)	$G_s \text{ (W/m}^2\text{)}$	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W/m2)	Rend (%)
07:30	177	27	28,5	30,3	25,3	104,8	59
08:30	353,7	27,6	30,7	34,4	26,5	216,4	61,2
09:30	541	28,8	33,5	39	28	330,7	61
10:30	697	30,7	36,7	43,7	29,5	419,8	60,2
11:30	785,6	33	39,6	47,3	30,6	462,3	58,8
12:30	785,6	35,6	42	49,3	31,2	446,2	56,8
13:30	697	38	43,4	49,5	31	375	53,8
14:30	541	40	43,7	48	30,5	263	48,6
15:30	353,7	41,5	43,4	45,6	29,5	134	37,8
16:30	177	42,3	42,5	42,8	28,4	15,8	9
Rendement moyen							54,2

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,77$						
TSV (h)	$G_s \text{ (W/m}^2\text{)}$	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W/m2)	Rend (%)
07:30	150,8	27	28,2	29,6	25	82,7	54,8
08:30	313,5	27,5	30	33,2	26,2	181	57,7
09:30	487,8	28,5	32,5	37,3	27,5	282,6	57,9
10:30	633,6	30	35,2	41,3	28,7	363,2	57,3
11:30	716,4	32	37,7	44,4	29,7	401,7	56
12:30	716,4	34,3	39,8	46,3	30,2	387,6	54
13:30	633,6	36,5	41	46,5	30,2	323,8	51
14:30	487,8	38,3	41,5	45,2	29,6	224	46
15:30	313,5	39,6	41,2	43	28,7	110	35
16:30	150,8	40,2	40,3	40,4	27,7	6,6	4,4
Rendement moyen							51,3

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Septembre** : $G = 5,01 \text{ KWh/m}^2.\text{jou}$, $V_v = 3,29 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 23 \text{ C}^\circ$.

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W/m ²)	Rend (%)
08:30	285,5	24	26,5	29,7	22,7	178,7	62,6
09:30	449,7	25	29	34	24	282,4	62,8
10:30	588	26,6	31,8	38	25,3	363,8	62
11:30	667	28,7	34,4	41,3	26,4	404,4	60,6
12:30	667	31	36,5	43	26,8	390,6	58,6
13:30	588	33,2	37,8	43,3	26,8	325,4	55,3
14:30	449,5	35	38,2	42	26,2	223,7	49,7
15:30	285,5	36,3	37,8	39,6	25,3	107,6	37,7
Rendement moyen							57,2

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	306,6	24	26,7	30	22,8	192,8	63
09:30	485,3	25	29,3	34,6	24,3	306	63
10:30	636	26,7	32,3	39	25,7	385,8	62,2
11:30	722	29	35,2	42,6	28,8	438,8	60,8
12:30	722	31,5	37,5	44,6	27,4	423,7	58,7
13:30	636	34	39	45	27,3	352	55,3
14:30	485,3	36	39,4	43,4	26,7	241	49,7
15:30	306,6	37,4	39	41	25,7	115	37,5
Rendement moyen							57,1

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	307,8	24	26,7	30,1	22,8	139,6	63
09:30	489,4	25	29,4	34,7	24,3	308,8	63
10:30	642,8	26,7	32,4	39,2	25,7	400	62,3
11:30	730,3	29	35,3	42,8	26,8	444,2	60,8
12:30	730,3	31,5	37,6	44,8	27,4	429	58,7
13:30	642,8	34	39	45	27,4	356,5	55,4
14:30	489,4	36	39,5	43,5	26,7	243,7	49,8
15:30	307,7	37,4	39	41	25,7	115,8	37,6
Rendement moyen							56,2

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m ²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	289,2	24	26,6	29,7	22,7	181,2	62,6
09:30	461,5	25	29	34	24	290,3	63
10:30	607,3	26,6	31,7	38	25,4	379,3	62,4
11:30	690,5	28,4	34,4	41,5	26,5	421,7	61
12:30	690,5	30,8	36,6	43,4	27	407,2	59
13:30	607,3	33	37,8	43,5	26,8	339,3	55,8
14:30	461,5	35	38,3	42,2	26,3	231,4	50
15:30	282,2	36,3	37,8	39,7	25,3	110	38
Rendement moyen							57,7

Annexes

Journée caractéristique du mois d'Octobre : $G = 3,61 \text{ KWh/m}^2.\text{jour}$, $V_v = 3,5 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$,
 $T_a = 19,4 \text{ C}^\circ$.

$i = 0^\circ$	$\tau_v = 0,8$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	194,5	20	21,6	23,7	18,2	115,3	59,3
09:30	333	20,6	23,4	27	19,2	201,3	60,5
10:30	452,8	21,7	25,5	30,3	20,2	272	60
11:30	522	23,2	27,6	33	21	307,6	59
12:30	522	25	29,2	34,3	21,4	297	57
13:30	452,8	26,7	30	34,3	21,3	243	53,7
14:30	333	28	30,2	33	20,7	159	47,8
15:30	194,5	29	30	31	20	64,6	33,2
Rendement moyen							55,2

$i = 20^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	222,3	20	22	24,4	18,5	138,6	62,3
09:30	375	20,8	24	28,3	19,6	236,2	63
10:30	506,6	22	26,5	32	20,8	316,7	62,5
11:30	582,3	23,8	28,8	35	21,7	356,3	61,2
12:30	582,3	25,8	30,7	36,6	22	344,6	59,2
13:30	506,6	27,7	31,7	36,6	22	283,5	56
14:30	375	29,3	32	35,2	21,4	187,2	50
15:30	222,3	30,4	31,5	33	20,5	79,6	35,8
Rendement moyen							57,6

$i = 40^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	236	20	22	24,7	18,6	148,3	62,8
09:30	393,4	20,8	24,3	28,7	19,8	249	63,3
10:30	528,6	22,2	26,8	32,6	21	330,7	62,5
11:30	606,4	24	29,4	35,8	22	370,5	61
12:30	606,4	26,3	31,4	37,5	22,4	358	59
13:30	528,6	28,3	32,5	37,5	22,3	295	57,8
14:30	393,4	30	32,8	36	21,7	195,8	49,7
15:30	236	31	32,2	33,7	20,8	85,8	36,3
Rendement moyen							57,6

$i = 60^\circ$	$\tau_v = 0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m^2)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	233,7	20	22	24,7	18,5	146,2	62,6
09:30	386	20,8	24,2	28,5	19,7	243,5	63
10:30	516,4	22,2	26,8	32,4	20,8	322	62,4
11:30	591,3	24,2	29,3	35,5	21,8	360	60,8
12:30	591,3	26,2	31	37	22,2	348	58,8
13:30	516,4	28,2	32,3	37,2	22	287	55,6
14:30	386	29,8	32,5	35,8	21,6	191,5	49,6
15:30	233,7	31	32,2	33,6	20,7	83,7	35,8
Rendement moyen							57,4

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Novembre** : **G = 2,48 KWh/m².jour** , **Vv = 4 m/s** , **Qv= 60 l/h** ,
Ta= 14,7 C°.

i= 0°	$\tau_v=0,75$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	122	15	16	17	13	65,5	53,7
09:30	233,6	15,4	17,2	19,6	13,6	131	56
10:30	332,8	16	18,6	22	14,3	187,6	56,4
11:30	390,7	17	20	24	14,8	216,8	55,5
12:30	390,7	18,2	21,2	25	15	210	53,8
13:30	332,8	19,4	21,8	24,8	15	168,4	50,6
14:30	233,6	20,3	21,8	23,6	14,5	103,6	44,3
15:30	122	20,8	21,3	21,8	14	33	27,2
Rendement moyen							51,7

i= 20°	$\tau_v=0,82$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	149,5	15	16,3	18	13,2	90,5	60,5
09:30	273,5	15,5	18	21	14	169,8	62
10:30	382,8	16,4	19,7	24	14,8	236,7	61,8
11:30	446,4	17,7	21,5	26,4	15,5	271	60,7
12:30	446,4	19,2	23	27,6	15,8	262,5	58,8
13:30	382,8	20,7	23,7	27,5	15,7	212,3	55,4
14:30	273,5	22	24	26,2	15,2	133,2	48,7
15:30	149,5	22,7	23,4	24,2	14,5	47,6	31,8
Rendement moyen							56,8

i= 40°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	167,4	15	16,5	18,4	13,3	16,5	62
09:30	296,7	15,6	18,2	21,6	14,2	187	63
10:30	409,8	16,6	20,2	24,8	15	256,6	62,6
11:30	475,4	18	22	27,3	15,8	292	61,4
12:30	475,4	19,6	23,6	28,6	16	282,8	59,5
13:30	409,8	21,2	24,5	28,5	15,9	230,3	56,2
14:30	296,7	22,5	24,6	27,2	15,5	148	49,8
15:30	167,4	23,3	24	25	14,7	57,3	34,2
Rendement moyen							54,5

i= 60°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (W)	Rend (%)
08:30	173,6	15	16,5	18,5	13,3	107,8	62
09:30	300,3	15,6	18,3	21,7	14,2	189,3	63
10:30	410,5	16,7	20,3	25	15	256,5	62,5
11:30	474,2	18	22	27,3	15,8	291,3	61,4
12:30	474,2	19,6	23,6	28,6	16	282	59,5
13:30	410,5	21,2	24,5	28,5	16	230,7	56,2
14:30	300,3	22,5	24,6	27,3	15,5	150,3	50
15:30	173,6	23,3	24,2	25,3	14,8	61,4	35,4
Rendement moyen							57,8

Annexes

Journée caractéristique du mois de **Décembre** : $G = 2 \text{ KWh/m}^2.\text{jour}$, $V_v = 4,13 \text{ m/s}$, $Q_v = 60 \text{ l/h}$, $T_a = 11,3 \text{ C}^\circ$.

i= 0°	$\tau_v=0,71$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	90,3	12	12,6	13,3	9,3	41	45,4
09:30	189,7	12,2	13,6	15,4	10	97,4	51,3
10:30	279,2	12,7	14,8	17,4	10,5	146	52,3
11:30	333	13,5	16	19	11	172,3	51,7
12:30	333	14,5	16,8	20	11	166,7	50
13:30	279,2	15,4	17,2	19,6	11	131	47
14:30	189,7	16	17	18,5	10,6	76,3	40,2
15:30	90,3	16,4	16,6	17	10	16,7	18,5
Rendement moyen							47,5

i= 20°	$\tau_v=0,81$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	119	12	13	14,2	9,6	67	56,3
09:30	231	12,4	14,3	17	10,3	138,3	59,8
10:30	331,2	13,2	16	19,6	11	199,2	60,2
11:30	389,8	14,3	17,6	21,8	11,6	231	59,3
12:30	389,8	15,6	18,8	22,8	11,8	223,8	57,4
13:30	331,2	16,8	19,3	22,6	11,7	179	54
14:30	231	17,8	19,3	21,3	11,3	108,3	45
15:30	119	18,4	18,8	19,4	10,7	31,8	26,7
Rendement moyen							55

i= 40°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	139,5	12	13,2	14,7	9,7	82,8	59,3
09:30	257,7	12,5	14,7	17,7	10,6	159,3	61,8
10:30	362,3	13,4	16,6	20,6	11,3	224	61,8
11:30	423,2	14,6	18,2	23	12	257,8	61
12:30	423,2	16	19,5	24	12,2	249,8	59
13:30	362,3	17,4	20,2	23,8	12	201,5	55,6
14:30	257,7	18,5	20,3	22,5	11,6	125,8	48,8
15:30	139,5	19,2	19,8	20,5	11	43	30,8
Rendement moyen							56,8

i= 60°	$\tau_v=0,83$						
TSV (h)	Gs (W/m²)	Tee (C°)	Tes (C°)	Tp (C°)	Tv (C°)	Qu (w)	Rend (%)
08:30	149,7	12	13,3	15	9,8	89,6	59,8
09:30	266,7	12,5	14,8	17,8	10,6	165,4	62
10:30	369,4	13,4	16,6	20,8	11,4	228,8	62
11:30	429	14,7	18,4	23	12	261	60,8
12:30	429	16,2	19,8	24,3	12,3	252,5	58,8
13:30	369,4	17,6	20,5	24,2	12,2	205	55,5
14:30	266,7	18,7	20,5	23	11,7	130,7	49
15:30	149,7	19,4	20	21	11	48,8	32,6
Rendement moyen							56,9

Annexe D :

Données météorologiques

Les données météorologiques moyennées sur 22 années de mesures Sont représentées sur la figure (1.D). [9]

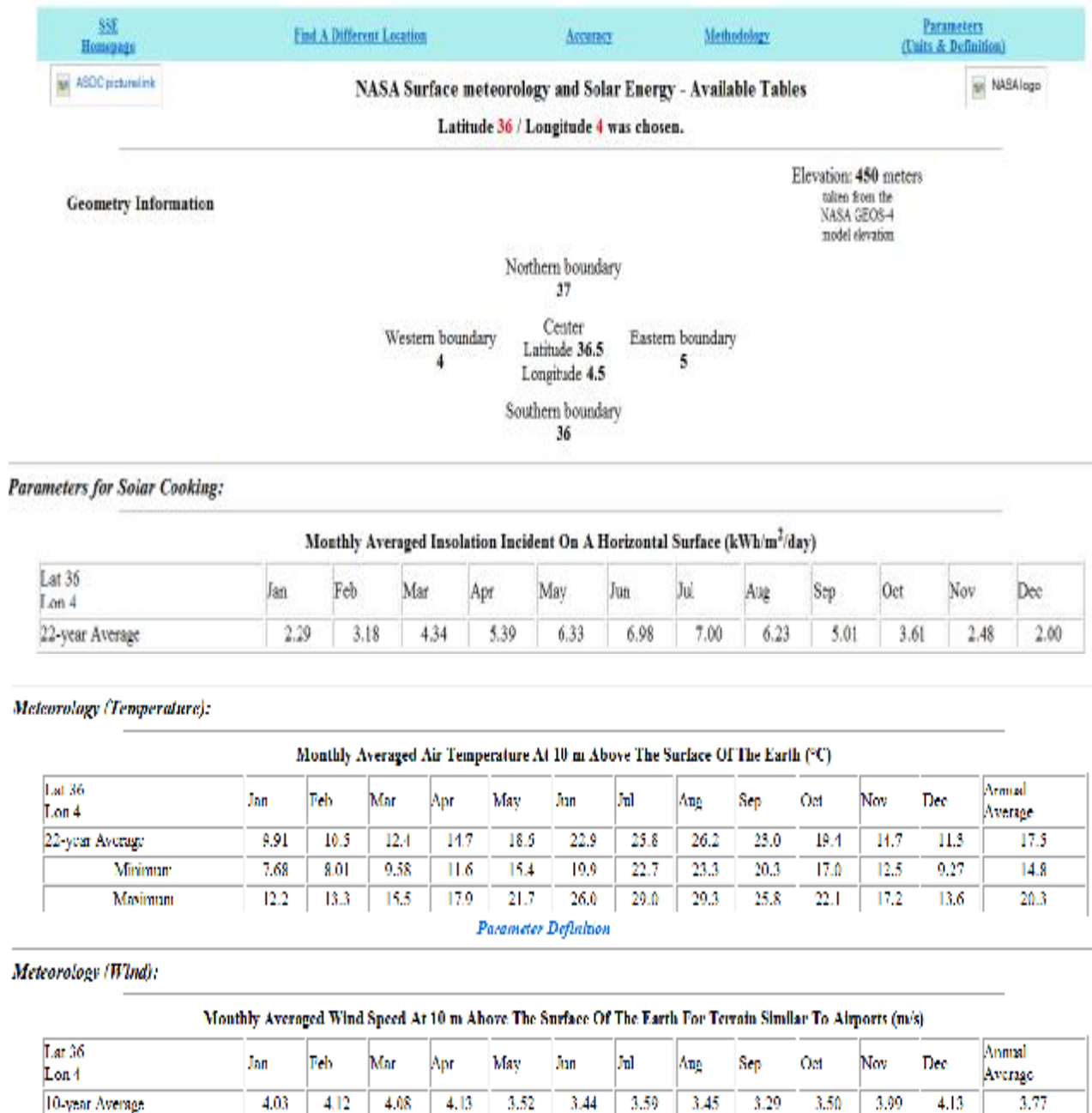


Figure 1.D : Données météorologiques moyennes sur 22 ans.

Annexes

Les données météorologiques de chaque journée du mois de juin et juillet sont regroupées dans le tableau (1.D). [8]

An	Mois	Jour	Température de l'air - moyenne (°C)	Température de l'air - minimum (°C)	Température de l'air - maximum (°C)	Humidité relative (%)	Rayonnement solaire quotidien (KWh/m ²)	Pression atmosphérique (kPa)	Vitesse du vent (m/s)	Température du sol (°C)
2013	6	1	13,92	7,42	19,81	0,6291	7,69	100,15	3,44	14,6
2013	6	2	16,87	8,98	25,2	0,5431	7,99	100,1	2,49	17,37
2013	6	3	16,52	10,26	23,49	0,6149	7,94	100	3,04	17,08
2013	6	4	17,6	9,86	25,22	0,5279	8,04	99,91	2,68	18
2013	6	5	20,8	13,64	29,52	0,5062	7,12	99,45	4,54	20,7
2013	6	6	18,22	13,88	23,29	0,6813	5,95	99,86	3,7	19,44
2013	6	7	19,67	11,85	27,34	0,5969	7,66	100,02	1,63	21,11
2013	6	8	18,17	12,55	24,92	0,61	7,24	99,94	3,06	19,58
2013	6	9	16,63	10,38	23,24	0,6015	7,78	99,86	3,53	17,61
2013	6	10	16,83	9,6	23,54	0,6091	7,28	100,13	3,25	17,43
2013	6	11	19,46	12,75	26,38	0,5083	7,84	100,38	2	19,73
2013	6	12	21,48	16,07	28,51	0,4796	7,85	100,42	2,2	21,32
2013	6	13	22,1	15,06	30,09	0,4935	7,93	100,23	2,58	22,21
2013	6	14	23,34	16,42	31,83	0,4877	7,91	100,1	2,03	23,42
2013	6	15	25,12	17,07	33,41	0,4404	7,91	100,01	2,74	24,85
2013	6	16	27,51	18,55	36,2	0,3809	7,79	99,91	2,38	27,33
2013	6	17	27,77	19,82	36,71	0,3525	6,48	99,58	4,28	27,49
2013	6	18	23,16	14,94	32,7	0,4241	7,79	99,54	3,76	23,9
2013	6	19	19,27	12,84	27,09	0,4731	7,9	99,89	3,15	20,92
2013	6	20	19,28	12,82	27,01	0,5547	8,01	100,08	2,8	20,89
2013	6	21	20,95	12,62	29,69	0,5471	7,53	100,04	2,91	22,58
2013	6	22	18,86	15,5	24,47	0,7066	5,24	100,26	4,83	20,05
2013	6	23	19,92	14,85	26,53	0,6654	7,59	100,32	3,89	21,71
2013	6	24	20,74	14,68	28,61	0,6461	7,82	100,38	4,24	22,55
2013	6	25	20,67	14,9	29,1	0,6104	7,73	100,38	3,59	22,74
2013	6	26	19,99	13,81	28,03	0,587	7,85	100,4	4,48	21,71
2013	6	27	19,64	12,03	28,61	0,5722	7,93	100,35	3,28	21,74
2013	6	28	19,23	13,58	26,47	0,5817	7,82	100,45	4,6	20,84
2013	6	29	19,69	11,93	27,6	0,5022	7,87	100,65	3,93	21,17
2013	6	30	22,21	12,36	31,46	0,424	7,89	100,3	3,05	23,67
2013	7	1	22,56	18,98	27,36	0,6617	6,59	99,95	3,04	22,56
2013	7	2	23,33	17,88	29,58	0,6033	7,46	99,96	2,44	23,58
2013	7	3	22,34	18,48	26,92	0,6858	5,97	100,14	2,64	23,19
2013	7	4	22,18	16,53	29,01	0,6374	7,64	100,31	3,61	23,73
2013	7	5	20,31	14,18	27,06	0,5973	7,83	100,5	3,68	21,92
2013	7	6	21,83	14,13	30,12	0,5708	7,84	100,48	2,84	23,69
2013	7	7	23,2	14,97	31,95	0,4823	7,81	100,41	2,77	24,65
2013	7	8	23,5	16,2	31,82	0,4773	7,83	100,3	2,71	24,99
2013	7	9	22,88	16,08	30,45	0,5017	7,76	100,17	2,96	24,12
2013	7	10	23,62	16,33	31,31	0,4341	7,15	99,91	2,66	24,45
2013	7	11	26,4	17,26	35,85	0,3767	7,62	99,71	2,4	27,17
2013	7	12	27,12	20,22	34,98	0,3597	6,15	100,01	2,63	27,45
2013	7	13	25,84	19,58	33,03	0,4409	7,21	100,1	2,9	26,92
2013	7	14	24,73	18,39	32,17	0,4725	7,74	100,21	2,98	25,87
2013	7	15	24,61	16,83	32,87	0,4617	7,7	100,31	2,55	26,32
2013	7	16	25,06	18,47	31,27	0,5248	7,58	100,29	2,06	25,22
2013	7	17	25,34	19,26	31,99	0,5719	7,53	100,24	3,06	26,81
2013	7	18	24,75	17,79	32,13	0,5664	7,52	100,17	3,02	26,78

Annexes

2013	7	19	27,05	18,54	34,91	0,4458	7,53	99,91	2,23	28,79
2013	7	20	28,53	22,2	36,99	0,4338	7,36	99,59	4,05	29,43
2013	7	21	26,24	21,04	33,84	0,6193	7,28	99,84	2,67	28,09
2013	7	22	24,64	19,84	30,57	0,6535	6,53	99,99	3,45	26,71
2013	7	23	25,32	18,39	33,46	0,524	7,52	99,94	2,47	27,34
2013	7	24	27,24	20,27	35,36	0,4244	7,53	100,1	2,32	28,54
2013	7	25	28,73	20,39	37,4	0,3562	7,43	100,04	2,32	29,93
2013	7	26	30,99	24,18	39	0,335	7,29	99,8	2,76	31,36
2013	7	27	31,45	24,66	40,3	0,3212	7,03	99,66	3,14	32
2013	7	28	29,83	24,08	37,12	0,3887	7,2	100	2,45	30,91
2013	7	29	26,58	21,12	32,79	0,4938	0	100,55	3,56	28,16
2013	7	30	25,69	19,19	34,01	0,5371	0	100,52	3,82	27,67
2013	7	31	24,2	16,65	32,96	0,4796	0	100,2	3,7	26,12

Tableau 1.D : données météorologiques du mois de juin et juillet 2013.