



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Hamma Lakhdar d'El-Oued

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Mécanique énergétique

THEME

**L'impact des matériaux locaux sur l'efficacité
énergétique d'un capteur solaire plan à air**

Devant le jury composé de :

Mr. Meneceur Nouredine	Président
Mr. Khechana Mohamed	Examineur
Mr. Bousbia Seif Eddine	Examineur
Dr. Nadir Nadia	Encadreur
Dr. Aoun Yacine	Co-Encadreur

Réalisé par :

Khelaifa Khalifa
Ahfouda Djelloul
Hemici Brahim
Becheikha Soufiane

Année Universitaire 2021/2022

Remerciements

Ce travail a été réalisé à l'université HAMMA LAKHDAR d'EL-OUED, Faculté des Sciences et de la Technologie département de génie Mécanique.

Nous tenons avant tout à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la volonte pour achever ce modeste travail.

Nous tenons à remercions tout particulièrement nos encadreurs Dr. Nadir Nadia et Dr. Aoun Yacine, non seulement pour la qualité de leur encadrement mais aussi pour leur disponibilité.

Nos remerciements s'adressent aux membres du Jury qui nous font l'honneur de participer à la discussion.

Nous remercions toute l'équipe de notre promotion dans la spécialité mécanique pour leurs esprits de famille durant le cycle d'étude.

Nous remercions également les enseignants de la formation Génie Mécanique pour tout la patience et tous les efforts et pour tout le savoir, qu'ils ont su nous transmettre au cours de notre formation de master, et en particulier toutes les personnes qui nous a guider volontairement pendant notre cursus de formation ainsi qu'avec leurs précieux.

Nous ne pouvons nous empêcher d'avoir une pensée pour ceux et celles ont répondu présent et nous ont offert leur soutien moral dans le moment difficile et qui étaient à nos cotés pour partager avec nous les moments de joie.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A toute ma famille

A mes encadreur Dr. Nadir Nadia et Dr. Aoun Yacine

A tous mes collègues et mes amis partout

A tous les étudiants du département de génie mécanique

A tous ceux qui m'ont aidé, même avec un mot

d'encouragement et de gentillesse

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

Avec mes remerciements les plus sincères.

Sommaire

Remerciements.....	I
Dedicaces.....	II
Sommaire.....	III
Liste des figures.....	VII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des photos.....	X
Liste des abréviations.....	XI
Résumé.....	XIV
Introduction generale.....	1

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

I.1. Introduction.....	4
I.2. Historique sur l'énergie solaire.....	4
I.3. Soleil.....	5
I.3.1. Présentation du soleil	5
I.3.2. Évolution.....	7
I.4. Rayonnement (Irradiation) solaire.....	8
I.4.1. Composantes du rayonnement solaire.....	8
I.4.1.1. Rayonnement direct.....	9
I.4.1.2. Rayonnement diffus (indirect).....	9
I.4.1.3. Rayonnement global.....	9
I.4.2. Spectre du rayonnement solaire	9
I.4.3. Constante solaire.....	10
I.4.4. Albédo du sol.....	11
I.4.5. Durée d'insolation.....	12
I.5. Coordonnées géographiques du soleil.....	12
I.5.1. Longitude	12
I.5.2. Latitude	13
I.5.3. Altitude	13

I.6. Gisement solaire.....	13
I.6.1. Cas du monde.....	13
I.6.2. Cas de L'Algérie.....	14
I.7. Présentation de la région d'expérimentation El-Oued.....	15
I.7.1. Espace géographique et milieu physique et climatique	15
I.7.2. Station météorologique de référence.....	16
I.8. Paramètres climatologiques d'El-Oued.....	17
I.8.1. Température.....	17
I.8.2. Pluviométrie (Précipitation).....	17
I.8.3. Humidité.....	18
I.8.4. Vent.....	19
I.8.5. Ensoleillement (Insolation).....	20
I.8.6. Evaporation.....	21
I.9. Conclusion.....	22

Chapitre II : Etude théorique du capteur solaire plan

II.1. Introduction.....	24
II.2. Capteur solaire	24
II.3. Principe de fonctionnement des capteurs solaires.....	25
II.4. Différents types des capteurs solaires.....	26
II.4.1. Capteur solaire à concentration.....	26
II.4.2. Capteurs solaires plans.....	27
II.5. Classification des capteurs solaires plans.....	28
II.5.1. Capteurs solaires thermiques à eau.....	28
II.5.2. Capteurs solaires thermiques à air.....	28
II.6. Principaux composants des capteurs solaires plans.....	29
II.6.1. Absorbeur.....	29
II.6.2. Fluide caloporteur.....	30
II.6.2.1. Eau.....	30
II.6.2.2. Air	30

II.6.3. Couverture transparente.....	30
II.6.4. Isolation.....	31
II.6.5. Coffre.....	31
II.7. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires	32
II.7.1. Paramètres externes	32
II.7.2. Paramètres internes.....	32
II.8. Transfert de chaleur dans un capteur solaire.....	32
II.8.1. Conduction.....	33
II.8.2. Convection.....	34
II.8.3. Rayonnement	36
II.9. Pertes thermiques dans un capteur solaire.....	36
II.9.1. Pertes par convection.....	37
II.9.2. Pertes par conduction.....	37
II.9.3. Pertes par rayonnement.....	37
II.10. Rendement d'un capteur solaire plan.....	38
II.10.1. Bilan énergétique	38
II.10.2. Rendement instantané	40
II.10.3. Rendement journalier	41
II.11. Quelques études réalisées concernant l'amélioration de rendement d'un capteur solaire plan à air.....	41
II.12. Conclusion.....	50

Chapitre III : Etude expérimentale du capteur solaire plan

III.1. Introduction.....	52
III.2. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air.....	52
III.2.1. Présentation des capteurs solaires plans à air de notre expérience.....	52
III.2.2. Préparation du sable.....	53

III.2.2.1. Tamisage.....	53
III.2.2.2. Traitement chimique.....	54
III.2.2.3. Traitement calorifique.....	54
III.2.3. Composants du capteur acheté.....	55
III.2.4. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air.....	57
III.3.4.1. Coffre (Couverture extérieure).....	58
III.3.4.2. Isolation thermique.....	59
III.3.4.3. Absorbeur.....	59
III.3.4.4. Chicane.....	60
III.3.4.5. Couverture verrière (verre).....	63
III.3.4.6. Réalisation du support.....	63
III.3.4.7. Thermocouples.....	63
III.2.4.8. Dispositif de contrôleur de température intelligent mode REX-C400.....	64
III.3.4.9. Montage.....	66
III.4. Appareillages de mesures.....	70
III.4.1. Mesure de la température.....	70
III.4.2. Mesure de la vitesse de l'air.....	70
III.4.3. Mesure du rayonnement solaire global.....	71
III.5. Résultats expérimentaux.....	72
III.5.1. Variation du rayonnement solaire et la température de l'air ambiant.....	72
III.5.2. Variation de la température de l'absorbeur, la température d'entrée et de sortie.....	73
III.5.3. Température de sortie.....	76
III.5.4. Efficacité thermique des capteurs solaires.....	82
III.6. Conclusion.....	83
Conclusion generale.....	85
References bibliographiques.....	88
Annexe A.....	98

Liste des figures

Figure (I.1) : Structure du soleil.....	7
Figure (I.2) : Cycle de vie du soleil.....	8
Figure (I.3) : Composantes de rayonnement solaire.....	9
Figure (I.4) : Spectre du rayonnement solaire.....	10
Figure (I.5) : Schéma de constante solaire.....	11
Figure (I.6) : Coordonnées géométriques.....	12
Figure (I.7) : Distribution du potentiel de l'énergie solaire dans le monde.....	14
Figure (I.8) : Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontal sur le territoire Algérien aux mois de Juillet et Décembre.....	15
Figure (I.9) : Site de la région d'El-Oued.....	16
Figure (I.10) : montre les températures moyennes mensuelles en (°C) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).....	17
Figure (I.11) : montre les précipitations moyennes mensuelles en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).....	18
Figure (I.12) : montre l'humidité relative moyenne mensuelle en (%) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).....	19
Figure (I.13) : montre les vitesses moyennes mensuelles du vent en (Km/h) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).....	20
Figure (I.14) : montre les distributions moyennes mensuelles de la durée d'ensoleillement en (h) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).....	21
Figure (I.15) : montre la variation de l'évaporation moyenne mensuelle en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).	22
Figure (II.1) : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan vitré.....	26
Figure (II.2) : Capteur solaire à concentration.....	27
Figure (II.3) : Schéma d'un capteur solaire plan à eau.....	28
Figure (II.4) : Schéma d'un capteur solaire plan à air.....	29
Figure (II.5) : Schéma du transfert de chaleur par conduction.....	33

Figure (II.6) : Schéma du transfert de chaleur par convection.....	34
Figure (II.7) : Schéma du transfert de chaleur radiatif.....	36
Figure (II.8) : Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré.....	37
Figure (II.9) : Différents échanges thermiques dans un capteur solaire plan.....	38
Figure (III.1) : Dimensions du capteur solaire plan.....	58
Figure (III.2) : Dimensions des chicane parallèles.....	61
Figure (III.3) : Dimensions des chicane transversales.....	62
Figure (III.4) : Variation de la température de l'air ambiant, et du rayonnement solaire en fonction du temps.....	72
Figure (III.5a) : Forme de la température d'entrée, sortie de capteur solaire et la température de l'absorbeur.....	74
Figure (III.5b) : Forme de la température d'entrée, sortie de capteur solaire et la température de l'absorbeur.....	74
Figure (III.5c) : Forme de la température d'entrée, sortie de capteur solaire et la température de l'absorbeur.....	75
Figure (III.5d) : Forme de la température d'entrée, sortie de capteur solaire et la température de l'absorbeur.....	75
Figure (III.6a) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.....	78
Figure (III.6b) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.....	78
Figure (III.6c) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.....	79
Figure (III.6d) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.....	79
Figure (III.7a) : Forme de la différence de température des capteurs solaires.....	80
Figure (III.7b) : Forme de la différence de température des capteurs solaires	80
Figure (III.7c) : Forme de la différence de température des capteurs solaires	81
Figure (III.7d) : Forme de la différence de température des capteurs solaires	81
Figure (III.8) : Forme de l'efficacité thermique pour les tous capteurs solaires	83

Liste des tableaux

Tableau (I.1) : Caractéristiques principales du soleil.....	5
Tableau (I.2) : Coefficients d'albédo usuels.....	11
Tableau (I.3) : Potentiel solaire.....	14
Tableau (I.4) : Caractéristiques géographiques de station climatique.....	16
Tableau (I.5) : représente les températures moyennes mensuelles en (°C) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).....	17
Tableau (I.6) : représente les précipitations moyennes mensuelles en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).....	18
Tableau (I.7) : représente l'humidité moyenne mensuelle en (%) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).	19
Tableau (I.8) : représente les vitesses moyennes mensuelles du vent en (Km/h) de l'ONM d' El-Oued durant la période (1985-2009).	19
Tableau (I.9) : représente les distributions moyennes mensuelles de la durée d'ensoleillement en (heure) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).	20
Tableau (I.10) : représente l'évaporation moyenne mensuelle en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).	21
Tableau (II.1) : Résumés des Articles concernant le capteur solaire.....	41
Tableau (III.1) : Composants du capteur solaire.....	55

Liste des photos

Photo (III.1) : Quatre capteurs solaires à réaliser.....	53
Photo (III.2) : 1 ^{ère} Etape.....	54
Photo (III.3) : 2 ^{ème} Etape.....	54
Photo (III.4) : 3 ^{ème} Etape.....	54
Photo (III.5) : Quantité du sable sur une balance électronique.....	55
Photo (III.6) : Capteur solaire à réaliser.....	58
Photo (III.7) : Coffre du capteur.....	59
Photo (III.8) : Laine de verre.....	59
Photo (III.9) : Absorbeur en Aluminium.....	60
Photo (III.10) : Capteur solaire avec chicane parallèles.....	61
Photo (III.11) : Capteur solaire avec chicane transversales.....	62
Photo (III.12) : Plaque de verre.....	63
Photo (III.13) : Thermocouple.....	64
Photo (III.14) : Armoire de mesure de température.....	64
Photo (III.15) : Dispositif de contrôleur de température intelligent mode REX-C400.....	65
Photo (III.16) : Connecter les capteurs à l'armoire de mesure de température.....	65
Photo (III.17) : Dispositif de contrôleur de température intelligent mode REX-C400 et bouton interrupteur.....	66
Photo (III.18) : Fixation de l'absorbeur.....	67
Photo (III.19) : Positionnement de chicanes et de thermocouples.....	68
Photo (III.20) : Ajout de quantité du sable à l'absorbeur.....	68
Photo (III.21) : Montage de vitre.....	69
Photo (III.22) : Installation des capteurs solaires.....	69
Photo (III.23) : Emplacement des thermocouples.....	70
Photo (III.24) : Anémomètre.....	70
Photo (III.25) : Anémomètre Kestrel 1000.....	71
Photo (III.26) : Pyranomètre (pyranometer 4890.20 "Frederiksen").....	71

Liste des abréviations

Symbole	Désignation	Unité
S_0	Constante solaire	W/m^2
R_S	Rayon du soleil	Km
T_S	Température à la surface du soleil	K
σ	Constante de Stéphane-Boltzmann	$W/m^2.K^4$
D_{ST}	Distance terre-soleil	Km
ϕ	Latitude	Degré (°)
l	Longitude	Degré (°)
P_{moy}	Précipitations moyennes mensuelles	mm
H_{moy}	Humidité moyenne mensuelle	%
V_{moy}	Vitesses moyennes mensuel	Km/h
I_{moy}	Insolation moyenne mensuelle	h (heure)
E_{moy}	Evaporation moyenne mensuelle	mm
i	Angle d'incidence	Degré (°)
T_{pm}	Température portée absorbeur	°C
Q_{cd}	Flux de chaleur par conduction	W
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur	m^2
λ	Conductivité thermique	$W/m.^{\circ}C$
x	Variable d'espace dans la direction du flux	m
Q_{cv}	Flux de chaleur par convection	W
h	Coefficient de convection	$W/m^2.K$
S	Surface de la paroi solide en contact avec le fluide	m^2
T_p	Température de la paroi solide	°C
T_f	Température du fluide	°C
U_m	Vitesse moyenne du fluide	m/s
ρ	Masse volumique du fluide	Kg/m^3
C_p	Chaleur spécifique du fluide	$J/kg.^{\circ}C$
μ	Viscosité thermique du fluide	$Kg/m.s$
λ	Conductivité thermique du fluide	$W/m^2.^{\circ}C$
D	Dimension caractéristique de la surface d'échange	m
Q_r	Densité de flux de chaleur émis par le corps.	W/m^2

σ	Constante de Stefan-Boltzmann évaluée	$W/m^2.K^4$
T_p	Température de la paroi solide.	$^{\circ}C$
T_f	Température du fluide.	$^{\circ}C$
S	Aire de la surface.	m^2
P_v	Puissance rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre.	W
A_v	Surface de la vitre.	m^2
G	Rayonnement solaire global incident.	W/m^2
q_{rav}	Quantité d'énergie cédée par l'absorbeur par rayonnement	W
q_{cva}	Quantité d'énergie cédée par l'absorbeur par convection	W
q_{rvc}	Quantité d'énergie par rayonnement vers le ciel	W
P_{ab}	Puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur	W/m^2
A_{ab}	Surface de l'absorbeur.	m^2
q_{caf}	Quantité d'énergie par convection au fluide caloporteur	W/m^2
q_{cav}	Quantité d'énergie par convection à la vitre	W/m^2
q_{rav}	Quantité d'énergie par rayonnement à la vitre.	W/m^2
q_{cdai}	Quantité d'énergie par conduction à l'isolant.	W/m^2
φ	Résistances thermiques.	W/m^2
q_{caf}	Quantité d'énergie par convection de l'absorbeur.	W
q_{cfi}	Quantité d'énergie par convection à l'isolant.	W
q_{cfi}	Quantité d'énergie par convection cédée par le fluide caloporteur.	W
q_{cdai}	Quantité d'énergie par conduction cédée par l'absorbeur.	W
q_{ris}	Quantité d'énergie par rayonnement au sol	W
q_{cia}	Quantité d'énergie par convection au milieu ambiant	W
P_{ab}	Puissance solaire arrivant sur le capteur.	W
P_u	Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.	W
A_c	Surface du capteur.	m^2
m	Débit massique de fluide.	Kg/s
c_p	Chaleur spécifique de fluide.	$J/kg.k$
T_{fs}	Température de sortie du fluide.	$^{\circ}C$
T_{fe}	Température d'entrée du fluide.	$^{\circ}C$

T_e	Température d'entrée du capteur	°C
T_s	Température de sortie du capteur	°C
T_{abs}	Température de l'absorbeur	°C
T_{amb}	Température de l'air ambiante	°C
V_e	Vitesse de l'air à l'entrée du capteur	m/s
V_s	Vitesse de l'air à la sortie du capteur	m/s
V_{amb}	Vitesse de l'air ambiant	m/s
η_i	Rendement instantané	%
α_v	Absorptivité de la vitre.	/
α_{ab}	Absorptivité de l'absorbeur.	/
τ_v	Transmissivité de la vitre.	/
ε	Emissivité thermique du matériau.	/
Indices		
Nu	Nombre de NUSSELT	
Pr	Nombre de PRANDLT	
Gr	Nombre de GRASHOF	
ECS	Eau Chaude Sanitaire	
ONS	Office National de Statistique	
ONM	Office National Météorologique	
hab	habitant	
ρ	Albédo	
Jan.	Janvier	
Fév.	Février	
Juil.	Juillet	
Sept.	Septembre	
Oct.	Octobre	
Nov.	Novembre	
Déc.	Décembre.	
Co	Cobalt	
Mg	Magneusium	
Ca	Calcium	
Fe	Fer	
Al	Aluminium	
SiO ₂	Oxyde de silicium	

Résumé

En raison de l'insuffisance de l'échange thermique réalisée dans le capteur solaire plan à air entre le fluide et l'absorbeur, il est intéressant à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique. Dans cette étude, nous intéressons à la réalisation et l'expérimentation d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en convection naturelle. Nous présentons une série de test expérimental menés sur quatre prototypes du capteur solaire plan à air, de surface de captation de 0.5 m^2 , conçu au laboratoire et expérimenté dans la région d'El oued. Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires plans à air en introduisant les chicanes en forme rectangulaire perpendiculaires à l'écoulement et attachées sur l'absorbeur de capteur, deux cas ont été considérés chicanes parallèles et chicanes transversales. D'autre part ont utilisé le sable (matériaux locaux) sur l'absorbeur de trois capteurs. Dans cette étude ont comparaison les rendements thermiques de capteur avec chicanes+sable et d'un autre capteur identique dans la fabrication sans chicanes et sans sable (témoin).

Mots clés: Capteur solaire, Rendement, Chicanes parallèles, chicanes transversales, Matériaux locaux.

Abstract

Due to the insufficiency of the heat exchange carried out in the flat solar air collector between the fluid and the absorber, it is interesting to make improvements for better performance or better thermal efficiency. In this study, we are interested in the realization and the experimentation of a flat air solar collector operating in natural convection. We present a series of experimental tests carried out on four prototypes of the flat air solar collector, with a capture surface of 0.5 m^2 , designed in the laboratory and tested in the region of El Oued. In order to improve the performance of flat-plate solar collectors by introducing rectangular baffles perpendicular to the flow and attached to the collector absorber, two cases have been considered: parallel baffles and transverse baffles. On the other hand have used the sand (local materials) on the absorber to the three sensors. In this study, we compared the thermal yields of a collector with baffles+sand and of another identical collector in the manufacture without baffles and without sand (control).

Keywords: Solar collector, Efficiency, Parallel baffles, transverse baffles, Local materials.

ملخص

نظرًا لعدم كفاية التبادل الحراري الذي يتم إجراؤه في اللاقط الشمسي المسطح الهوائي بين السائل و الماص، فمن المثير للاهتمام إجراء تحسينات من أجل أداء أفضل أو كفاءة حرارية أفضل. في هذه الدراسة، نحن مهتمون بإدراك و تجريب لاقط شمسي مسطح هوائي يعمل في الحمل الحراري الطبيعي. نقدم سلسلة من الاختبارات التجريبية التي تم إجراؤها على أربعة نماذج أولية للاقط الشمسي المسطح الهوائي، مع مساحة إلتقاط تبلغ 0.5 متر مربع، تم تصميمها في المختبر واختبارها في منطقة الواد. من أجل تحسين أداء اللواقط الشمسية المسطحة الهوائية عن طريق إدخال حواجز مستطيلة متعامدة مع التدفق ومثبتة باللوح الماص للاقط ، تم النظر في حالتين: حواجز متوازية وحواجز متقاطعة. من ناحية أخرى تم استخدام الرمل (المواد المحلية) على السطح الماص لثلاث لواقط. في هذه الدراسة، قمنا بمقارنة المحصول الحراري للاقط مع حواجز + رمل و لاقط آخر مماثل في التصنيع بدون حواجز وبدون رمل (شاهد).

الكلمات المفتاحية: اللاقط الشمسي المسطح، المردود، الحواجز المتوازية، الحواجز المتقاطعة، المواد المحلية.

Introduction générale

Introduction générale

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit, l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelable.

D'autre part, l'échauffement climatique causé par l'émission des gaz à effets de serre a conduit beaucoup de pays à s'intéresser à des énergies propres [1].

Les énergies renouvelables apparaissent dans ce contexte une alternative intéressante pour préserver à la fois le confort des êtres humains et la qualité de l'air (Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre qui sont responsables du réchauffement de la terre). Pour répondre aux besoins humains en énergie les scientifiques comme les gouvernements s'orientent vers le développement et l'exploitation des ressources des énergies renouvelables, où l'énergie solaire se trouve au premier rang [2]. L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique via la photosynthèse. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre. Cette dernière est une énergie inépuisable et propre et peut être utilisée de façon efficace dans de nombreux systèmes thermiques [3].

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière.

Un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur à air qui peut être utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que le chauffage des locaux, le séchage des produits agricoles, le séchage du bois, le séchage des briques, etc... [1].

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur du capteur solaire, il est intéressant à apporter des améliorations pour de meilleures performances ou une meilleure efficacité thermique.

Dans cette étude, nous intéressons à la réalisation et l'expérimentation d'un capteur solaire plan à air fonctionnant en convection naturel. Nous présentons une série de test expérimental menés sur quatre prototypes du capteur solaire plan à air, de surface de captation de 0.5 m^2 , conçu au laboratoire et expérimenté dans la région d'El oued. Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires plan à air en introduisant les chicanes la forme rectangulaire perpendiculaires à l'écoulement et attachées sur l'absorbeur de capteur, deux cas ont été considérés chicanes parallèles et chicanes transversal. D'autre part ont utilisé le sable (matériaux locaux) sur l'absorbeur à la trois capteurs. Dans cette étude ont comparaison les rendements thermiques de capteur avec chicanes+sable et d'un autre capteur identique dans la fabrication sans chicanes et sans sable (témoin).

Ce mémoire comporte trois chapitres :

Le premier chapitre: est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire et étudier la météo dans le sud de l'Algérie (El-Oued), où nous allons expérimenter.

Le deuxième chapitre: est consacré à l'étude théorique du capteur solaire plan, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur.

Dans Le troisième chapitre: - ont l'étude de la conception de notre capteur solaire et de sa réalisation, présente les principaux instruments de mesure utilisés au cours des essais sur le capteur réalisé, et concrète les différentes expériences montées avec le capteur dans différentes journées comme étant des essais.

Enfin, nous terminons ce travail avec une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie solaire

I.1. Introduction

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures [4].

I.2. Historique sur l'énergie solaire

L'énergie solaire mérite assez peu le terme, souvent employé, d'énergie nouvelle. Depuis Antiquité les hommes ont su capter et utiliser l'énergie solaire : les égyptiens connaissent effet de serre et Archimède a incendié la flotte Romaine à Syracuse en utilisant des miroirs plans polis et groupés de façon à former des miroirs concaves.

Les ressources énergétiques dont nous disposons sont classées en deux grandes catégories :

- Les énergies denses qui ont été, et sont encore, très utilisées bien que le cycle de transformation soit long. Pour ces énergies le faible coût des investissements compense le coût du combustible.
- Les énergies renouvelables, sont souvent diffuses et irrégulières. Elles sont gratuites mais au prix d'un surcoût d'investissement très élevé qui explique leur rentabilité médiocre. Cependant, ce handicap se réduit de plus en plus avec la hausse des prix des combustibles.

Depuis 2000 ans on utilise plus d'énergie fossile qu'il ne s'en produit, et certaines ressources apparaissent aujourd'hui limitées. Les réserves en pétrole et en gaz seront épuisées dans un avenir relativement proche (30 ans environ), la houille blanche est déjà très exploitée dans les pays industrialisés, les énergies marémotrices et géothermiques ne pourront fournir qu'un appoint très modeste sur les besoins futurs. Les possibilités énergétiques de la fission de l'atome sont très vastes et expliquent le développement rapide des centrales nucléaires, cependant ce type de conversion de l'énergie peut entraîner en cas de développement important un certain risque de pollution.

L'énergie solaire représente la seule source d'énergie dispensée à profusion et n'entraînant aucune pollution ; de plus c'est une énergie « importée », que nous recevons du soleil, qui ne « Déstocke » pas de calories emprisonnées (calories qui ne se manifestent pas sans intervention humaine). C'est donc la seule énergie dont l'utilisation ne pourra pas modifier la température du globe. En contrepartie les limitations à l'emploi de l'énergie solaire sont nombreuses, elles proviennent surtout de son inconstance et de sa faible concentration [5, 6].

I.3. Soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de Centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [7, 8].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [7].

I.3.1. Présentation du soleil

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus.

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil [7, 9].

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (I.1) :

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	2×10^{30}
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Masse volumique moyenne (kg/m ³)	1408
Vitesse (km/s)	217

Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5×10^{17}
---	----------------------

Tableau (I.1) : Caractéristiques principales du soleil [10].

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

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de 25.104 km, elle présente les caractéristiques suivantes [11, 12]:
 - ✓ Une température de 15.106 °C.
 - ✓ Une densité est de 1015 kg/m³.
 - ✓ Une pression de 109 atm.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [12, 13]:
 - ✓ Une épaisseur de 244160 km.
 - ✓ Une température variant de 10.106 °C à 50.104 °C.
- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes [11, 12]:
 - ✓ Une température comprise entre 50.104 °C à 6400 °C.
 - ✓ Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'oeil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [14]:
 - ✓ La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
 - ✓ Une épaisseur de 500 km.
 - ✓ Une pression de 1/100 atm.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [13, 14]:
 - ✓ Une épaisseur 2000 km.
 - ✓ Une température augmentant de 4200 °C à 104 °C.
- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [12]:
 - ✓ Elle est sans limite précise.
 - ✓ La température augmente de 106 °C à 2.106 °C.

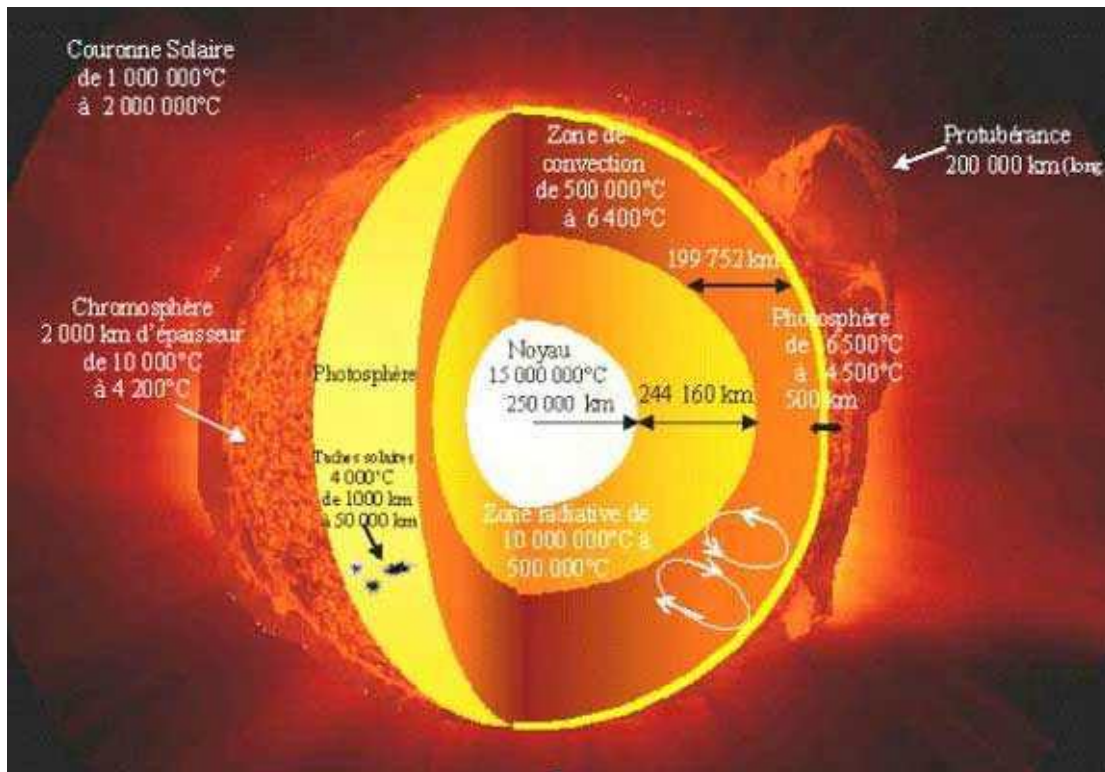


Figure (I.1) : Structure du soleil [10].

I.3.2. Évolution

Pendant les cinquante premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire.

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4.5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années.

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ, il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années [9].

La figure (I.2) donne le cycle de vie du soleil :

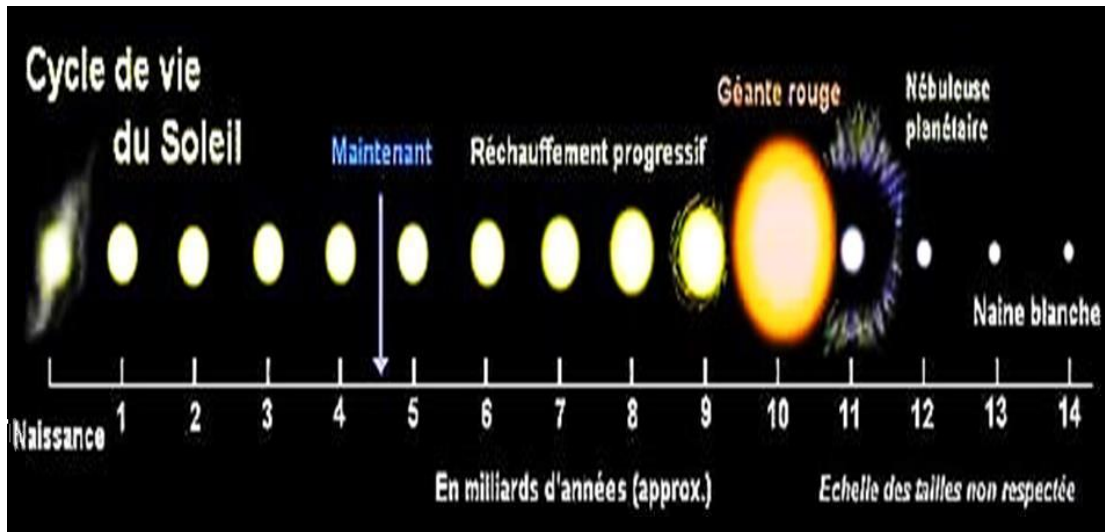


Figure (I.2) : Cycle de vie du soleil [9, 10].

I.4. Rayonnement (Irradiation) solaire

Le soleil aborde l'atmosphère terrestre sous forme de rayonnements électromagnétiques dont une part constitue le rayonnement visible [15].

Le rayonnement solaire en un lieu consiste en une composante directe et une composante diffuse [17].

Cette énergie radiative du soleil subit de profondes modifications en traversant l'atmosphère en raison de l'absorption et de la diffusion. Le rayonnement solaire atteint la couche supérieure de l'atmosphère à un taux moyen de 1367 W/m^2 . En Algérie par exemple, un mètre carré d'une surface horizontale de la terre reçoit annuellement entre 1700 kWh/m^2 au Nord et 2650 kWh/m^2 au Sud [18].

Dans l'atmosphère, le rayonnement est modifié en intensité et en polarisation par diffusion sur les molécules d'air, les gouttelettes d'eau, les poussières et les autres particules d'aérosol, par absorption due aux absorbants atmosphériques, par absorption et réflexion à la surface de la terre.

I.4.1. Composantes du rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1367 W/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (I.3) L'énergie reçue par une

surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée [19].

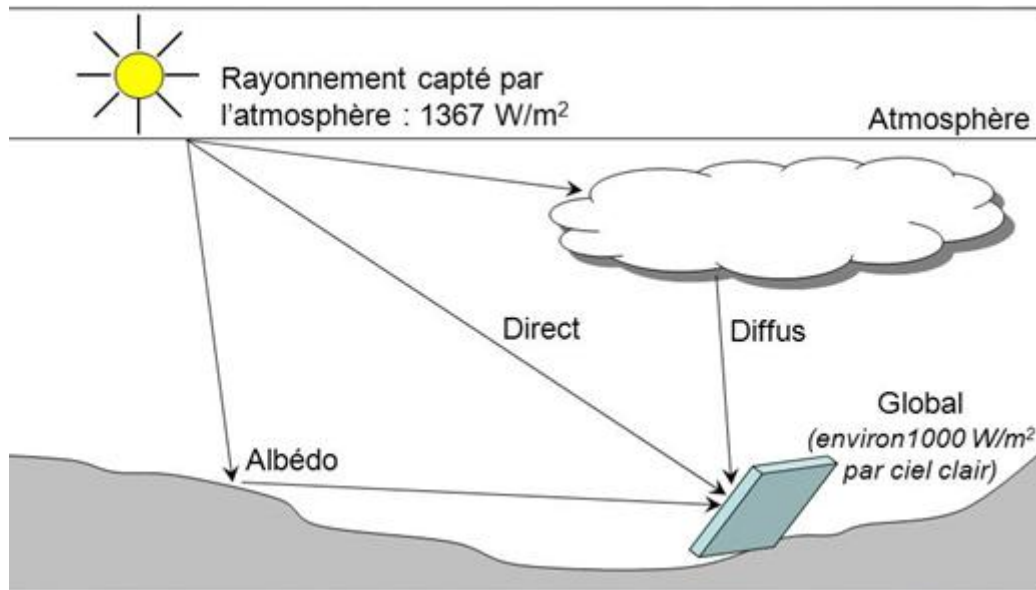


Figure (I.3) : composantes de rayonnement solaire [20].

I.4.1.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct c'est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair. Il est constitué de rayons solaires ayant traversé l'atmosphère terrestre sans subir d'absorption ni de diffusion [19].

I.4.1.2. Rayonnement diffus (indirect)

Le rayonnement diffus 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 [85].

I.4.1.3. Rayonnement global

Le rayonnement global d'un plan horizontal est la somme des rayonnements direct et diffus. Pour un plan incliné, il faut ajouter le rayonnement réfléchi par la surface environnante [19].

I.4.2. Spectre du rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde :

Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir porté à 5800° K . Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en:

- ✓ 6.4% d'Ultraviolet (UV) avec $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$.
- ✓ 48.0% de Visible (V) avec $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$.
- ✓ 45.6% d'Infrarouge (IR) avec $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$.

Le rayonnement solaire reçu au sommet de l'atmosphère, dans un plan perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance terre-soleil égale à sa valeur moyenne. Lorsque ce rayonnement traverse l'atmosphère pour atteindre la surface terrestre, il est fortement atténué en raison des phénomènes d'absorption et de diffusion par les différents constituants de celle-ci [21].

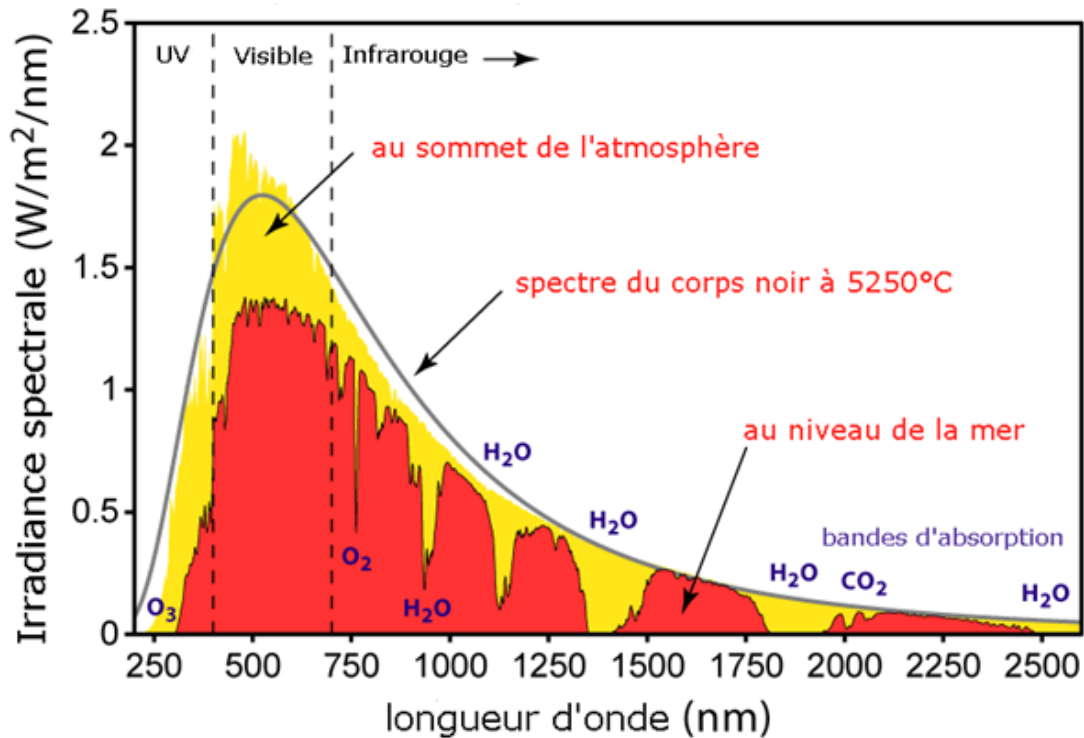


Figure (I.4) : Spectre du rayonnement solaire [22].

I.4.3. Constante solaire (S_0)

La constante solaire représente le flux du rayonnement solaire reçu par une surface unitaire disposée perpendiculairement aux rayons solaires.

Supposons que toute l'énergie émise par le soleil est reçue par la terre (absence de l'atmosphère) on aura alors: [048]

$$S_0 = \sigma T_s^4 \left(\frac{R_s}{D_{ST}} \right)^2 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{I.1})$$

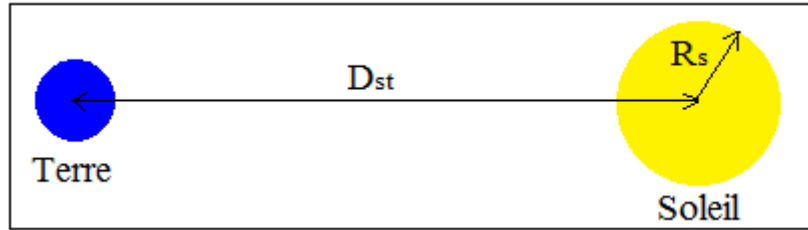


Figure (I.5) : Schéma de constante solaire

- ✓ R_s : Rayon du soleil (Km).
- ✓ D_{ST} : Distance terre-soleil (Km).
- ✓ σ : Constante de Stéphane-Boltzmann $= 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.
- ✓ T_s : Température à la surface du soleil (K).

I.4.4. Albédo du sol (ρ)

En réalité, la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'albédo. On définit généralement l'albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente. On utilise une échelle graduée de 0 à 1, correspondant respectivement au noir, pour un corps avec aucune réflexion, et au miroir parfait, pour un corps qui diffuse dans toutes les directions et sans absorption de tout le rayonnement visible qu'il reçoit. Le tableau (I.2) regroupe les valeurs d'albédo pour différentes surfaces [23, 24]:

Type de surface	Albédo (ρ)
Surface de lac	0.02 à 0.04
Forêt de conifères	0.05 à 0.15
Forêt tropicale	0.12
Herbe verte	0.25
Sable léger et sec	0.25 à 0.45
Sol sombre	0.05 à 0.15
Glace	0.30 à 0.40
Mer chaude	0.05
Mer froide	0.15
Neige tassée	0.60
Neige fraîche	0.85
Nuage	0.86

Verre à vitres	0.10
----------------	------

Tableau (I.2) : Coefficients d'albédo usuels [24].

I.4.5. Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell– Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments, où le soleil est bien visible, sont enregistrés. On parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et elle dépend du fait que le soleil levant soit visible du point d'observation ou caché par les nuages. A défaut de l'héliographe, il est possible de partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre et d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil [25, 22].

I.5. Coordonnées géographiques du soleil

Tout point de la surface terrestre est repéré par ses coordonnées géographiques ; longitude et latitude, ainsi que par son altitude (figure (I.6)).

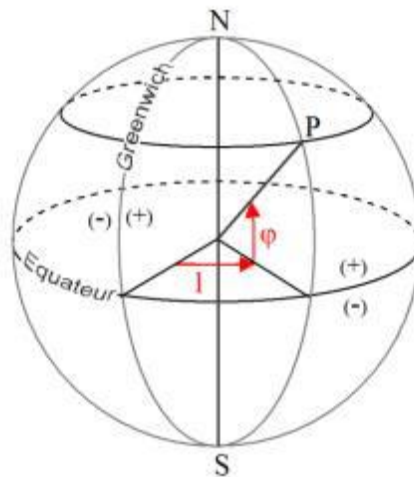


Figure (I.6) : Coordonnées géométriques [26].

I.5.1. Longitude (l)

Correspond à l'angle que fait le plan passant par le méridien du point en question avec le plan passant par le méridien d'origine, c'est-à-dire, le méridien de Greenwich 0° (Royaume-Uni). La longitude définit donc le positionnement est/ouest d'un point. Par conversion, on affecte le signe (+) les méridiens situés à l'Est de ce méridien, et de

signe (–) les méridiens situés à l'Ouest. La longitude sera désignée ici par la terre (l), elle peut être comprise entre -180° et $+180^\circ$.

I.5.2. Latitude (φ)

D'un lieu correspond à l'angle que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu avec le plan équatorial. L'équateur terrestre est donc caractérisé par une latitude égale à 0° , le pôle nord par la latitude $+90^\circ$ et le pôle sud par la latitude -90° , cette convention de la marque (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et la marque (–) à tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera déterminée ici par le signe (φ). Elle peut ainsi être comprise entre -90° et $+90^\circ$.

I.5.3. Altitude

D'un point correspond à la mesurée selon la verticale du lieu, qui sépare ce point d'une surface de référence appelée géoïde. Le géoïde est la surface moyenne des océans. En générale il est exprimé par mètre [27].

I.6. Gisement solaire

Le gisement solaire représente l'énergie disponible sous forme de rayonnement, l'énergie solaire est le moteur de toutes les grandes sources naturelles. Il est utilisé pour faire la simulation du fonctionnement d'un régime énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus juste possible compte tenu de la demande à satisfaire [28, 29].

I.6.1. Cas du monde

La plus grande partie du globe terrestre possède un potentiel d'énergie solaire annuelle important variable entre 1200 kW/m^2 et 2000 kW/m^2 surtout pour les régions à une population élevée comme l'Asie du sud, l'Amérique du Sud, l'Afrique et l'Amérique centrale. De ce fait, l'énergie solaire est considérée comme étant l'énergie de l'avenir.

Nous remarquons que l'Afrique possède le plus important potentiel en énergie solaire au monde, celui-ci peut atteindre une valeur annuelle de l'ordre de 2000 kW/m^2 , il pourrait être capable de couvrir la plus grande partie de ses besoins énergétiques [30, 31].

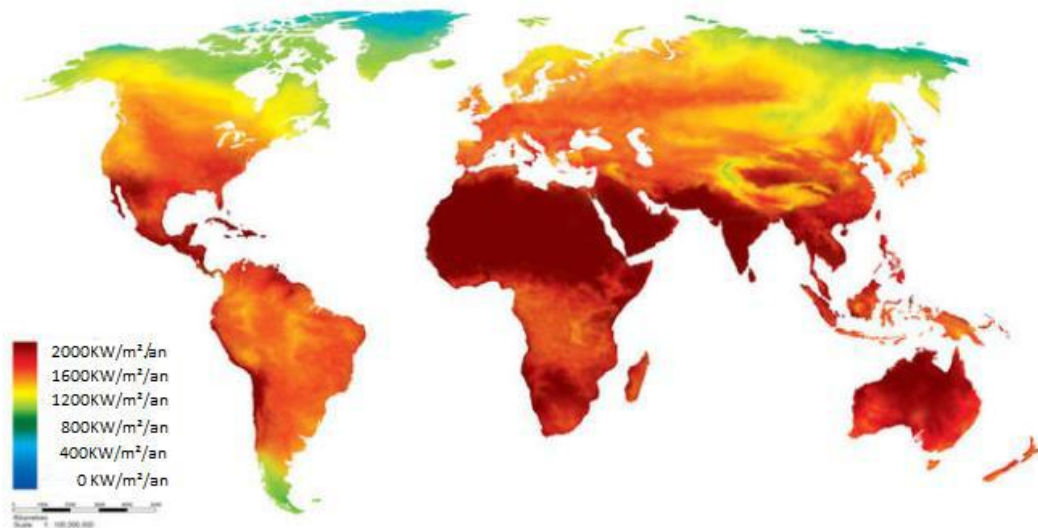


Figure (I.7) : Distribution du potentiel de l'énergie solaire dans le monde [30, 31].

I.6.2. Cas de L'Algérie

L'Algérie a d'un des gisements solaires les plus importants du monde. La durée d'ensoleillement sur tout le territoire national est de plus de 2000 heures aux 3900 heures surtout dans les hauts plateaux et Sahara.

L'aire horizontale d'un mètre carré est reçue chaque jour plus de 5 kWh dans la plupart partie du territoire. Soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays.

Le tableau (I.3) : résume le potentiel solaire en Algérie [32, 33, 34].

Régions	Sahara	Hauts Plateaux	Région côtière
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (Kwh/m ² .an)	1700	1900	2650

Tableau (I.3) : Potentiel solaire [34].

Une évaluation par satellite, exécutée par l'agence spatiale allemande, a montrée que l'Algérie dispose le potentiel solaire le plus grand de tous les pays méditerranéens [35, 34].

Il est de 169,440 Tera-Watts.heure/an (TWh/an) pour le solaire thermique et de 713,9 TWh/an pour le photovoltaïque [36, 34].

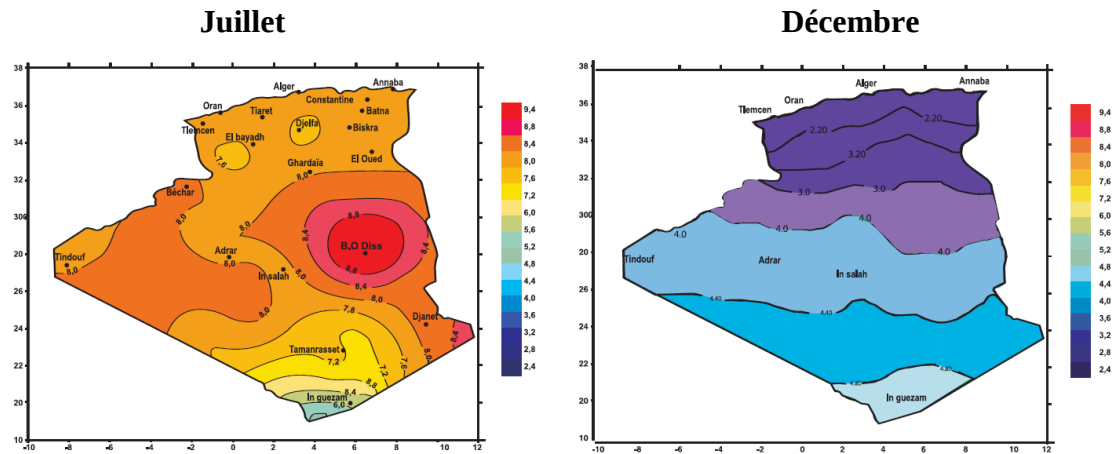


Figure (I.8) : Insolation globale quotidiennement reçue sur le plan horizontal du territoire Algérien aux mois de Juillet et Décembre [37].

I.7. Présentation de la région d'expérimentation El-Oued

I.7.1. Espace géographique et milieu physique et climatique

La wilaya d'El Oued Souf est située au Sud-est Constantinois. Elle est limitée:

- ✓ au Nord par les wilayates de Biskra, de Khenchela et de Tébessa.
- ✓ à l'Est par la frontière tunisienne.
- ✓ à l'Ouest par la wilaya de Djelfa.
- ✓ au Sud par la wilaya d'Ouargla.

Elle occupe une superficie de 54573 Km² pour une population totale de 504401 habitants à la fin de l'année 2005, soit une densité de 9,7 hab/km² [38].

Les coordonnées géographiques d'El-Oued, Algérie.

- ✓ Latitude : 33°21'21" Nord.
- ✓ Longitude : 6°51'47" Est.
- ✓ Altitude par rapport au niveau de la mer : 84 m.
- ✓ Albédo (ρ) : 0.3.

Le relief est composé de trois ensembles. Une région sableuse : elle couvre la totalité de la région du Souf, ainsi que les parties Est et Sud de Oued-Righ. Cette région fait partie du grand erg oriental. Elle ne présente que très peu d'intérêt pour l'agriculture. Une forme de plateau rocheux : elle longe la route nationale 3 à l'Ouest de la wilaya et s'étend vers le Sud. Une région de dépression : c'est la zone des chotts. Elle est située au Nord de la wilaya et se prolonge vers l'Est. Vu la forte salinité de

cette région, elle ne présente aucune utilité pour l'agriculture. Le climat de la wilaya est de type saharien et désertique, aux étés chauds et aux hivers doux. Les températures sont très élevées en été (54°C dans le Souf) et peuvent descendre jusqu'à 1°C en hiver. En ce qui concerne les précipitations, elles sont très faibles peu différents de 80 mm/an. Les principales contraintes naturelles rencontrées sont de types climatiques. Parmi les contraintes climatiques les plus importantes dans cette région on peut citer :

- ✓ La faiblesse des précipitations, environ 80 mm/an
- ✓ La fréquence régulière pendant presque toute l'année et aussi leur violence. Le sirocco provoque des dégâts importants (dessèchement, déshydratation). Les vents de sable freinent considérablement toute activité socio-économique.
- ✓ Les fortes températures estivales accélèrent le processus d'évaporation, plus de 200 à 600 mm/an dépassent les quantités de précipitations reçues en une année, ce qui est la cause du très important déficit en eau. [38].

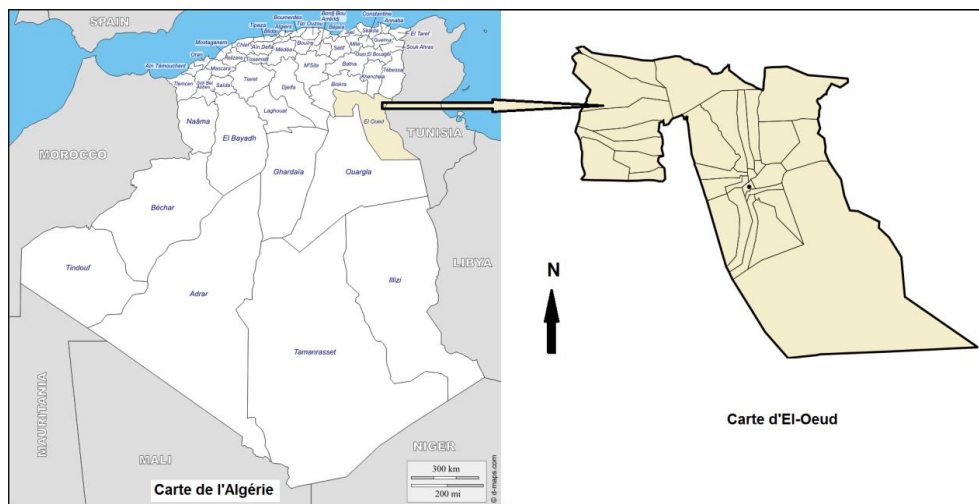


Figure (I.9) : Situation géographique de la wilaya d'El Oued Souf

I.7.2. Station météorologique de référence

La station climatique (ONM) l'Office National Météorologique est située dans la Daïra de Guemar au Nord de la ville d'El Oued.

Tableau (I.4) : Caractéristiques géographiques de station climatique.

Station	Code A.N.R.H	Altitude (m)	Longitude	Latitude
Guemar	13 04 09	64	06°47'E	33°30'N

(ONM : 2017) [86].

I.8. Paramètres climatologiques El-Oued

I.8.1. Température

La région d'El-oued est distinguée par une température moyenne autour de 27.18°C.

Les températures sont très élevées en été, entre 37.82°C et 37.63°C, aux mois de Juillet et Août respectivement.

Les températures sont abaisses en hiver, entre 15.07°C et 15.76°C, aux mois de Janvier et Février respectivement.

Tableau (I.5) : représente les températures moyennes mensuelles en (°C) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	T _{moy}
T(°C)	33.87	28.71	21.79	15.76	15.07	17.87	22.46	27	31.98	36.2	37.82	37.63	27.18

Les données représentées dans le tableau (I.5) nous permettent d'établir une représentation graphique de la température sous forme de bâtons suivante.

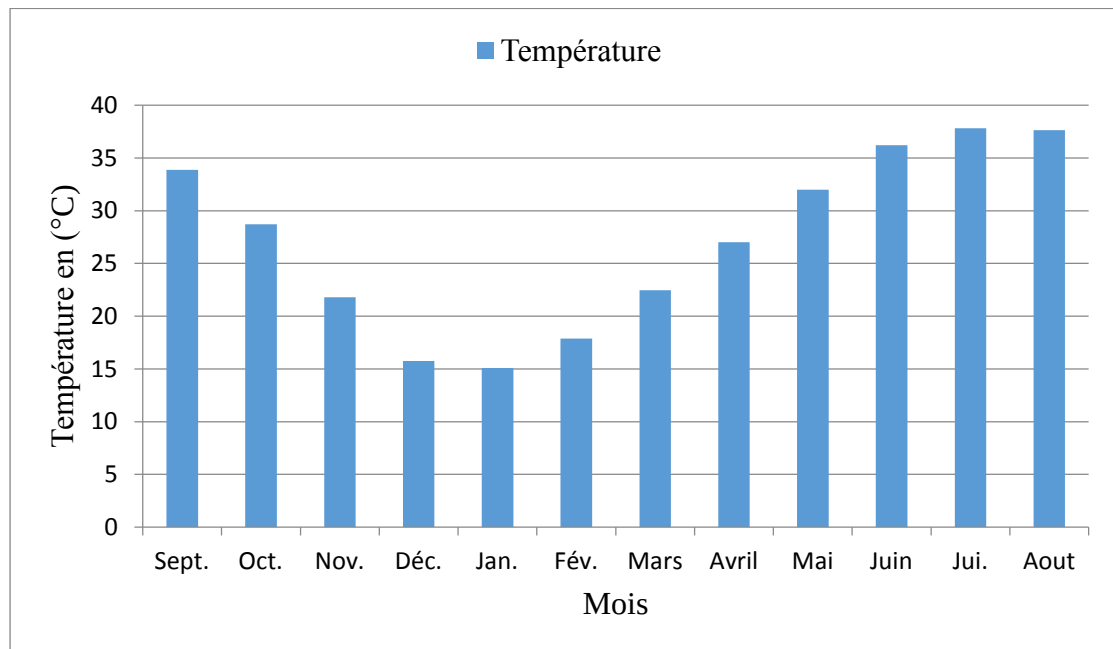


Figure (I.10) : montre les températures moyennes mensuelles en (°C) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).

I.8.2. Pluviométrie (précipitation)

La précipitation est généralement très rare et irrégulière, leurs répartitions moyennes annuelles sont de l'ordre de 71.2 mm/an, le mois le plus pluvieux est Janvier avec 17.6 mm, les mois de Juin et de Juillet sont les moins les plus sèches avec 1.4 mm à 0.3 mm.

Tableau (I.6) : représente les précipitations moyennes mensuelles en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	P _{moy}
P(mm)	6.3	6.7	7.5	7.3	17.6	2.5	7.5	7.5	4.8	1.4	0.3	1.8	71.2

Les données représentées dans le tableau (I.6) nous permettent d'établir une représentation graphique de précipitation d'insolation sous forme de bâtons suivante.

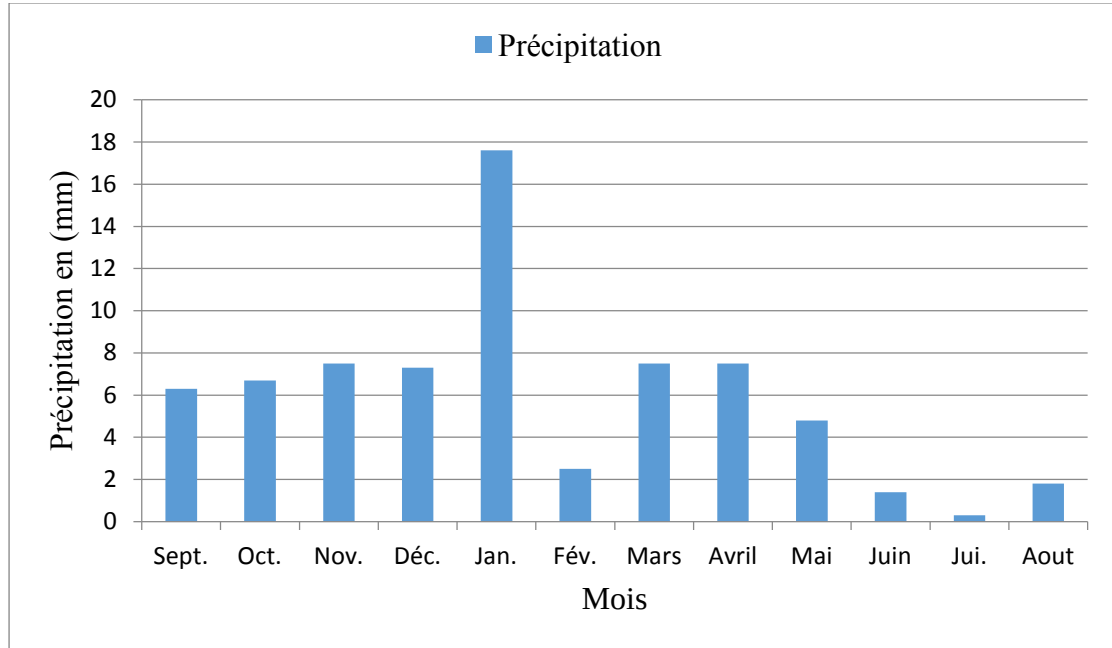


Figure (I.11) : montre les précipitations moyennes mensuelles en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2014).

I.8.3. Humidité

L'humidité relative de l'air correspond à la quantité de vapeur d'eau dans l'air par rapport à la capacité maximale que ce dernier peut en contenir. L'humidité relative de l'air s'exprime en pourcentage (%) et dépend de la température et de la pression.

L'humidité est très faible au cours de l'année, elle est en moyenne de 48.19%.

Les mois les plus humides sont de décembre et de janvier.

Les mois les plus secs sont de juin et de juillet avec 34.23% et 32%.

Tableau (I.7) : représente l'humidité moyenne mensuelle en (%) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	H _{moy}
H (%)	45.45	53.54	60.53	66.5	64.4	55.9	48.87	43.3	38.8	34.23	32	34.8	48.19

Les données représentées dans le tableau (I.7) nous permettent d'établir une représentation graphique de l'humidité sous forme de bâtons suivante.

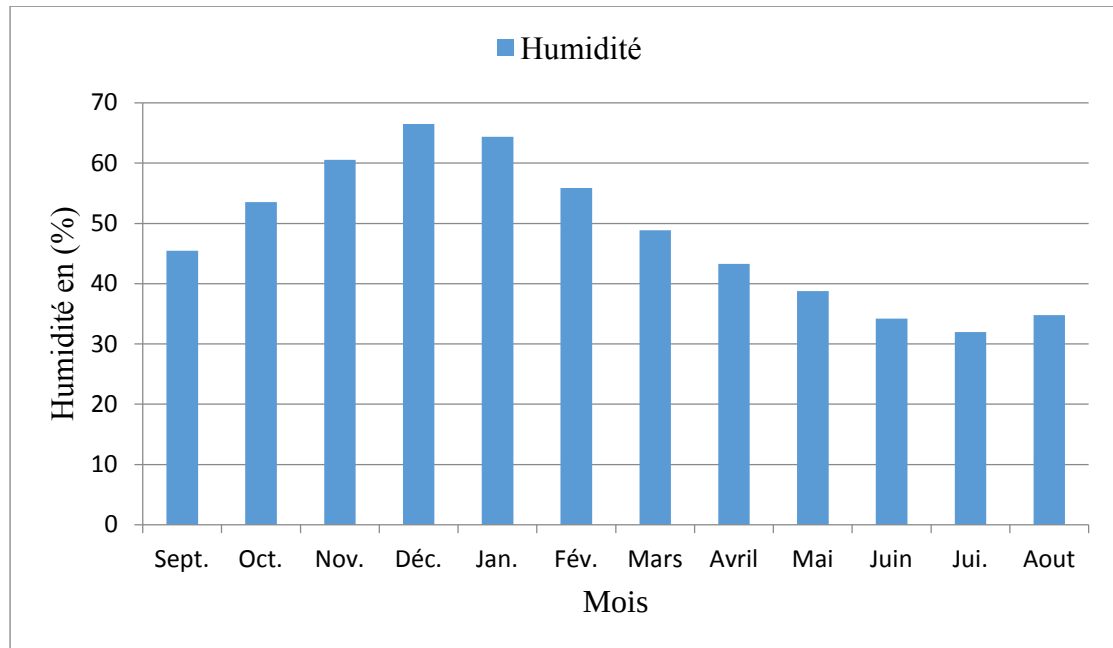


Figure (I.12) : montre l'humidité relative moyenne mensuelle en (%) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

I.8.4. Vent

Dans notre zone d'étude, les vents qui sont dominants sont de directions Est, Nord-est, Ouest-Est et Sud-ouest, dont le sirocco qui est distingué par des températures très élevées.

En générale les vents le plus actifs sont au printemps (pollinisations des plants), Ils sont chargés par les sables, leur vitesse plus de 30 km/h.

Les vents chauds et secs provoquent un abaissement simultané de l'humidité atmosphérique et une augmentation brutale de la température ce qui indique une augmentation de l'évaporation.

Tableau (I.8) : représente les vitesses moyennes mensuelles du vent en (Km/h) de l'ONM d' El-Oued durant la période (1985-2009).

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	V _{moy}
V(Km/h)	3.21	2.31	2.16	2.33	2.18	2.73	3.38	4.15	4.27	4.06	3.6	3.12	3.12

Les données représentées dans le tableau (I.8) nous permettent d'établir une représentation graphique du vent sous forme de bâtons suivante.

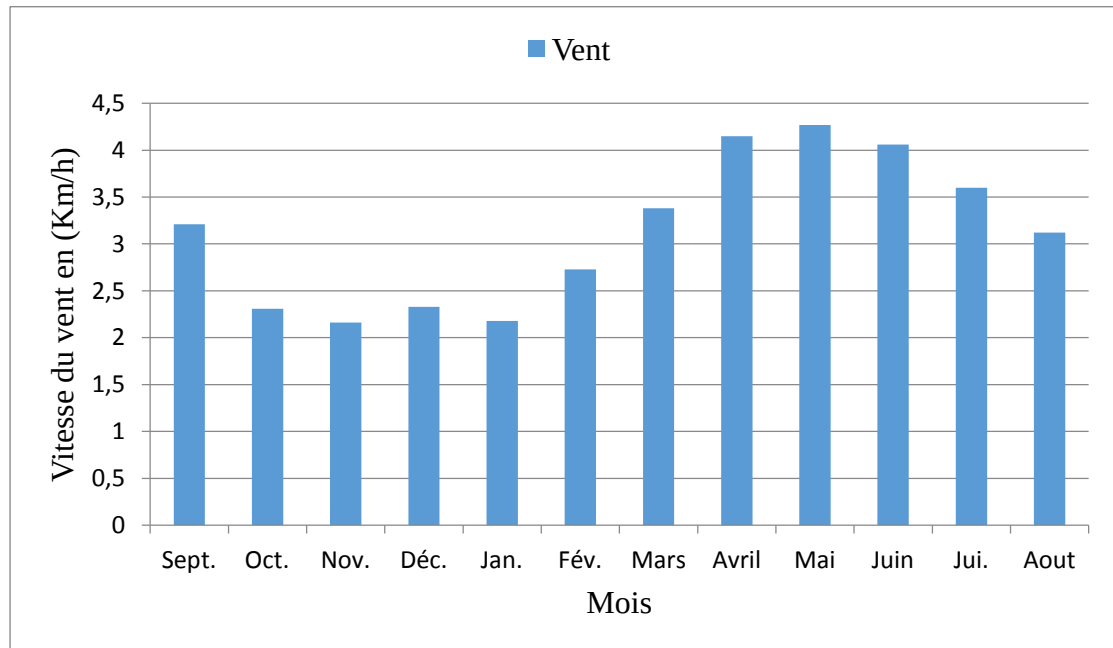


Figure (I.13) : montre les vitesses moyennes mensuelles du vent en (Km/h) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

I.8.5. Ensoleillement (Insolation)

L'irradiation est appelée aussi l'insolation est la quantité de lumière solaire reçue en un lieu ou une chose. Il est mesuré par nombre d'heures par an à l'aide d'héliographes. La région d'El Oued est caractérisée par une quantité importante de la lumière solaire à cause de faibles nébulosités.

Tableau (I.9) : représente les distributions moyennes mensuelles de la durée d'ensoleillement en (heure) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Jui.	Aout	I _{moy}
I (h)	275	261.2	237	225	237.9	247.9	281.5	284	312	341.2	352	329	281.97

Les données représentées dans le tableau (I.9) nous permettent d'établir une représentation graphique de l'insolation sous forme de bâtons suivante.

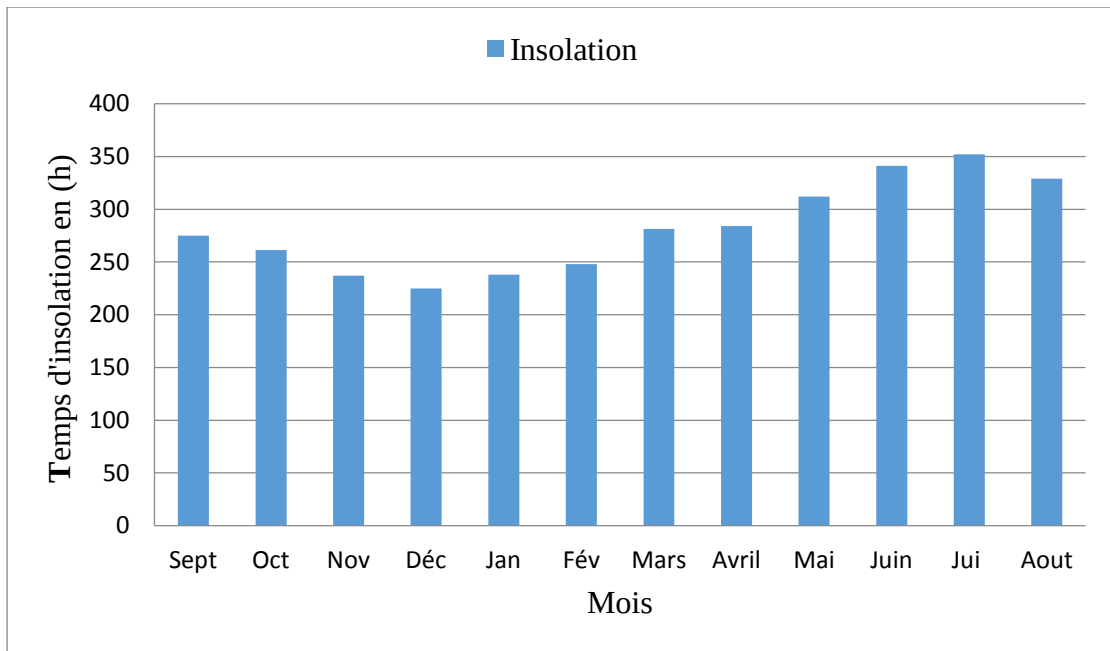


Figure (I.14) : montre les distributions moyennes mensuelles de la durée d'ensoleillement en (h) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

La distribution moyennes mensuelles d'irradiation nous permet de constater que l'irradiation solaire moyenne est maximale au mois de juillet avec 352 heures et minimale en décembre avec 225 heures.

La durée d'ensoleillement est de moyen annuelle de 3383.7 h/an ce qui causée par une évaporation très élevée.

I.8.6. Evaporation

L'évaporation se produit lorsque l'eau liquide se transforme en vapeur d'eau. Il est plus rapide surtout en existant les vents chauds et les températures plus élevées.

Dans notre zone d'étude, l'évaporation moyenne annuelle atteint 2146 mm/an, la moyenne mensuelle maximale est de 309 mm au mois de Juillet, et la moyenne mensuelle minimale est de 73 mm en décembre.

Tableau (I.10) : représente l'évaporation moyenne mensuelle en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Jui	Aout	E _{moy}
E (mm)	198	148	99	73	76	101	148	196	248	276	309	274	2146

Les données représentées dans le tableau (I.10) nous permettent d'établir une représentation graphique d'évaporation sous forme de bâtons suivante.

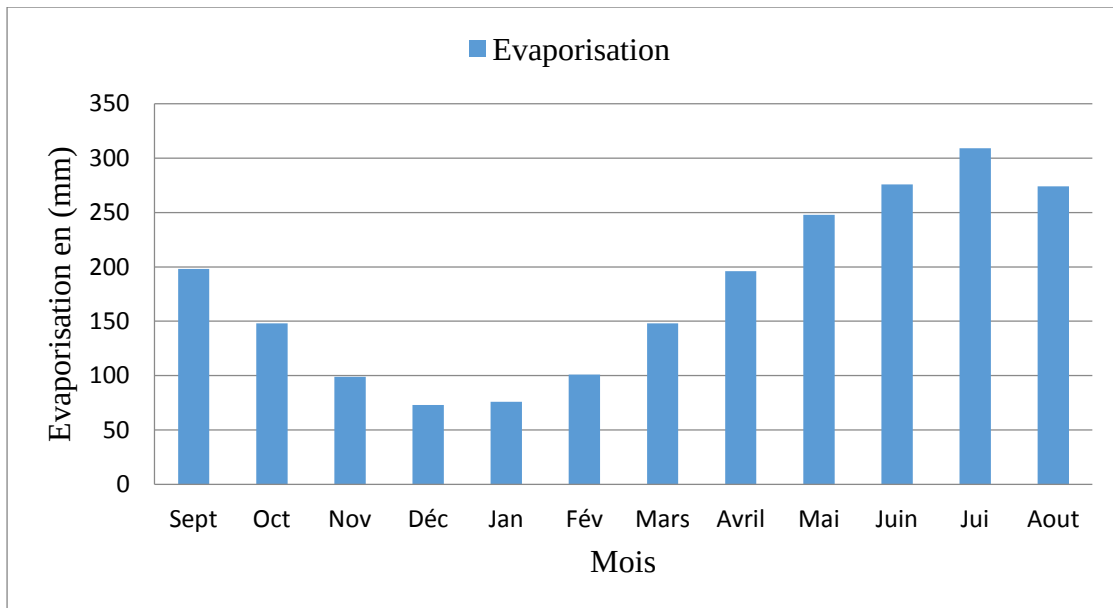


Figure (I.15) : montre la variation de l'évaporation moyenne mensuelle en (mm) de l'ONM d'El-Oued durant la période (1985-2009).

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude approfondie sur l'énergie solaire et leur importance, nous avons montrés que l'utilisation de l'énergie solaire est divisée en plusieurs sujets, y compris leur utilisation dans le domaine de la production d'énergie thermique et le chauffage de l'eau et les chauffages des bâtiments ainsi que leur utilisation dans la production d'électricité. Ensuite nous avons montré que la connaissance de la quantité du rayonnement solaire incident dans un endroit est parmi les plus importants facteurs pour traiter un système énergétique solaire [39]. De plus nous avons cité quelques notions et informations sur le gisement solaire du monde et de l'Algérie, à la fin nous avons fait une étude sur les paramètres climatologiques de la région d'El-Oued.

La synthèse des données climatiques nous permet de dire que le climat de la wilaya d'El-oued se caractérise par une intense sécheresse avec un taux d'humidité très faible. La température moyenne annuelle est de l'ordre de 25 C°, avec des étés chaud et hivers rigoureux. les températures extrêmes sont de plus de 50 C° en été. la précipitation est généralement très rare et irrégulière, de l'ordre de 71.2 mm/an. le rayonnement solaire est excessif (le moyen annuel est de 3383,7 h/an) ce qui traduit par un pouvoir évaporant élevé, bénéficiant d'une situation climatique très favorable à l'application des techniques solaires comme des applications de chauffage en utilisant les capteurs solaires plans.

Chapitre II

Etude théorique du capteur solaire plan

II.1. Introduction

Le capteur solaire est un dispositif de captation de l'énergie solaire destiné généralement à chauffer un fluide, ou à fournir partiellement ou totalement de l'Eau Chaude Sanitaire (ECS). Ce type de chauffage permet habituellement de compléter les types de chauffage exploitant d'autres sources énergétiques (électricité, énergies fossiles, biomasse,...). Dans certaines conditions il permet de les remplacer totalement. L'énergie solaire étant parfaitement renouvelable, ce remplacement permet de limiter efficacement les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires, raison pour laquelle l'installation de tels dispositifs est fortement encouragée par de nombreux États et collectivités via la fiscalité, des primes et/ou une obligation d'installation sur les nouvelles constructions. Le capteur solaire est composé d'une surface absorbante aux rayonnements à travers laquelle un fluide circule absorbant cette énergie. De nombreux types de capteurs existent, des revêtements sélectifs sont appliqués sur leurs surfaces absorbantes pour en augmenter l'efficacité. Il existe différents types de capteurs solaires pour chauffer les fluides, leur choix dépend de la température désirée, du fluide chauffé, et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. [40, 6]

II.2. Capteur solaire

Le capteur solaire plan 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 : les effets de serre et du corps noir.

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

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

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil. [41, 10]

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [42, 43, 10].

II.3. Principe de fonctionnement des capteurs solaires

Le principe de fonctionnement du capteur repose sur deux effets très connus :

- ✓ **Absorptivité du corps noir (absorbeur).**
- ✓ **Effet de serre.**

Le soleil est assimilé à un corps noir qui rayonne à température $T=5800\text{ °K}$. Le spectre du rayonnement solaire se situe dans la gamme (0.25 à $3\mu\text{m}$). Le rayonnement incident arrive sur la plaque en verre sous un certain angle « i », appelé angle d'incidence. Une partie est réfléchiée par la vitre, l'autre est transmise vers l'absorbeur.

L'absorbeur porté à une certaine température T_{pm} par le rayonnement solaire et celui provenant de la terre, rayonne à son tour dans l'infrarouge. Et comme le verre est opaque aux grandes longueurs d'ondes (infrarouges), la chaleur se trouve piégée entre la vitre et l'absorbeur, c'est « l'effet de serre ». Le fluide caloporteur (air) en circulation absorbe la chaleur par contact air-absorbeur (conduction) ou par convection et la transporte vers l'extérieur. C'est la production d'air chaud en sortie. Le fonctionnement du capteur bien que simple en apparence est dépendant d'un grand nombre de paramètres sur lesquels il faut jouer pour améliorer le rendement du capteur :

a) Régime d'écoulement de l'air

Que ce soit en convection naturelle ou forcée, il existe deux types d'écoulement de l'air : laminaire ou turbulent. Et ceci a une influence directe sur le taux du transfert de chaleur par convection ainsi que la température de l'air chaud en sortie et par conséquent sur le rendement du capteur solaire car il est connu que le régime turbulent favorise le transfert par convection.

b) L'Orientaion du capteur

La position du soleil dans le ciel étant variable dans la journée et au cours de l'année, l'énergie interceptée par le capteur n'est plus constante, il importe donc de trouver la meilleure orientation du capteur afin de recevoir le maximum de l'énergie solaire. C'est pour cette raison que les capteurs solaires sont orientés plein sud afin

d'absorber le maximum d'énergie solaire.

c) Inclinaison du capteur

L'énergie solaire interceptée par le capteur est maximale lorsque l'angle d'incidence du rayon solaire par rapport à la normale au plan de la surface réceptrice est nul (le rayon est perpendiculaire au plan). Mais comme nous l'avons cité plus haut, le soleil change d'orientation au cours de la journée et dans l'année, et une étude d'optimisation de l'inclinaison du capteur s'impose. Il existe cependant une règle empirique selon laquelle un capteur doit être orienté plein sud et incliné d'un angle égal à la latitude du lieu. [44, 45]

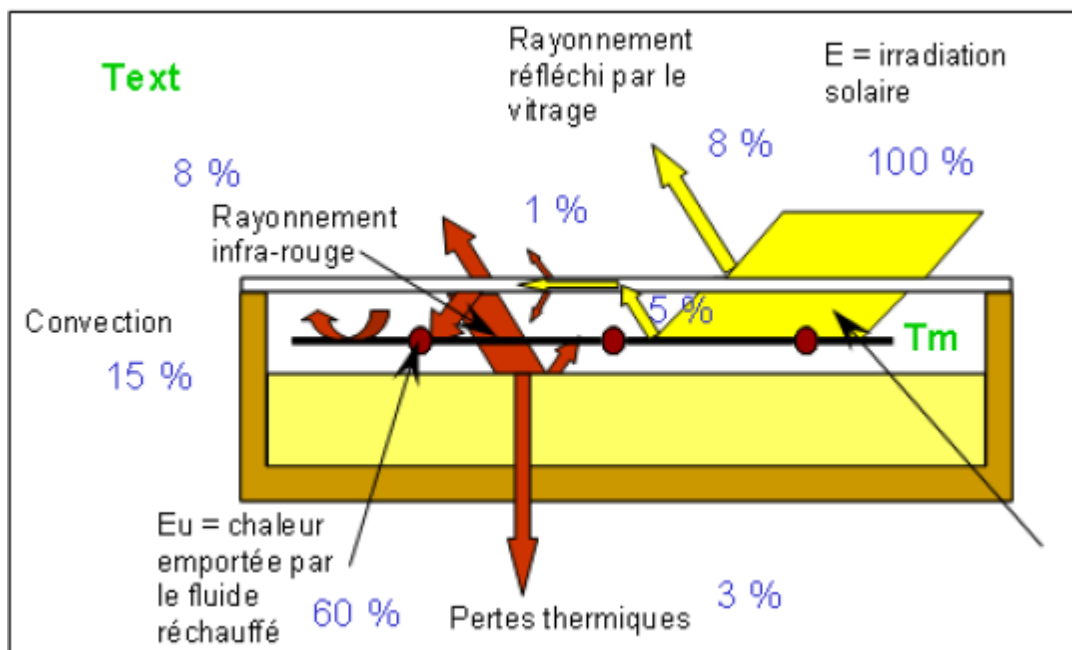


Figure (II.1) : Principe de fonctionnement de capteur solaire plan vitré [46].

II.4. Différents types des capteurs solaires

Il existe deux principaux types de capteurs solaires, à savoir : les capteurs plans et les capteurs par concentration (concentrateurs solaires) [6].

II.4.1. Capteur solaire à concentration

Les capteurs plans ne peuvent généralement pas porter les fluides caloporteurs à très haute température. En revanche, il est possible d'utiliser des capteurs par concentration, mais ils sont plus complexes et plus onéreux. Il s'agit de réflecteurs en demi-cylindre qui renvoient et concentrent l'énergie solaire sur un tuyau métallique en

serpentin où circule un fluide caloporteur. Cette concentration entraîne une augmentation de l'intensité du rayonnement, et les températures obtenues sur le récepteur (appelé cible) peuvent atteindre plusieurs centaines de degrés Celsius. Pour être efficaces, les concentrateurs doivent se déplacer pour suivre la course apparente du Soleil.

De telles installations servent notamment en Arabie saoudite, pour la désalinisation de l'eau de mer par le procédé d'évaporation. [6]

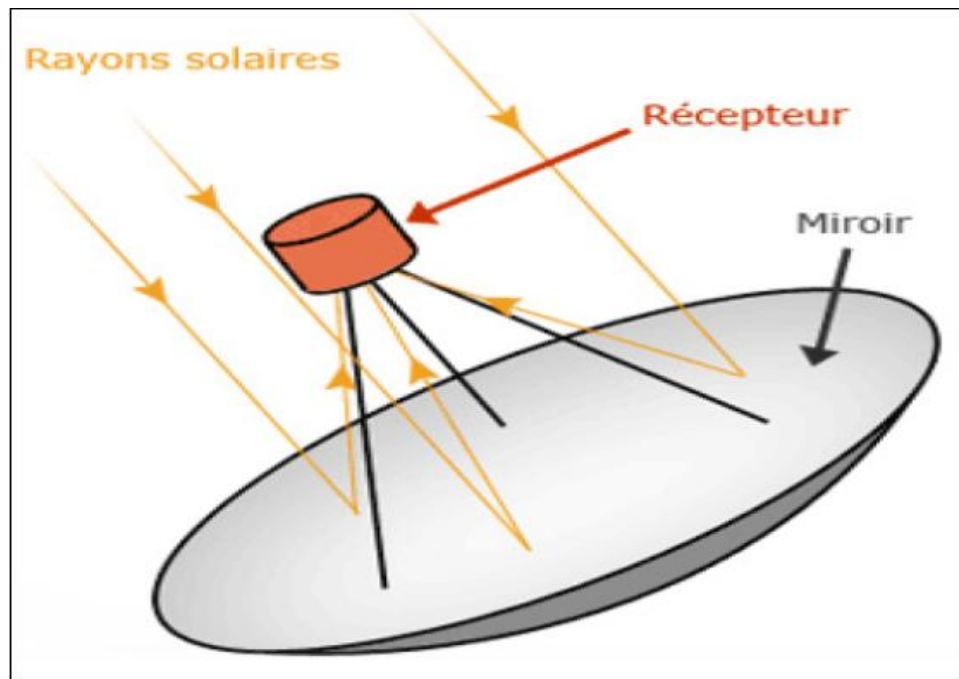


Figure (II.2) : Capteur solaire à concentration [47,48].

II.4.2. Capteurs solaires plans

Les capteurs plans absorbent le rayonnement solaire au moyen d'une plaque peinte en noir et munie de fines conduites destinées au fluide caloporteur. Lorsqu'il traverse les conduites, sa température (liquide ou air) augmente en raison du transfert de chaleur reçue par la plaque absorbante.

L'énergie transmise au fluide caloporteur influe sur directement sur le rendement instantané du capteur.

Comme une serre, les capteurs plans sont munis d'un vitrage transparent, qui piège l'énergie calorifique s'échappant de la plaque absorbante.

Les capteurs fixes à usage domestique sont généralement installés sur le toit des habitations. L'efficacité des capteurs dépend de l'angle qu'ils forment avec le plan horizontal. Leur inclinaison optimale varie selon la latitude de l'installation. Le fluide utilisé dans le système de chauffage solaire est l'air ou un liquide (eau ou mélange eau-antigel) ; le stockage thermique s'effectue généralement dans un accumulateur à pierre ou un réservoir d'eau bien isolé. [6]

II.5. Classification des capteurs solaires plans

II.5.1. Capteurs solaires thermiques à eau

Dans les capteurs thermiques à eau, le fluide circule dans des tubes munis d'ailettes. Pour obtenir un meilleur rendement, l'ensemble est placé dans une boîte vitrée isolante afin d'obtenir un effet de serre [49]. Ces capteurs sont utilisés dans les systèmes de chauffage de l'eau le dans l'industrie ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire. [48]

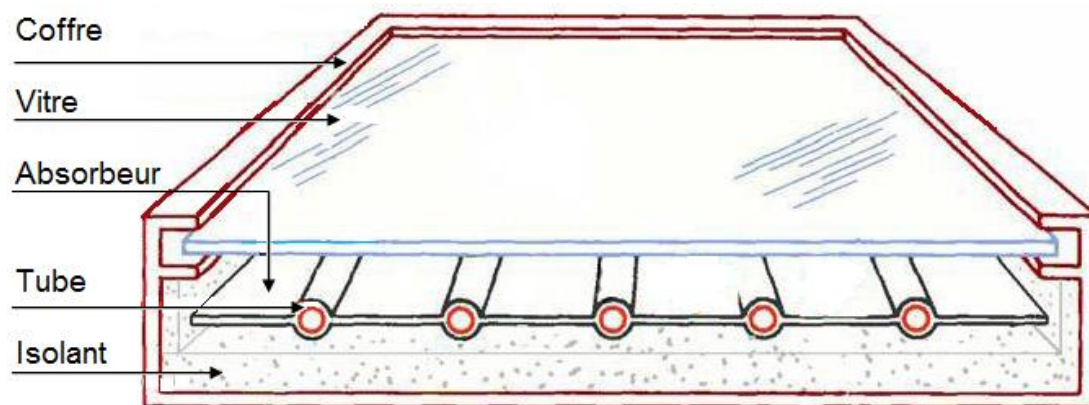


Figure (II.3) : Schéma d'un capteur solaire plan à eau

II.5.2. Capteurs solaires thermiques à air

Les capteurs solaires plans à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans les différentes applications solaires, comme par exemple le séchage des grains ou du bois, le conditionnement de l'air, ainsi que dans la ventilation mécanique contrôlée [49, 48].

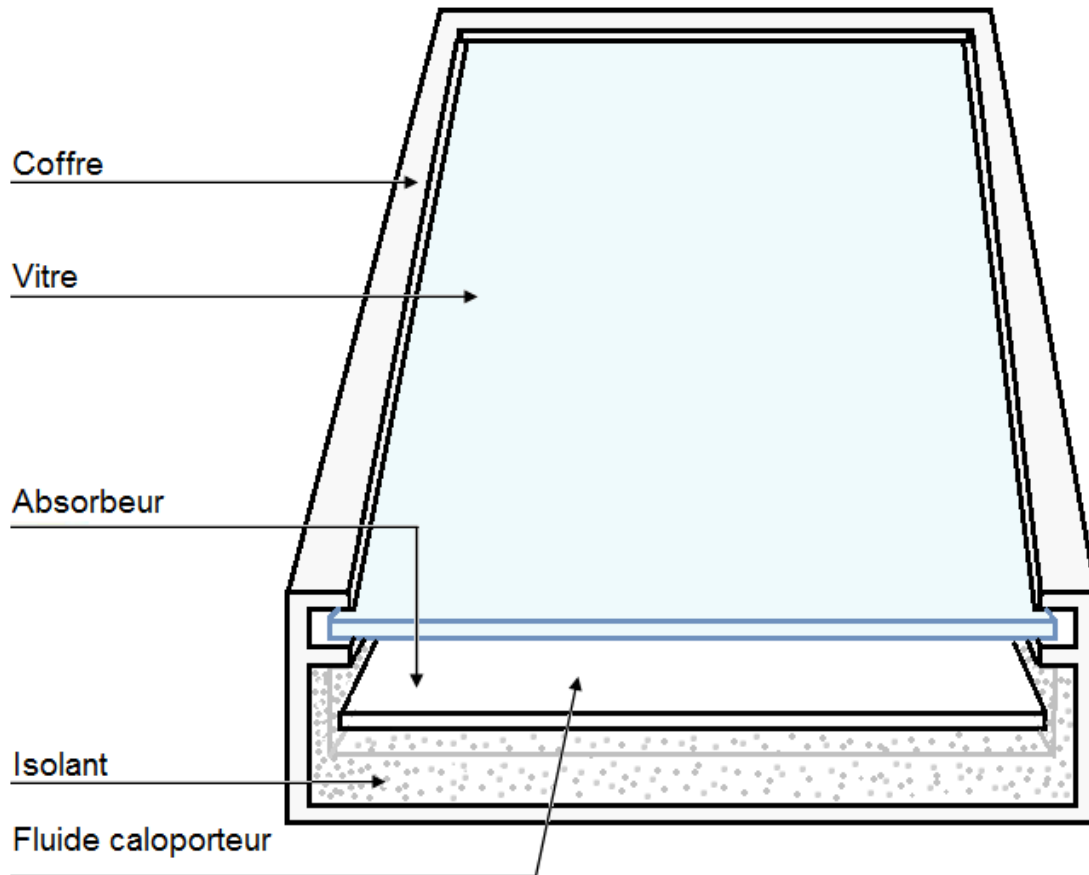


Figure (II.4) : Schéma d'un capteur solaire plan à air

II.6. Principaux composants des capteurs solaires plans

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre.

II.6.1. Absorbeur

C'est une plaque métallique mince recouverte d'une couche de peinture noire, cette plaque est de grande surface puisque la quantité de chaleur lui est proportionnelle. L'absorbeur constitue la partie essentielle du capteur, son pouvoir absorbant doit être maximal c'est-à-dire aussi voisin que possible de ce lui du corps noir théorique.

On peut l'améliorer en le rendement (sélectivité), c'est-à-dire les rendre non seulement très absorbants pour les longueurs d'onde du spectre solaire (0.25μ à 2.5μ) mais très faiblement émissifs pour les rayonnements thermiques de grandes longueurs d'ondes. Pour diminuer les pertes de chaleur par rayonnement, ces absorbeurs

sélectifs s'obtiennent en déposant sur un bas métallique plusieurs couches minces de métaux. Les métaux utilisés pour l'absorbeur sont :

- ✓ L'acier : est employé car il se soude facilement mais s'oxyde en présence d'air.
- ✓ Le cuivre offre beaucoup d'avantage puisque son oxydation n'est pas un défaut car elle produit naturellement une surface sélective mais son prix est nettement élevé.
- ✓ Certains alliages d'aluminium qui présentent une certaine légèreté à l'absorbeur, et une bonne transmission thermique. [6]

II.6.2. Fluide caloporteur

Le rôle principal de fluide est de transporter la chaleur, entre l'absorbeur et l'endroit de l'utilisation ou de stockage. Parmi les fluides caloporteurs les plus utilisés, l'air et l'eau. [6]

II.6.2.1. Eau

L'eau est économique mais elle risque de geler pendant l'hiver à moins de la chauffer légèrement en prélevant un peu d'eau tiède sur le circuit traditionnelle. L'eau additionnée d'un antigel semble résoudre ce problème. D'autre côté à des hautes températures, la phase vapeur apparaît par l'ébullition, ce phénomène peut être maîtrisé par le moyen de la mise en pression du système. L'eau calcaire a aussi l'inconvénient de déposer du tartre dans les canalisations [6].

II.6.2.2. Air

L'air est caractérisé par un avantage, abondant et gratuit, et à faible capacité calorifique. Il nécessite d'utiliser 3000 litres d'air pour véhiculer autant d'énergie qu'un litre d'eau. L'air présente un autre avantage par rapport à l'eau, c'est l'absence des problèmes de gel et de corrosion [6].

II.6.3. Couverture transparente

La couverture doit laisser traverser le maximum de flux solaire, c'est-à-dire transparente à la lumière mais pas conductrice de la chaleur émise par l'absorbeur (une tôle en cuivre est dite transparente à la chaleur car ce métal est très bon conducteur thermique).

La différence de température entre les deux faces de la couverture verrière doit être très petite.

Le verre (et à un moindre degré le plastique) est transparent vis-à-vis des rayonnements visibles et ultraviolets (là où se situe le maximum d'énergie du rayonnement solaire) ce rayonnement chauffe l'appareil qui rayonne à son tour en infrarouge ; mais le rayonnement infrarouge émis par l'absorbeur reste prisonnier sous le vitrage. La vitre elle-même chauffée par le soleil, rayonne en infrarouge vers l'extérieur et vers l'intérieur, cette émission infrarouge s'ajoute au rayonnement solaire pour chauffer l'absorbeur. Le double vitrage est plus efficace pour l'effet de serre, mais l'inconvénient est la fragilité du verre vis-à-vis des chocs thermiques qui pourraient causer l'endommagement de la couverture. Les plastiques ne sont pas toujours totalement imperméables aux infrarouges leurs propriétés sont variables avec le temps [6].

II.6.4. Isolation

Le capteur devant recevoir le rayonnement solaire, il est nécessaire de signaler qu'en contact avec le milieu extérieur, les conditions de température et de climat risquent de perturber considérablement son bon fonctionnement. Les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur sont primordiales si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale, mais il faut veiller à leur tenue à la température car une coupure de circulation peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150°C en été.

Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 150 °C) [6].

II.6.5. Coffre

Le coffre doit être rigide, étanche, pour supporter l'absorbeur et la couverture. Le coffre est généralement incorporé dans une toiture de bâtiment où la corrosion sera faible ainsi que les pertes thermiques puisque la face arrière bénéficie de l'abri du toit et de la température qui règne dans le grenier (parfois supérieure à celle de l'entrée du fluide caloporteur). Le coffre n'est guère envisagé que pour des appareils modulaires utilisés dans les petites installations individuelles, où il renferme les différents éléments actifs [6].

II.7. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la forme, des dimensions, de la disposition du capteur et des conditions environnantes. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales [42, 19]:

II.7.1. Paramètres externes

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont:

- ✓ Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- ✓ Température ambiante.
- ✓ Vitesse du vent.

II.7.2. Paramètres internes

- **Paramètres géométriques**
 - ✓ Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur.
 - ✓ La surface du capteur.
 - ✓ Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.
- **Paramètres de fonctionnement :**
 - ✓ Température de l'entrée de l'air.
 - ✓ Débit massique de l'air.
 - ✓ Températures de différents éléments du capteur.

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir la température de sortie du fluide élevée. D'autres termes ; un bon rendement de capteur [50, 51].

II.8. Transfert de chaleur dans un capteur solaire

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace

et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristique du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état final.

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [52].

Il existe trois modes de transfert thermique [53].

II.8.1. Conduction

Ce mode de transfert d'énergie se fait à l'échelle microscopique, dans les solides non métalliques, le transfert se fait par échange d'énergie de vibration entres les atomes du réseau cristallin. Dans les métaux, l'énergie thermique est aussi transportée par les électrons de conduction, ce qui rend le transfert plus efficace.

Ce phénomène obéit à la loi de Fourier établie mathématiquement par Jean-Baptiste Biot en 1804 puis expérimentalement par Fourier en 1822.

La densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température [54, 53].

$$Q_{cd} = -\lambda S \cdot \overrightarrow{grad}(T) \quad (II.1)$$

$$Q_{cd} = -\lambda S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (II.2)$$

Avec :

- ✓ Q_{cd} : Flux de chaleur par conduction (W).
- ✓ S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).
- ✓ λ : Conductivité thermique ($W/m^\circ C$).
- ✓ x : Variable d'espace dans la direction du flux (m) [52].

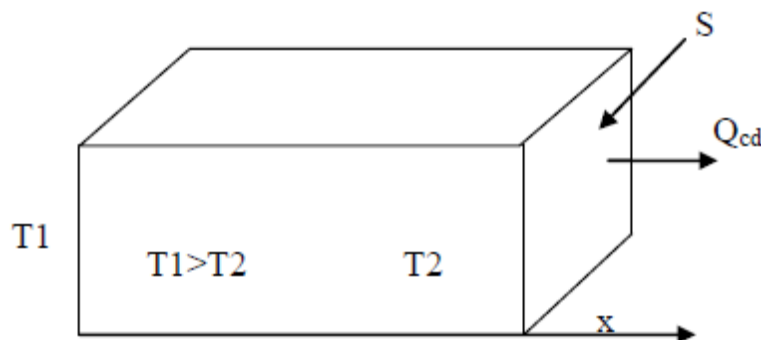


Figure (II.5) : Schéma du transfert de chaleur par conduction [52].

II.8.2. Convection

C'est le mode de transmission de la chaleur qui nécessite le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. On la trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide. En réalité, il s'agit d'une combinaison du phénomène de conduction avec celui de transfert de matière [55, 53].

On distingue deux types de convection :

- **Convection forcée :** le mouvement du fluide est dû à l'action d'un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.) [53].
- **Convection naturelle (ou libre) :** le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, elles-mêmes dues à des différences de température existante dans le fluide [56, 53].

On peut expliquer le phénomène global de la convection par la loi de Newton qui suit [53]:

$$Q_{cv} = h \times S \times (T_p - T_f) \quad (II.3)$$

- ✓ Q_{cv} : Flux de chaleur par convection (W).
- ✓ h : Coefficient de convection ($W.m^{-2}.K^{-1}$).
- ✓ S : Surface de la paroi solide en contact avec le fluide (m^2).
- ✓ T_p : Température de la paroi solide ($^{\circ}C$).
- ✓ T_f : Température du fluide ($^{\circ}C$) [52].

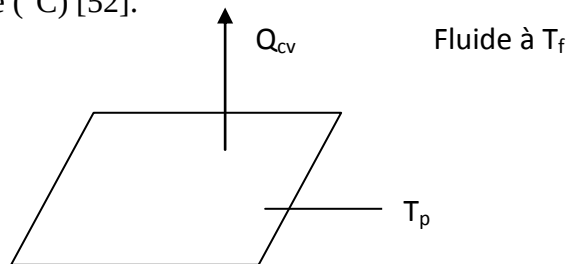


Figure (II.6) : Schéma du transfert de chaleur par convection [52].

- **Calcule le coefficient d'échange par convection**

- **En convection forcée :**

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange h_c par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

- ✓ U_m : Vitesse moyenne du fluide (m/s).

- ✓ ρ : Masse volumique du fluide (kg/m^3).
- ✓ C_p : Chaleur spécifique du fluide ($\text{J/kg.}^\circ\text{C}$).
- ✓ μ : Viscosité thermique du fluide (kg/ms).
- ✓ λ : Conductivité thermique du fluide ($\text{W/m}^2.^\circ\text{C}$).
- ✓ D : Dimension caractéristique de la surface d'échange (m).

A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$Nu = hc \frac{D}{\lambda} \quad (\text{II.4})$$

$$Re = \frac{\rho \times U_m \times D}{\mu} \quad (\text{II.5})$$

$$Pr = \frac{\mu \times C_p}{\rho} \quad (\text{II.6})$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques

$Nu = f(Re, Pr)$ qui permettent de calculer hc par :

$$h = Nu \frac{\lambda}{D} \quad (\text{II.7})$$

- ✓ Re : Nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide [52].
- ✓ Pr : Nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.
- ✓ Nu : Nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

- **En convection naturelle :**

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est dû aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est fonction de sa température.

La convection forcée est négligeable si:

$$Gr/Pr^2 > 100$$

$$Nu = C (Gr Pr)^n$$

Convection laminaire $Gr Pr < 109 \Rightarrow n=1/4$

Convection turbulente $Gr Pr > 109 \Rightarrow n=1/3$ [52].

II.8.3. 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 [57, 10]:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma S (T_p^4 - T_f^4) \quad (II.8)$$

- ✓ Q_r : Densité de flux de chaleur émis par le corps (W/m^2).
- ✓ ε : Emissivité thermique du matériau.
- ✓ σ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \times 10^{-8}$ ($W/m^2 K^4$)
- ✓ T_p : Température de la paroi solide ($^{\circ}C$).
- ✓ T_f : Température du fluide ($^{\circ}C$).
- ✓ S : Aire de la surface (m^2) [52].

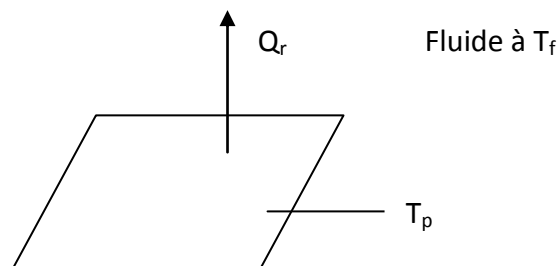


Figure (II.7) : Schéma du transfert de chaleur radiatif [52].

II.9. Pertes thermiques dans le capteur solaire

Les trois modes du transfert de chaleur peuvent avoir intervenir à cause des pertes thermiques au niveau de capteur solaire [58].

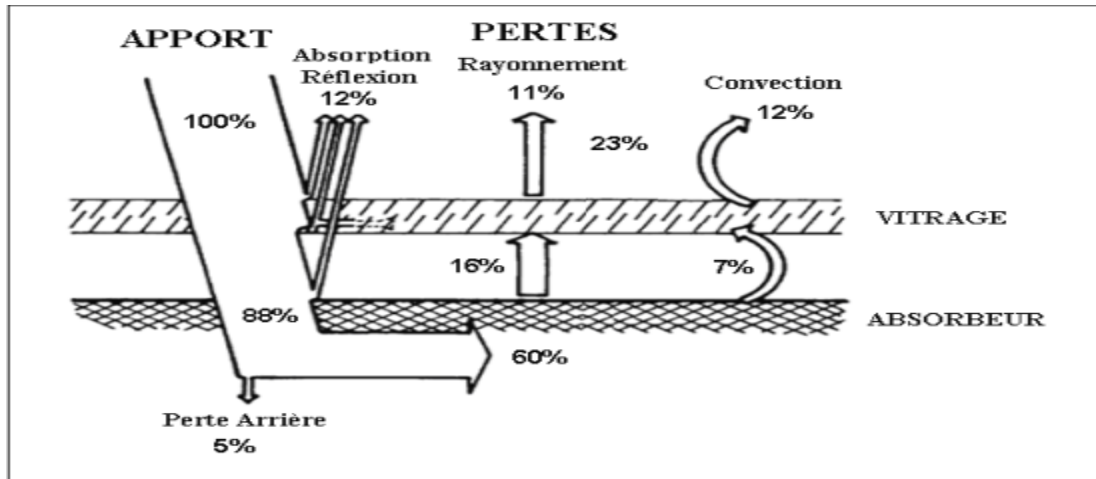


Figure (II.8) : Bilan thermique d'un capteur solaire plan vitré [59].

II.9.1. Pertes par convection

Ce mode de transfert intervient généralement entre la couverture et le milieu extérieur, l'absorbeur et la lame d'air, la lame d'air et la couverture [60]. le coefficient de pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, sa température, et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, alors qu'il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre. Les obstacles soudés à l'absorbeur peuvent réduire les pertes par l'avant en diminuant la température de l'absorbeur, comme a été montrée [61].

Autre personne a trouvé dans son travail expérimental que l'effet de la perte au niveau de la tuyauterie sur l'efficacité du capteur est faible dans les périodes de midi et grande dans les périodes du matin et après midi [62, 58].

II.9.2. Pertes par conduction

Les pertes par conduction peuvent avoir lieu entre l'absorbeur et la vitre lorsque ces derniers se trouvent sur une très faible distance, comme elles existent au niveau de l'isolation de la partie arrière et latérale du capteur [58].

II.9.3. Pertes par rayonnement

Les matériaux utilisés comme couvertures laissent passer le rayonnement solaire incident mais ils sont opaques au rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100 °C (c'est l'effet de serre), la face interne de la couverture absorbe ce rayonnement infrarouge, puis elle subit une augmentation de

température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur et moitié vers l'absorbeur. Donc, les pertes par rayonnement sont diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs couvertures [58].

II.10. Rendement d'un capteur solaire plan

II.10.1. Bilan énergétique

On va établir les bilans énergétiques globaux d'un capteur solaire thermique (plan) pour ces principaux composants :

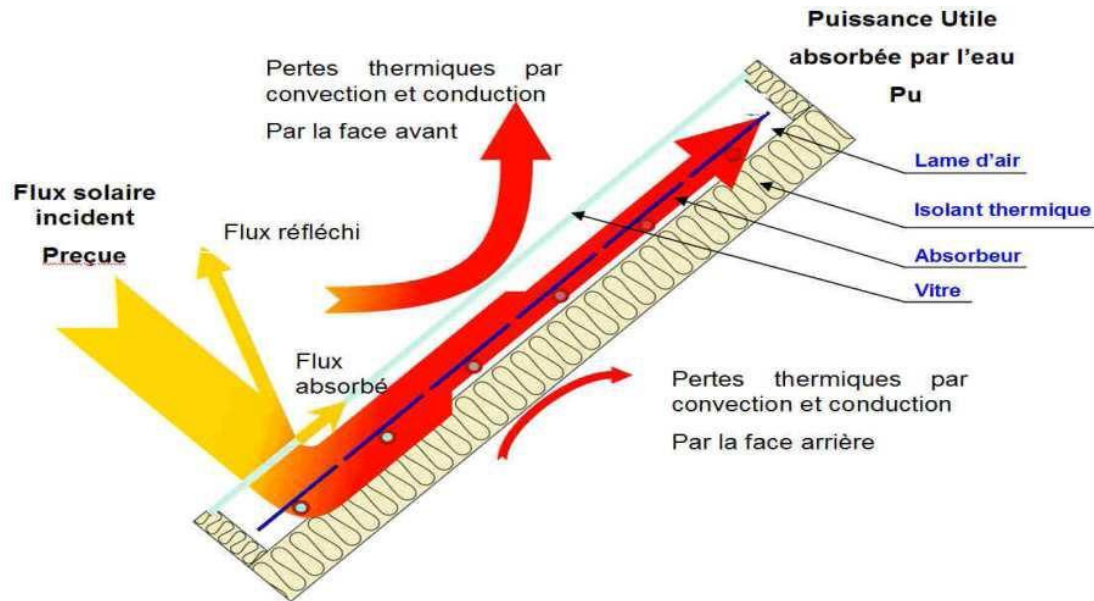


Figure (II.9) : Les différents échanges thermiques dans un capteur solaire plan [63].

A.1. La vitre reçoit :

La puissance P_v rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre

$$P_v = \alpha_v \times G \times A_v \quad (\text{II.9})$$

Où :

- ✓ α_v : Absorptivité de la vitre.
- ✓ A_v : Surface de la vitre (m^2).
- ✓ G : Rayonnement global incident (W/m^2).

Une quantité d'énergie q_{rav} cédée par l'absorbeur par rayonnement :

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{II.10})$$

Une quantité d'énergie q_{cva} cédée par l'absorbeur par convection :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.11)$$

A.2. La vitre cède :

Une quantité d'énergie par convection q_{cva} vers le milieu ambiant :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ve} - T_a) \quad (II.12)$$

Une quantité d'énergie par rayonnement q_{rvc} vers le ciel :

$$q_{rvc} = h_{rvc} \times A_v \times (T_{ve} - T_a) \quad (II.13)$$

B.1. L'absorbeur reçoit :

Une puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur, donnée par l'équation suivante :

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \times \tau_v \times G \times A_{ab} \quad (II.14)$$

Où :

- ✓ α_{ab} : Absorptivité de l'absorbeur.
- ✓ τ_v : Transmissivité de la vitre.
- ✓ A_{ab} : Surface de l'absorbeur (m²).

B.2. L'absorbeur cède :

Une quantité d'énergie par convection au fluide caloporteur q_{caf} :

$$q_{caf} = h_{caf} \times A_{fa} \times (T_{ab} - T_f) \quad (II.15)$$

Une quantité d'énergie par convection q_{cav} à la vitre.

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.16)$$

Une quantité d'énergie par rayonnement q_{rav} à la vitre.

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (II.17)$$

Une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} à l'isolant.

$$q_{cdai} = \frac{(T_{ab} - T_{ii})}{\varphi_1} + \frac{(T_{ab} - T_{il})}{\varphi_2} \quad (II.18)$$

φ_1 et φ_2 : Résistances thermiques.

C.1. Le fluide reçoit :

Une quantité d'énergie par convection q_{caf} de l'absorbeur.

$$q_{caf} = h_{caf} \times A_{fa} \times (T_{ab} - T_f) \quad (II.19)$$

C.2. Le fluide cède :

Une quantité d'énergie par convection q_{cfi} à l'isolant :

$$q_{cfi} = h_{cfi} \times A_{fi} \times (T_f - T_{ii}) \quad (II.20)$$

D.1. L'isolant reçoit :

Une quantité d'énergie par convection q_{cfi} cédée par le fluide caloporteur.

$$q_{cfi} = h_{cfi} \times A_{fi} \times (T_f - T_{ii}) \quad (II.21)$$

Une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} cédée par l'absorbeur.

$$q_{cdai} = \frac{(T_{ab} - T_{ii})}{\varphi_1} + \frac{(T_{ab} - T_{il})}{\varphi_2} \quad (II.22)$$

D.2. L'isolant cède :

Une quantité d'énergie par rayonnement q_{ris} au sol :

$$q_{ris} = h_{ris} \times A_i \times (T_{ie} - T_s) \quad (II.23)$$

Une quantité d'énergie par convection q_{cia} au milieu ambiant :

$$q_{cia} = h_{cia} \times A_i \times (T_{ie} - T_a) \quad (II.24)$$

[64].

II.10.2. Rendement instantané

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur (P_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (P_{ab}).

Selon la référence [65], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané donné par la relation suivante :

$$\eta_i = (P_u / P_{ab}) = (P_u / A_c \times G) \quad (\text{II.25})$$

- ✓ P_{ab} : Puissance solaire arrivant sur le capteur (W).
- ✓ P_u : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W).
- ✓ A_c : Surface du capteur (m^2).
- ✓ G : Flux solaire global incident (W/m^2).

Le rendement instantané du capteur en fonction du débit massique est donné par [66]:

$$\eta_i = m \times c_p \times [(T_{fs} - T_{fe}) / A_c \times G] \quad (\text{II.26})$$

Avec

- ✓ m : Débit massique de fluide (kg/s).
- ✓ c_p : Chaleur spécifique de fluide ($\text{J}/\text{kg.k}$).
- ✓ T_{fs} : Température de sortie du fluide ($^{\circ}\text{C}$).
- ✓ T_{fe} : Température d'entrée du fluide ($^{\circ}\text{C}$).
- ✓ A_c : Surface du capteur solaire (m^2).
- ✓ G : Flux de chaleur global incident (W) [64].

II.10.3. Rendement journalier

C'est le rapport de la somme des énergies utiles prises au cours de la journée par la somme des ensoleillements correspondants :

$$\eta_i = (\sum P_u / A_c \times \sum G) \quad (\text{II.27})$$

[64].

II.11. Quelques études réalisées concernant l'amélioration de rendement d'un capteur solaire plan à air

Tableau (II.1) : Résumés des Articles concernant le capteur solaire

Dimension de capteur	Type d'écoulement	Paramètre utilisé	Résultat obtenu	Référence
-Longueur 1500 mm - Longueurs d'entrée et de sortie sont de 177 mm - Isolant d'une	-Régime transitoire. -Convection forcée.	- passage simple. - Chicanes en forme W. - Chicanes de longueur 87 mm.	-Des études ont montré que des chicanes orientées à 45° à 60° d'inclinaison par rapport à l'écoulement fonctionnent mieux que les côtes transversales -Les réchauffeurs d'air solaires rugueux fonctionnent mieux que	[67]

épaisseur de 25 mm -Absorbeur d'une épaisseur de 1 mm			les réchauffeurs lisses. -Le réchauffeur d'air solaire ayant des chicane en forme de W pointant vers l'aval a de meilleures performances que les chicanes en forme de W pointant vers l'amont du flux. -L'amélioration maximale du nombre de Stanton est de 2,39 pour les chicanes W vers le bas et de 2,21 pour les nervures W vers le haut respectivement sur une plaque lisse.	
-Longueur 240 cm -Largeur 120 cm	-Convection forcée.	- double passage. - milieu poreux.	-Le capteur solaire à double passage a une forte efficacité par rapport au capteur conventionnel à passage unique. -L'utilisation du milieu poreux dans le capteur solaire augmente son rendement. - L'ajout du milieu poreux dans le deuxième canal du capteur solaire à double passage augmente les performances du capteur.	[68]
- Longueur = 1000 mm -Largeur = 200 mm -Hauteur = 20 mm	-Régime transitoire. -Convection forcée.	différents types de géométrie des éléments de rugosité sur la plaque absorbante.	- Il y a une amélioration considérable de l'efficacité effective des réchauffeurs d'air solaires ayant un conduit rugueux muni de différents types d'éléments de rugosité. - Le réchauffeur d'air solaire ayant des nervures inclinées en tant qu'éléments de rugosité s'avère avoir une meilleure efficacité effective dans la plage supérieure du nombre de Reynolds.	[69]
pas de dimensions fixes	pas de types	- double-pass. -couvertures simples et doubles au-dessus de l'absorbeur.	-Performances du réchauffeur d'air à deux passages avec un seul couvercle s'avèrent les plus rentables, par rapport aux autres conceptions. -IL a conclu que les conceptions à deux passages sont plus performantes que les réchauffeurs d'air à passage unique. -Résultats expérimentaux ont montré que le modèle de flux inversé réduit l'efficacité du collecteur de 9 à 73 % dans la plage de température de 35 à 75 °C. -Ils ont conclu que les réchauffeurs d'air à passages multiples sont plus efficaces que leurs homologues à passage unique. -Etude a rapporté qu'un réchauffeur d'air à un seul passage avec un seul couvercle est plus rentable qu'un réchauffeur d'air à un seul passage	[70]

Chapitre II : Etude théorique du capteur solaire plan

			sans couvercle ou avec deux couvercles au-dessus de l'absorbeur. -De plus, pour la plage utile de débit d'air, c'est-à-dire jusqu'à $t_i = 400 \text{ m}^*$, l'aérotherme simple couverture double passage est le plus économique.	
Le conduit est de dimension 2600 mm x 150 mm x 30 mm (dimension de la section intérieure) et est construit à partir de panneaux de bois de 25 mm d'épaisseur. La section d'essai a une longueur de 1640 mm. Les longueurs d'entrée et de sortie étaient respectivement de 360 mm et 600 mm	-Régime transitoire. -Convection forcée.	-Nervures avec angle de 8, 10, 12 et 15° -Paroi rugueuse	- Par rapport au conduit lisse, la présence de nervures donne un nombre de Nusselt jusqu'à 2,4 fois tandis que le facteur de frottement augmente jusqu'à 5,3 fois pour la gamme de paramètres étudiés. - Le transfert de chaleur maximal se produit pour un pas de rugosité relative d'environ 7,57, tandis que le facteur de frottement continue de diminuer à mesure que le pas de rugosité relative augmente. - Une amélioration maximale du transfert de chaleur se produit à un angle de coin d'environ 10° tandis que de chaque côté de cet angle de coin, le nombre de Nusselt diminue. Le facteur de frottement augmente à mesure que l'angle de coin augmente.	[71]
Latitude: $\varphi=50.3^\circ$ Altitude: $Z=60 \text{ m}$ Longitude: $L=3.5$ $I=45^\circ$	convection forcée.	-générateur d'air chaud (capteur solaire plat à air); -unité de séchage (armoire verticale avec quatre grilles); -simulateur solaire à six lampes au tungstène (1000 W); -ventilateur. un couvercle en polycarbonate, une plaque absorbante en tôle d'aluminium	les obstacles dans le conduit collecteur améliorent les performances de l'unité des échangés. une augmentation de l'angle conduit à des résultats qui sont à nouveau	[72]
-Angle d'inclinaison du collecteur 10° -Longueur du capteur 2,4 et 1,5 m -Largeur du collecteur 1,2 m Profondeur 0,01, 0,015, 0,02 m et 0,035m	-La procédure est effectuée pour un collecteur à plaques planes en mode simple et double flux.	Un capteur plan en simple et double flux avec et sans l'aide d'un milieu poreux.	-On constate que l'augmentation du débit massique à travers les réchauffeurs d'air se traduit par une plus grande efficacité mais aussi par une augmentation de la perte de charge. -D'autre part, la diminution de la profondeur d'écoulement du canal entraîne une augmentation de l'efficacité du système et de la température de sortie en même temps qu'une augmentation de la perte de charge.	[73]
un tube en aluminium canal	convection forcée.	Capteur solaire avec plaque	-Nusselt augmente augmentation de Reynolds	[74]

Chapitre II : Etude théorique du capteur solaire plan

de 2,8 m de long et 0,2 m de large qui comprend cinq sections, une plaque avec géométrie de rugosité, de 30 et 60		absorbante ayant des nervures en forme de V nombres de Reynolds (Re) de 2500–18000 , hauteur de rugosité relative ($e=D_h$) de 0,02–0,034 et angle d'attaque de l'écoulement de 30–90 -un moteur triphasé, 440 V, 3,0 kW et 2880 tr/min	-taux d'augmentation du facteur de frottement -taux de chaleur l'amélioration du transfert ne sera pas proportionnelle à celle	
Langer 2.4m Larguer 1.2 m	-Régime transitoire. -Convection forcée.	-Double passage -3kg Milet poreux	Ils ont conclu selon leur expérience et résultats analytiques, cette conception à double passe avec écoulement entre deux couvercles en verre et sous la plaque absorbante, avait un effet thermique efficacité environ 10% supérieure à celle de la simple conception de passe.	[75]
-Le canal carré a été constitué d'une plaque d'aluminium de 3 mm d'épaisseur a une section de $45 \times 45 \text{ mm}^2$ (HxL) et 3000 mm de longueur, il sépare la section d'essai de 1000 mm. Le rapport de pas (PR) est défini comme le rapport de la longueur entre les nervures à la hauteur du canal (P/H). Les dimensions de la bande nervurée étaient de 4,5 mm de haut (e) et de 0,3mm d'épaisseur (t). La section d'essai se composait des quatre murs.	-Régime transitoire. -Convection forcée.	-Passage simple -Chicanes	Les résultats expérimentaux sont comparés entre le canal monté avec des nervures inclinées et le canal lisse. La nervure ajustée du canal donne un taux de transfert de chaleur et un facteur de frottement plus élevés que le canal lisse. La nervure inclinée avec PR=1 donne un taux de transfert de chaleur et un facteur de frottement plus élevés qu'un avec PR= 2, 3 et le canal lisse respectivement la nervure avec 45° fournit la valeur de transfert de chaleur et de chute de pression supérieure à 90° pour tous les pas de nervure rapport.	[76]
la configuration de conduit rectangulaire est caractérisée par la hauteur du canal, H et la longueur	-Régime transitoire. -Convection forcée.	-Nervures de différentes formes sont triangulaires (isocèles), en coin	L'utilisation des turbulateurs à nervures avec $e/H=0,3$ provoque une augmentation très élevée de la chute de pression, spécialement pour la disposition des nervures en ligne et fournit également des	[77]

axiale du cycle ou pas, P, dont les valeurs respectives sont 20 mm et 40 mm. La longueur totale du canal est de 2 000 mm, ce qui comprend 10 pas de la section d'essai avec une largeur de canal, W, de 300 mm. Chacune des parois nervurées a été fabriquée à partir de plaques d'aluminium de 12 mm d'épaisseur, de 300 mm de large et de 440 mm de long (L). Les dimensions des nervures sont de 6 mm de hauteur (e) et 20 mm d'épaisseur (t).		(triangulaires à droite) et rectangulaires. -Deux arrangements de nervures, à savoir des réseaux en ligne et en quinconce, sont introduits.	augmentations considérables du transfert de chaleur, $Nua/Nu_0=2,6-4,4$, selon la géométrie des nervures. L'augmentation du nombre de Nusselt a tendance à augmenter avec l'augmentation du nombre de Reynolds. La nervure triangulaire décalée doit être appliquée à la place de la nervure rectangulaire pour obtenir un transfert de chaleur plus élevé et des performances d'environ 50 à 65 %, conduisant à un échangeur de chaleur plus compact. Le meilleur régime de fonctionnement pour tous les turbulateurs à côtes se trouve aux valeurs les plus basses du nombre de Reynolds.	
Le conduit rectangulaire en bois a une taille interne de 2600mm×182mm×31 mm, qui se compose d'une section d'entrée, d'une section d'essai et d'une section de sortie de longueur 800, 1200 et 600 mm, Une plaque en aluminium chauffée de 6 mm d'épaisseur est utilisée comme partie supérieure paroi large de la section d'essai alors que la paroi supérieure des sections d'entrée et de sortie du conduit était en contreplaqué de 12 mm d'épaisseur. Tous les autres côtés des sections d'entrée, de test et de sortie sont des murs en bois de 50 mm d'épaisseur.	-Régime transitoire. -Convection forcée.	- Rugosité artificielle sous forme de nervures répétées inclinées - un ventilateur centrifuge avec une vanne de régulation.	(1) Un espace dans la disposition des nervures inclinées améliore le transfert de chaleur et le facteur de frottement des conduits rugueux. L'augmentation du nombre de Nusselt et du facteur de frottement est de l'ordre de 1,48 à 2,59 fois et de 2,26 à 2,9 fois le conduit lisse, respectivement, pour la plage de nombres de Reynolds de 3 000 à 18 000. (2) Les valeurs maximales du nombre de Nusselt et du facteur de frottement sont observées pour un espace dans les nervures répétées inclinées avec une position d'espace relative de 0,25 et une largeur d'espace relative de 1,0. (3) L'analyse des performances thermohydrauliques des conduits rugueux montre qu'une largeur d'écart relative de 1,0 et une position d'écart relative de 0,25 entraînent une valeur plus élevée du paramètre d'efficacité.	[78]

Un conduit rectangulaire en bois a une taille interne de 2600 mm x 181 mm x 31 mm qui se compose d'une section d'entrée, d'une section d'essai et d'une section de sortie de longueurs respectives de 800 mm, 1200 mm et 600 mm , Une plaque en aluminium de 6 mm d'épaisseur, rugueuse artificiellement du côté mouillé, est utilisée comme paroi large supérieure de la section d'essai tandis que les parois supérieures des sections d'entrée et de sortie du conduit étaient en contreplaqué de 12 mm d'épaisseur.	-Régime transitoire. -Convection forcée.	--Rugosité artificielle sous forme de nervures répétées --Effet d'un espace dans la nervure inclinée sur les caractéristiques de transfert de chaleur et d'écoulement de fluide de la surface chauffée. -La plaque absorbante est chauffée par le haut en fournissant un flux de chaleur constant à travers un radiateur électrique, qui a été isolé par de la laine de verre de 50 mm d'épaisseur et du contreplaqué de 12 mm d'épaisseur.	Des recherches ont été effectuées pour la largeur relative de l'espace de 0,5 à 2,0 et la plage de nombres de Reynolds de 3000 à 18000 à une hauteur de rugosité relative de 0,037. - Il a été constaté qu'une nervure inclinée avec une largeur d'espace relative (g/e) de 1,0 donne la valeur la plus élevée du coefficient de transfert de chaleur par rapport à l'autre largeur d'espace relative. - On observe que la valeur la plus élevée d'intensité turbulente est observée à la largeur relative de l'entrefer de 1,0 qui est dans la ligne des mesures de transfert de chaleur.	[79]
Le conduit rectangulaire en bois a une taille interne de 2200 mm × 158 mm × 23 mm. Il est construit en bois. La section d'essai a une longueur de 1000 mm avec une section transversale de 158 mm × 23 mm. Il se compose d'une section d'entrée, d'une section d'essai et d'une section de sortie ayant respectivement des longueurs de 550 mm, 1000 mm et 650 mm. Dans la section de sortie, trois chicanes également espacées sont	-Régime transitoire. -Convection forcée.	Un conduit rectangulaire ayant une rugosité de nervures discrètes inclinées à 60° sur la surface chauffée. La configuration expérimentale consiste en un conduit d'essai ainsi que des sections d'entrée et de sortie. - Passage simple - Rugosité artificielle Sous la forme d'une nervure séparée inclinée à un angle de 60° sur la face inférieure de la plaque absorbante du capteur solaire. À la fin du	- Par rapport à une surface lisse, la surface rugueuse peut produire une augmentation maximale d'environ 2,57 fois et 3,72 fois du nombre de Nusselt et du facteur de frottement, respectivement dans la plage de paramètres étudiés. - L'amélioration maximale du transfert de chaleur se produit pour le pas de rugosité relative de 12, la position de l'écart relatif de 0,35 et la hauteur de rugosité relative de 0,04498. - Des corrélations statistiques pour le nombre de Nusselt et le facteur de frottement ont été développées en fonction de la position de l'écart, de la hauteur (ou de la profondeur) de la nervure, du pas et du nombre de Reynolds. Ces corrélations se sont avérées prédire les valeurs du nombre de Nusselt et du facteur de friction avec un écart type absolu moyen de 3,8% et 3,4%, respectivement.	[80]

prévues après la section d'essai à chaque longueur de 75 mm. Une plaque en aluminium de 1000 mm x 158 mm x 8 mm est utilisée comme plaque rendue artificiellement rugueuse au niveau de la section d'essai du conduit.		conduit, un plénum a été fourni pour connecter le conduit rectangulaire avec un tuyau circulaire.		
	-flux d'air turbulent	La paroi brute a une rugosité d'un degré (P), 10-30 mm, hauteur 1,5 mm Dimensions du conduit Correspond au nombre de Reynolds entre 3000 et 12000. Essayer quatre plaques sont utilisées. Un lisse et trois artificiels avec rugosité Pas 10, 20 et 30 mm	1. Dans toute la gamme des nombres de Reynolds, on constate que le nombre de Nusselt augmente, atteint un maximum pour un pas de rugosité de 20 mm et diminue avec une augmentation de pas de rugosité. 2. La valeur du nombre de Nusselt augmente fortement à faible nombre de Reynolds et cela devient constant ou augmente très légèrement par rapport au faible nombre de Reynolds Cela a également satisfait notre objectif d'application de capteurs solaires à faible nombre de Reynolds. 3. L'amélioration maximale du coefficient de transfert de chaleur se produit à un pas d'environ 20 mm tandis que de part et d'autre de ce pas le nombre de Nusselt diminue 4. Il est également conclu qu'à faible nombre de Reynolds (inférieur à 5000) un conduit lisse donne meilleur transfert de chaleur que le conduit rugueux artificiel. 5. Les valeurs expérimentales de l'efficacité thermique des trois absorbeurs rugueux les plaques testées ont été comparées aux plaques lisses. Une plaque ayant une rugosité le pas de 20 mm donne le rendement le plus élevé de 83,5 %. 6. Basé sur l'expérimentation il est constaté que l'efficacité thermique maximale du réchauffeur d'air solaire rugueux à du ordre de (51 à 83,5 %) selon les conditions d'écoulement. 7. Les plaques absorbantes rugueuses augmentent le coefficient de transfert de chaleur de 1,25 à 1,4 fois par rapport à un	[81]

			conduit rectangulaire lisse dans des conditions de fonctionnement similaires au numéro de Reynold.	
Hauteur du canal H=0.02m Diamètre D = 0,033 m Plaques minces chauffées (0,1 m de large, 0,28 m de long)	système d'écoulement turbulent	Des nervures répétées sont utilisées sur les surfaces d'échange de chaleur pour améliorer la turbulence et améliorer le transfert de chaleur par convection. Les applications incluent les barres de combustible pour les réacteurs nucléaires refroidis au gaz, les cavités internes des aubes de turbine et les surfaces internes Pour les tubes utilisés dans les échangeurs de chaleur. Répartition détaillée du coefficient de transfert de chaleur dans les canaux avec pompes à nervures. -La thermographie à cristaux liquides a été utilisée pour obtenir distributions détaillées du coefficient de transfert de chaleur dans canaux côtelés rugueux. Les modifications du transfert de chaleur induite par transversale continue, transversale brisée et des côtes brisées en forme	Sur la base des résultats, conclusions sont les suivantes: -les caractéristiques des distributions inter-nervures du coefficient de transfert de chaleur sont fortement liées à la forme des nervures et géométrie ; un maximum relatif est généralement atteint aval de chaque nervure pour une traverse continue côtes (dues au rattachement du flux), en forme de V à 45° côtes (les deux valeurs p=e) et côtes en forme de V à 60° par rapport au nombre de Reynolds pour des débits massiques fixes. par rapport au nombre de Reynolds de référence pour le pompage fixe pou voirs. -lorsque les côtes sont transversales et brisées (ou en forme de V à 60 degrés avec p=e ¼ 8), des paires de lobes à coefficient de transfert de chaleur élevé sont situées à côté de la ligne normale aux côtes (lorsqu'il est transversal) ou à côté de la bissectrice des côtes (lorsqu'il en forme de V) en raison des niveaux de turbulence élevés produits par les interactions pointe de côte- paroi d'extrémité; -un champ thermique périodiquement pleinement développé est rapidement atteint pour les nervures transversales continues (aux deux p=e valeurs) et des côtes cassées en forme de V ayant la partie inférieure hauteur (e ¼ 3 mm, p=e ¼ 13:3); dans le reste cas, les profils inter-nervures sont presque répétitifs dans forme mais la valeur moyenne a tendance à augmenter dans la direction du flux principal. -les côtes brisées transversales avec p=e ¼ 4 et 8 donnent le augmentation du transfert de chaleur plus élevée (par rapport au canal lisse de référence) sous le même débit massique contrainte de débit ; lorsque la perte de charge est prise en compte (contrainte de puissance de	[82]

		de V, déployées périodiquement sur une surface chauffée, ont été observées.	pompage fixe,(les nervures brisées avec $p=e \frac{1}{4} 4$ et 13,3 ont les meilleures performances thermiques, tandis que les nervures transversales continues) toujours avec $p=e \frac{1}{4} 4$ et 8) fournissent une petite augmentation ou même une réduction du transfert de chaleur.	
longueur de 152,4 cm, il avait 5,08 cm x 5,08 cm de section transversale. Le canal est fait de plastique acrylique transparent de 1/2" d'épaisseur.	le débit d'air dans le conduit est grossier à faible blocage	Les nervures sont positionnées les unes par rapport aux autres (en ligne, en quinconce, en intersection, etc.), le rapport nervure/hauteur (P/e) et Forme des nervures (angles ronds ou aigus, segments, rapport d'aspect des nervures (ARt) et la déviation dans le sens de l'écoulement) ont des effets évidents sur le transfert de chaleur local et massique	Les comparaisons entre le test et les résultats évalués numériquement ont montré de bons accords entre les deux pour la plupart des cas. Par conséquent, la CFD pourrait être considérée comme un outil viable pour la prédiction des coefficients de transfert de chaleur dans les sections d'essai, notamment lors des études paramétriques au début procédé de design. Il a également été conclu que, contrairement aux côtes qui sont montés perpendiculairement à la direction d'écoulement, 45° les nervures inclinées avec des taux de blocage élevés ($> 0,2$) ne présentent pas de bonnes performances thermiques, c'est-à-dire que le blocage des nervures augmente, le coefficient de transfert de chaleur diminue et, les nervures à coin arrondi et à blocage élevé sont supérieures à celles à forte coins.	[83]
Longueur=1200 mm Largeur=530mm	Le flux d'air est rugueux	Une enquête expérimentale a été menée pour étudier l'effet d'obstacles en forme de delta montés sur la surface de l'absorbeur d'un conduit d'aérotherme avec un rapport d'aspect 6 : 1 ressemblant aux conditions proches des aérothermes solaires. Cette étude englobait la nombre de Reynolds (Re) allant de 3400 à	(1) l'effet du nombre de Reynolds, obstacle relatif hauteur (e/H) et pas longitudinal relatif de l'obstacle (Pl/e) sur le coefficient de transfert de chaleur et le frottement facteur a été étudié pour une valeur fixe de pas transversal obstacle (Pt/b) = 7/3. (2) Les performances thermiques de tels capteurs ont été trouvé supérieur à celui des lisses pour le même Paramètres de fonctionnement. Cependant, la perte de charge augmente dans de tels collecteurs. (3) Le pas longitudinal de l'obstacle affecte fortement l'écoulement modèle et donc la performance du conduit.	[84]

		27600, pas longitudinal de l'obstacle (Pl/e) variant de $3/2$ à $11/2$, et relatif la hauteur de l'obstacle (e/H) variait de 0,25 à 0,75. Le pas transversal relatif de l'obstacle (Pt/b) = $7/3$ et l'incidence de débit sur obstacle = 90° sont maintenus constants pendant toute l'expérimentation.	(4) Le rehaussement maximal du nombre de Nusselt par rapport à celui du conduit lisse est obtenu pour $Pl/e = 3/2$, $e/H = 0,75$ au nombre de Reynolds $Re = 7276,82$ et est de l'ordre de 3,6. (5) La performance thermohydraulique maximale est obtenue pour $Pl/e = 3/2$, $e/H = 0,50$ au nombre de Reynolds $Re = 9757,38$, et sa valeur est de l'ordre de 2,14. (6) La géométrie de l'obstacle choisie montre un effet appréciable amélioration du transfert de chaleur. (7) En général, on peut dire que pour toute hauteur relative et toute disposition d'obstacles, la mise en valeur du transfert de chaleur est dû à l'augmentation de la turbulence et également au flux d'air secondaire produit le long des obstacles, qui transportent l'air chauffé loin de la surface de la plaque.	
--	--	--	--	--

II.12. Conclusion

De tous les types de capteurs solaires actuellement développés, le capteur solaire plan se trouve être l'application la plus répandue. Comparé aux capteurs à circulation liquide, le capteur solaire à air présente l'avantage d'être de conception facile, pas cher et nécessite peu d'entretien. De plus, il ne pose pas de problème de fuites, de corrosion ou de gel.

Cependant les principaux inconvénients de ce type de capteurs sont les faibles valeurs des propriétés thermophysiques de l'air: sa faible densité et sa basse capacité calorifique, d'où son faible rendement en raison du bas coefficient de transfert de chaleur de convection entre l'air et l'absorbeur.

Il a été constaté que la résistance thermique principale au transfert de chaleur de convection est due à la formation d'une couche limite sur la surface de transfert thermique.

Des techniques existent pour améliorer le transfert thermique dans les capteurs solaires à air: introduction de chicane dans la veine d'air mobile ou dotation de l'absorbeur de rugosités artificielles. Ces techniques feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III

Etude experimentale du capteur solaire plan

III.1. Introduction

Un des problèmes essentiels de l'utilisation de l'énergie solaire est les faibles échanges thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur du capteur solaire. Par contre, l'introduction de chicanes (obstacles) disposées en rangées dans les conduits de ces systèmes améliore nettement les transferts thermiques.

A partir de chapitres précédent et nos connaissance sur les capteurs solaire et come il n'ya pas de règle générale pour la conception des capteurs solaire plan à air nous allons dans ce chapitre suivre les étapes principales de la conception de quatre capteurs solaires on essaye de les optimiser le plus possible: d'une part en introduisant dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur et d'autre part il a été utilisé le sable sur l'absorbeur.

Nous connaissons les grandeurs mesurées:

- ✓ T_e : Température d'entrée du capteur ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ T_s : Température de sortie du capteur ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ T_{abs} : Température de l'absorbeur ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ T_{amb} : Température de l'air ambiante ($^{\circ}\text{C}$)
- ✓ V_e : Vitesse de l'air à l'entrée du capteur (m/s)
- ✓ V_s : Vitesse de l'air à la sortie du capteur (m/s)
- ✓ V_{amb} : Vitesse de l'air ambiant (m/s)

III.2. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air

III.2.1. Présentation des capteurs solaires plans à air de notre expérience

C'est un capteur solaire plan à air à simple circulation et à simple vitrage dont la configuration est parallélépipédique (1 m x 0.5 m) transforme le rayonnement solaire en énergie thermique. Il est constitué d'un absorbeur en tôle d'Aluminium de (0.003 m) d'épaisseur peinte en noire mate. Il est recouvert aussi d'une plaque de verre, d'épaisseur 0,005 m. Les cotés latéraux et les parties inférieures sont isolés thermiquement avec la laine de verre. Ils sont de 0.03 m et 0.05 m d'épaisseur respectivement. L'air y circule entre la vitre et l'absorbeur. Le capteur est incliné d'un angle de 33° (latitude de la ville d'El-Oued) par rapport au plan horizontal et orienté vers le sud.

Nous présentons dans cette étude une série de test expérimental menés sur quatre prototypes du capteur solaire plan à air, conçu au laboratoire et expérimenté dans la région d'El-Oued. L'installation expérimentale comprend mesure du rayonnement solaire global, la vitesse de vent, les températures : ambiantes, de l'air à l'entrée et à la sortie, et de l'absorbeur . Afin d'optimiser les performances thermiques en utilisant les chicanes et les matériaux locaux (le sable) sur l'absorbeur de trois capteurs. Il est essentiellement représenté comme la montre sur la photo (III.1):



Photos (III.1) : Les quatre capteurs solaires à réaliser.

- 1- Capteur solaire sans chicanes et sans sable (témoin).
- 2- Capteur solaire avec chicanes parallèles + sable.
- 3- Capteur solaire avec chicanes transversales + sable.
- 4- Capteur solaire sans chicanes + sable.

III.2.2. Préparation du sable

Avant de fixer la couche de sable sur l'absorbeur de capteur, on a été fait traiter le sable à trois étapes citées ci-après:

III.2.2.1. Tamisage

Le sable qui est l'objet des expériences, de la région El-Oued (la zone est située dans une zone chaude et sèche à $33^{\circ} 30'$ de latitude Nord et $6^{\circ} 47'$ Est de longitude). En utilisant un tamis (0.125 mm), et pour un diamètre moyen de 0,125 mm on prépare environs 3 kg de sable. Comme représenté sur la photo (III.2) ci-après:



Photo (III.2) : 1^{ère} Etape

III.2.2.2. Traitement chimique

La quantité de sable est lavée avec de l'eau distillée en agitant pendant quelques minutes, après filtration on ajoute de l'acide chlorhydrique (HCl à 10%) pour éliminer les sels comme (Co, Mg, Ca, Fe, Al). Après filtrage on lave le sable obtenu de nouveau par l'eau distillée pour éliminer toute trace de l'acide. Comme représenté sur la photo (III.3) ci-après:



Photo (III.3) : 2^{ème} Etape

III.2.2.3. Traitement calorifique

Ensuite on met le sable dans un four électrique réglé à une température de 500°C pour éliminer les impuretés restantes et pour augmenter le pourcentage d'Oxyde de silicium (SiO_2) dans le sable et laissé refroidir. Comme représenté sur la photo (III.4) ci-après:



Photo (III.4) : 3^{ème} Etape.

Après de préparer le sable traité et avant de le fixer sur l'absorbeur de capteur solaire, on sépare trois quantités du sable de poids de 800 g pour chaque quantité. Enfin on coule chaque quantité du sable par la peinture noire pour augmenter le coefficient de l'absorption et on les fixe sur l'absorbeur de trois capteurs. Comme représenté sur la photo (III.5) ci-après:



Photo (III.5) : La quantité du sable sur une balance électronique.

III.2.3. Composants du capteur acheté

Ces composants ont été spécialement sélectionnés pour fabriquer notre capteur. Ces composants sont résumés dans le tableau (III.1):

Tableau (III.1) : Composants du capteur solaire.

Matière	Dimensions	Quantité	Observation
Tôles de fer galvanisé	$2\text{m} \times 1\text{m} \times 2\text{mm}$	2	
Plaques d'aluminium	$2\text{m} \times 1\text{m} \times 3\text{mm}$	1	
Plaque de verre	$1\text{m} \times 0.5\text{m} \times 5\text{mm}$	3	

Chapitre III : Etude expérimentale du capteur solaire plan

Laine de verre	4m × 0.5 m × 7cm	2	
Canne en fer en forme de L	6m×40mm×40mm×1,2mm	4	
Thermocouple	--	13	
Silicone	--	3	
Peinture noire (Black mat)	--	4	
Peinture blanche	--	7	
Peinture noire	--	2	
Ruban adhésif double face pour l'étanchéité	2m × 2cm × 3mm	3	
Ruban adhésif gris spécial	--	3	

Vis jnsh	5cm × 8mm	2	
Armoire de mesure de température	40cm × 30cm × 17cm	1	

III.2.4. Conception et réalisation du capteur solaire plan à air

Le capteur solaire étudié a été construit au laboratoire de Génie mécanique de l'université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued.

Le capteur est essentiellement constitué comme le montre sur la photo (III.6)

1. Coffre (Couverture extérieure).
2. Isolation thermique.
3. Absorbeur.
4. Chicanes.
5. Couverture verrière.

Pour réaliser cette structure on doit passer par plusieurs étapes constructives après les mesures des différentes parties du capteur pour obtenir l'objectif de structure désigner.

Tout d'abord on doit tracer les différent parties du capteur conçu par le fer galvanisé et tracer la surface inferieur de longueur 100 cm et de largeur de 50 cm ainsi que tracer le contour pour découper cette partie et la plier sur les bordures gauche et droite on la soudant de 10 cm repartie entre les deux vers l'intérieur, la figure (III.1) montre la base du capteur.



Photo (III.6) : Capteur solaire à réaliser.

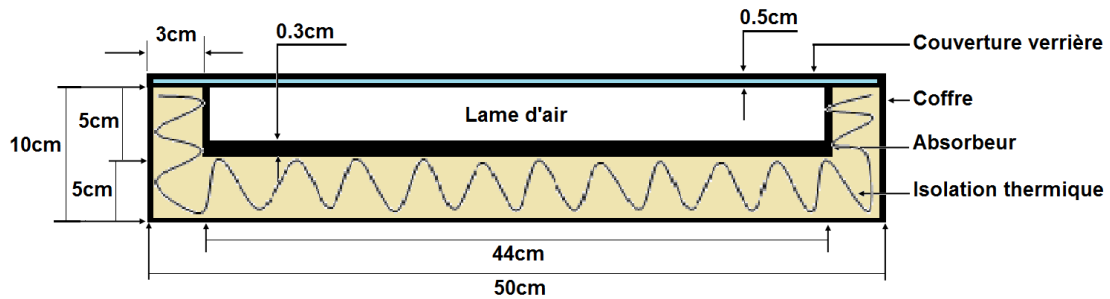


Figure (III.1) : Dimensions du capteur plan.

III.3.4.1. Coffre (Couverture extérieure)

On utilise une plaque de fer galvanisé de dimensions 88 cm × 100 cm et d'épaisseur de 2 mm, il a suffi de deux tôles, à cet effet ces dernières sont découpées en quatre parties et pliées en quatre coffres dont les dimensions suivantes:

- ✓ Longueur : 1 m.
- ✓ Largeur : 0.5 m.
- ✓ Epaisseur : 2 mm.

Ensuite nous plions la plaque pour obtenir une largeur de 3 cm pour les côtés et 5 cm pour la hauteur du milieu intérieur pour pouvoir contenir les isolants. Après on perce trois trous sur la coté droite pliée pour les thermocouples.

Nous fermons les deux ouvertures des deux côtés avec une plaque de fer pour empêcher l'air d'y pénétrer, puis peignons la structure extérieure en blanc.

Enfin, on obtient la structure qui est présentée sur la photo (III.7) ci-dessous.



Photo (III.7) : Coffre du capteur.

III.3.4.2. Isolation thermique

Pour isoler les surfaces du capteur on doit utiliser la laine de verre comme isolant, pour résister aux températures de fonctionnement. On a utilisé la laine de verre avec 5 cm d'épaisseur à l'arrière et 3 cm cotés latérales.



Photo (III.8) : Laine de verre.

III.3.4.3. Absorbeur

On a utilisé une plaque en tôle d'aluminium de dimensions 44×100 cm et d'épaisseur de 3 mm, et cette dernière est découpée en quatre parties dont les dimensions suivantes:

- ✓ Longueur: 1 m.
- ✓ Largeur: 44 cm.
- ✓ Epaisseur: 3 mm.
- ✓ Superficie de l'absorbeur: 0.44 m².



Photo (III.9): Absorbeur en Aluminium.

Puisque, nous avons 4 prototypes et chaque prototype a un absorbeur différent, où la différence est dans le traitement de la surface de la plaque d'Aluminium. Les différents absorbeurs sont les suivants:

- ✓ une plaque en aluminium peint en noire mate.
- ✓ une plaque en aluminium avec chicanes parallèles, où on ajoute du sable à une quantité de 800 g et on fixe ce sable avec la peinture noire mate.
- ✓ une plaque en aluminium avec chicanes transversales, où on ajoute du sable à une quantité de 800 g et on fixe ce sable avec la peinture noire mate.
- ✓ une plaque en aluminium où on ajoute du sable à une quantité de 800 g et on fixe ce sable avec la peinture noire mate.

III.3.4.4. Chicane

Les chicanes sont divisées d'une plaque d'aluminium, la forme des chicanes est rectangle de longueur de 10 cm et de largeur de 4 cm, le rôle de chicanes est d'augmenter l'efficacité de capteur.

Le premier capteur : avec des chicanes parallèles espacées de 10 cm. Chaque rangée comporte trois chicanes, espacées de 3,5 cm. Comme le montre sur la figure (III.2) et sur la photo (III.10).

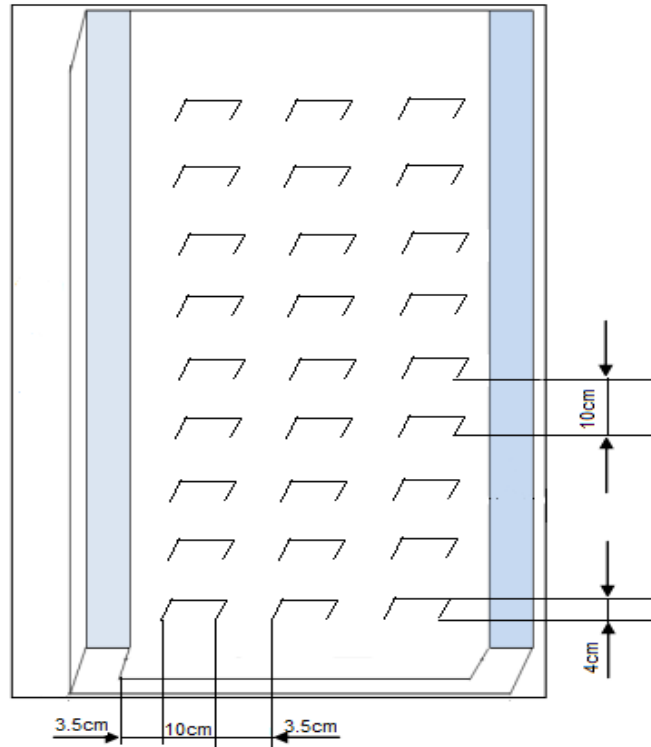


Figure (III.2) : Dimensions de chicanes parallèles.



Photo (III.10) : Capteur solaire avec chicanes parallèles.

Le deuxième capteur : avec des chicanes transversales, espacées de 10 cm, cinq rangées, contenant trois chicanes, espacées de 3,5 cm, et quatre rangées, contenant deux chicanes, espacées de 3,5 cm, et sur les côtés de 10,25 cm. Comme le montre sur la figure (III.3) et sur la photo (III.11).

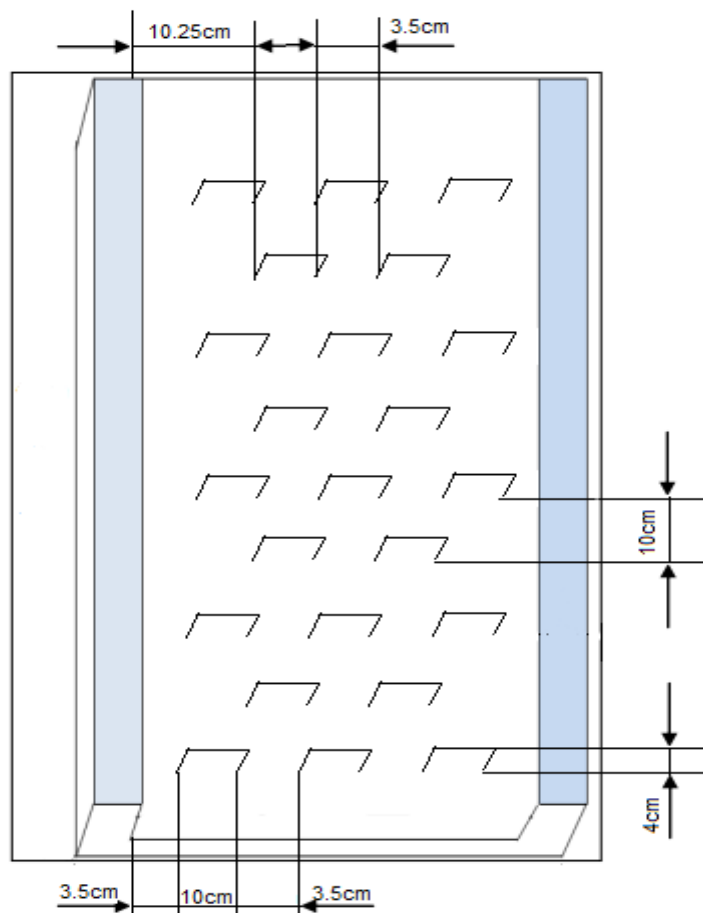


Figure (III.3) : Dimensions des chicanes transversales.



Photo (III.11) : Capteur solaire avec chicanes transversales.

III.3.4.5. Couverture verrière (verre)

Pour sa simplicité et son bas coût, on a utilisé du verre ordinaire. Car ce type de capteur solaire plan à air ne nécessite pas des techniques avancées.

Les dimensions de la vitre sont :

- ✓ Longueur : 100 cm.
- ✓ Largeur : 50 cm.
- ✓ L'épaisseur : 0.5 cm.
- ✓ Superficie de l'absorbeur: 0.5 m^2 .

On a choisi un verre ordinaire pour leur bonne conductivité thermique, leur bonne transmission du rayonnement visible et leur mouillabilité.

Pour assurer une bonne étanchéité entre la vitre et les autres constituants du capteur on a utilisé de la silicone.

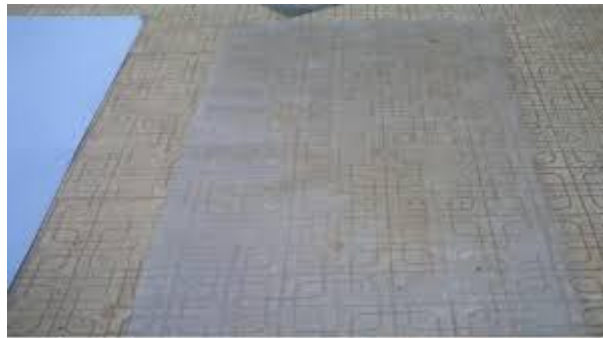


Photo (III.12) : Plaque de verre.

III.3.4.6. Réalisation du support

IL y a un support disponible au laboratoire de l'institut des sciences et de la technologie, il est propre pour nos expériences après d'ajouter quelques modifications. Le support que nous avons fait de canne en fer en forme de L, longueur 2 m, largeur 1.20 m, hauteur 50 cm et angle d'inclinaison 33° .

III.3.4.7. Thermocouples

On fixe 13 thermocouples sur les quatre capteurs de nos expériences, c'est pour mesurer les températures de différentes parties des capteurs, à l'entrée du capteur, au milieu et à la sortie, et la température de l'absorbeur.

Pour cela, Nous faisons les trous dans les capteurs aux positions requises.



Photo (III.13) : Thermocouple.

Afin de connaître la température, nous achetons une armoire avec quatre dispositifs de contrôleur de température intelligent mode REX-C400. Comme la montre sur la photo (III.14).



Photo (III.14) : Armoire de mesure de température.

III.2.4.8. Dispositif de contrôleur de température intelligent mode REX-C400

C'est un appareil qui vous donne la température après l'avoir connecté à un appareil qui mesure la température. Comme la montre sur la photo (III.15).



Photo (III.15) : Dispositif de contrôleur de température intelligent mode REX-C400.

Nous connectons les thermocouples dans chaque capteur à dispositif de contrôleur de température intelligent mode Rex-c400 pour donner la température. Comme montre la photo (III.16).

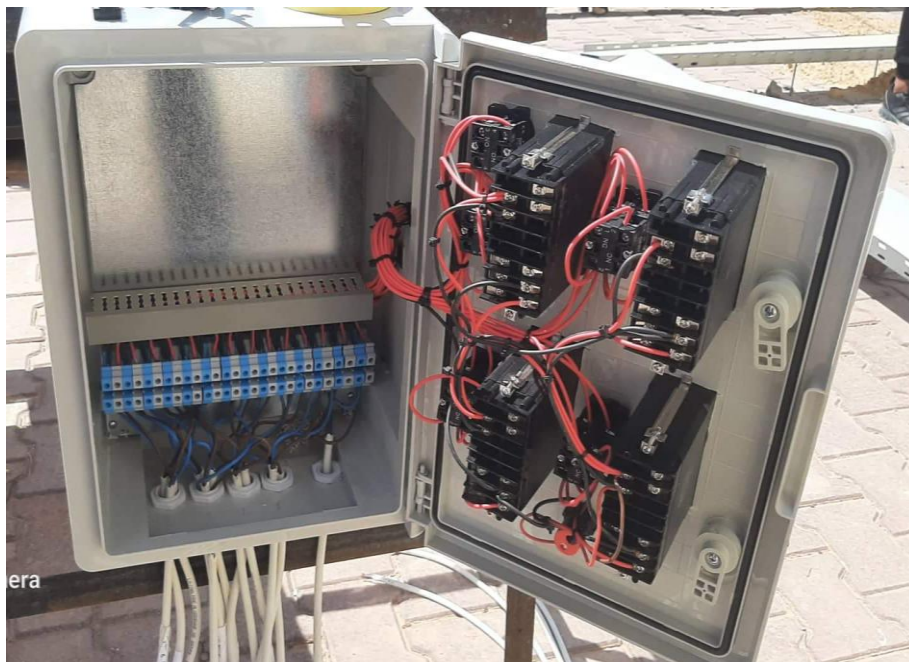


Photo (III.16) : Connecter les capteurs à l'armoire de mesure de température.



Photo (III.18) : Fixation de l'absorbeur.

On a fixé les chicanes en parallèle par la silicone sur la surface de l'absorbeur d'un capteur, et on a fixé les chicanes en transversale sur la surface de l'absorbeur d'un autre capteur, mais les deux autres capteurs de notre expérience sont sans chicanes. Ensuite on peint les absorbeurs de tous les capteurs en peinture noire mate.

On installe les thermocouples dans leur positions aux trous des cotés droites des coffres, tous les coffres possèdent trois thermocouples sauf un ayant quatre. Comme représenté sur la photo (III.19).

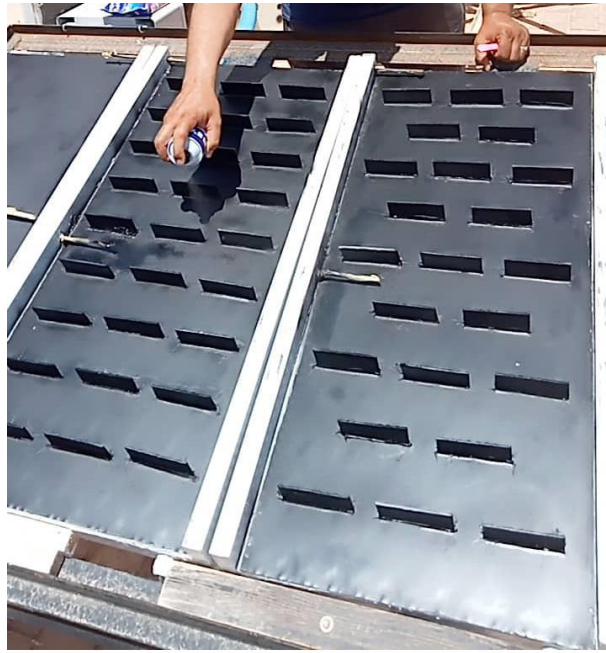


Photo (III.19) : Positionnement de chicanes et de thermocouples

On teinte chaque quantité (800 g) du sable soigneusement par la peinture noire pour augmenter le coefficient de l'absorption et on les fixe sur l'absorbeur de trois capteurs. Comme le montre sur la photo (III.20).



Photo (III.20) : Ajout de quantité du sable à l'absorbeur.

Ensuite, le montage des couvertures s'effectue dans la position supérieure du capteur fixée par le ruban adhésif doublé à l'aide de la silicone pour éviter les fuites. Comme le montre sur la photo (III.21).



Photo (III.21) : Montage de vitre

Enfin, On pose les prototypes des capteurs sur le support, et on relie les câbles des tous les thermocouples avec l'appareil de l'armoire de commande. Comme le montre sur la photo (III.22).

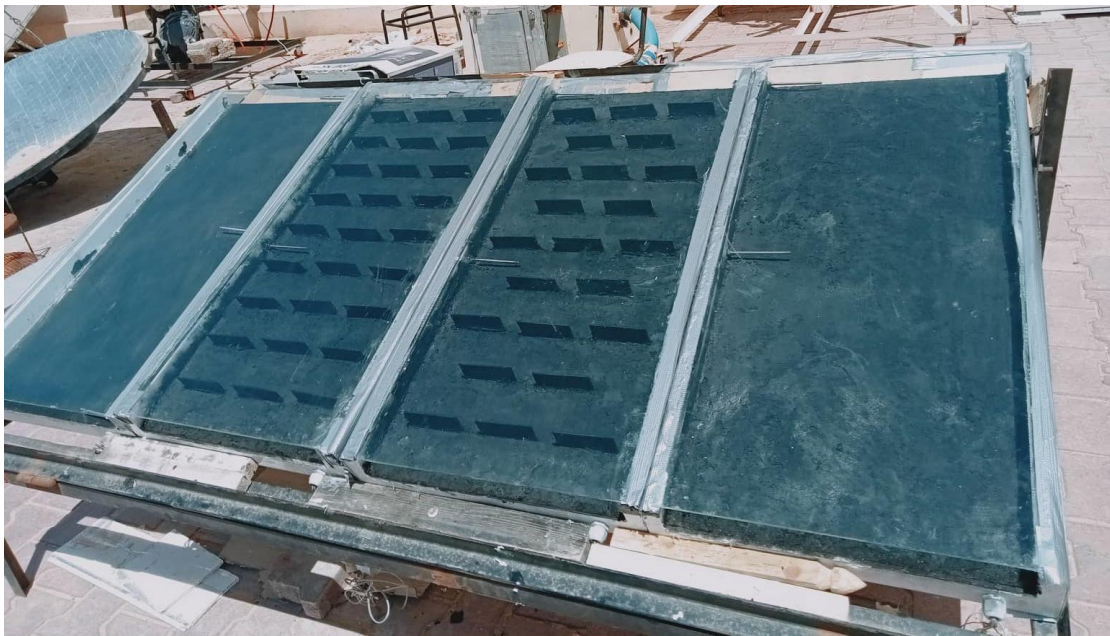


Photo (III.22) : Installation des capteurs.

III.4. Appareillages de mesures

Les différentes mesures sont réalisées à l'aide des appareils suivants :

III.4.1. Mesure de la température

Les températures ont été mesurées avec des thermocouples de type K (chromel-alumel) (10 cm de longueur), reliés à une armoire de type REX-C400. La température ambiante est mesurée à l'aide d'un anémomètre. Les mesures sont enregistrées pendant 30 minutes.



Photo (III.23) : Emplacement des thermocouples.



Photo (III.24) : Anémomètre

III.4.2. Mesure de la vitesse de l'air

La vitesse de l'air est mesurée à l'entrée et à la sortie du capteur et la vitesse ambiante. Les vitesses ont été mesurées avec d'un anémomètre numérique (Kestrel 1000).



Photo (III.25) : Anémomètre Kestrel 1000.

III.4.3. Mesure du rayonnement solaire global

Le rayonnement a été mesuré à l'aide d'un pyranomètre (pyranometer 4890.20 "Frederiksen").



Photo (III.26) : Pyranomètre (Pyranometer 4890.20 "Frederiksen").

III.5. Résultats expérimentaux

III.5.1. Variation de rayonnement solaire et de la température de l'air ambiant

La figure (III.4) représente la variation journalière du rayonnement solaire et la température de l'air ambiant en fonction du temps. L'allure de la température et du rayonnement solaire est identique car plus le rayonnement solaire est important, plus la température de l'air est élevée.

On remarque, le rayonnement solaire atteint une valeur maximale de 1010 W/m^2 à midi (12:00). Le rayonnement solaire varie entre ($289 - 1010 \text{ W/m}^2$) pendant le jour, la valeur maximale de la température de l'air ambiant est de $43,9^\circ\text{C}$, elle est entre ($32,8^\circ\text{C} - 43,9^\circ\text{C}$).

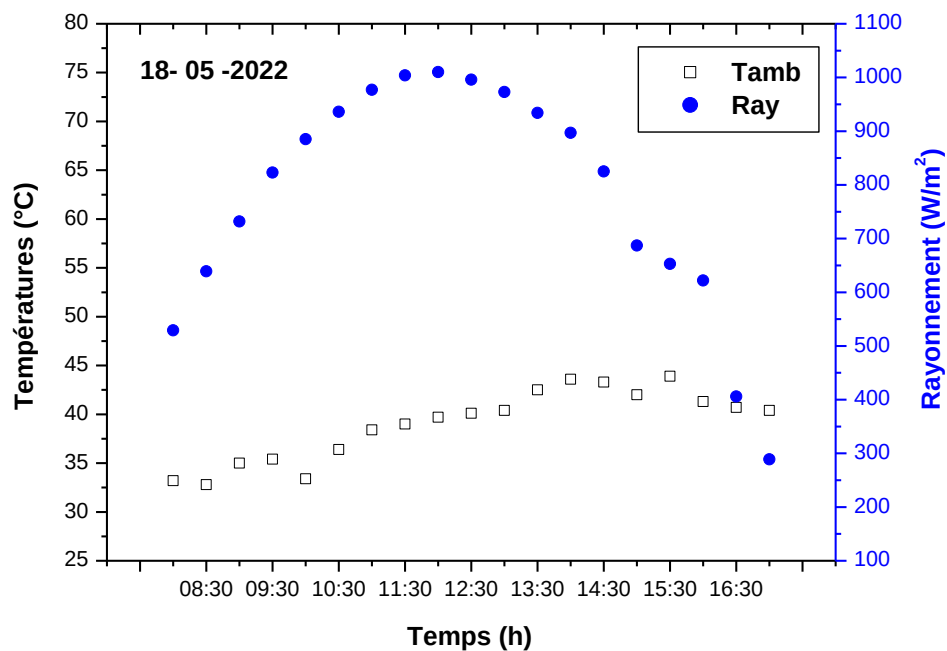


Figure (III.4) : Variation de la température de l'air ambiant, et du rayonnement solaire en fonction du temps.

III.5.2. Variation de la température de l'absorbeur, la température d'entrée et de sortie

Les figures (III.5a), (III.5b), (III.5c) et (III.5d) montrent la variation des températures de l'air à l'entrée et à la sortie de capteur solaire et la température de l'absorbeur pour les quatre capteurs. Comme montré, les températures de sortie suivent prend approximativement la même allure (montée et descente ensemble) que la température de l'absorbeur.

De 08h:00 à 13h:00 la température de l'absorbeur et la température de sortie augmentent, avec l'augmentation du rayonnement solaire, et la température de l'absorbeur atteint des valeurs maximales, puis commence à diminuer vers (16h:00).

Nous remarquons sur les figures (III.5a), (III.5b), (III.5c) et (III.5d) que la température maximale à l'entrée de capteur était de 43,9 °C dans les quatre capteurs.

Dans le cas de capteur témoin, la température maximale de l'air à la sortie de capteur était de 69 °C à 13:30, tandis qu'au niveau de l'absorbeur, la température maximale a été de 96 °C à 12:30 (Figure (III.5a)).

Dans le cas de capteur avec sable, la température de l'air à la sortie de capteur était de valeur maximale 89 °C à 12:00, tandis qu'au niveau de l'absorbeur, la température maximale a été de 99 °C à 12:00 (Figure (III.5b)).

Dans le cas de capteur avec chicanes transversal+ sable, la température de l'air à la sortie de capteur était de valeur maximale 93 °C à 13:30, tandis qu'au niveau de l'absorbeur, la température maximale a été de 97 °C à 12:30 (Figure (III.5c)).

Dans le cas de capteur avec chicanes parallèles + sable, la température maximale de l'air à la sortie de capteur était de 97 °C à 13:30, tandis qu'au niveau de l'absorbeur, la température maximale a été de 104 °C à 12:30 (Figure (III.5d)).

On remarque du résultat que la température d'absorbeur et la température de sortie de capteur solaire dans le capteur avec sable collé sur l'absorbeur est élevée comparé au absorbeur sans sable.

De tout cela, nous concluons qu'il existe une relation entre la température d'absorbeur et la température de sortie.

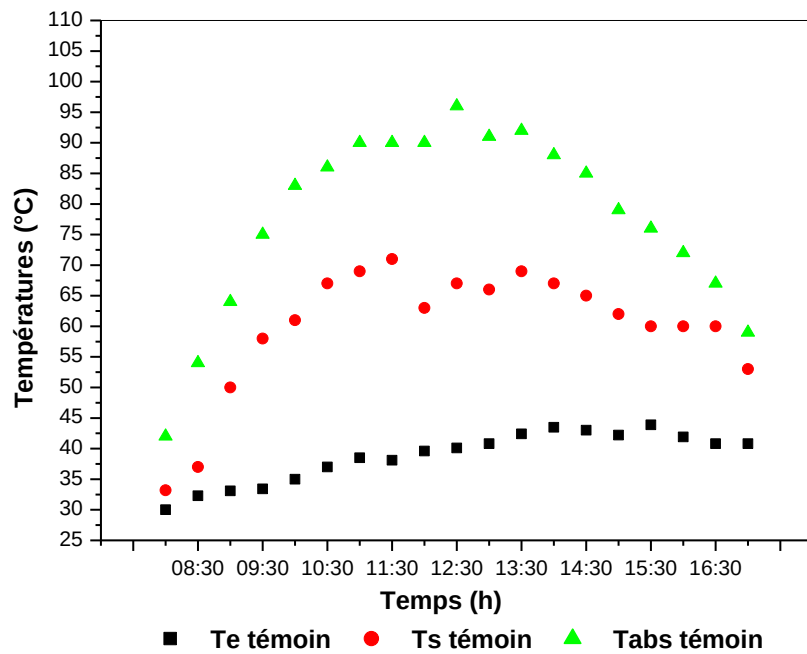


Figure (III.5a) : Forme de la température d'entrée, sortie des capteurs solaires et la température de l'absorbeur.

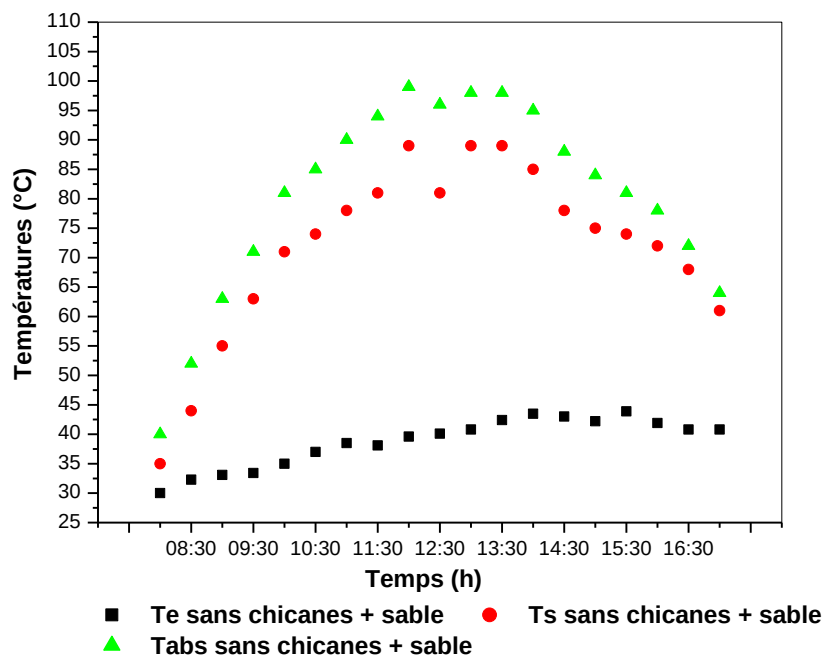


Figure (III.5b) : Forme de la température d'entrée, sortie des capteurs solaires et la température de l'absorbeur.

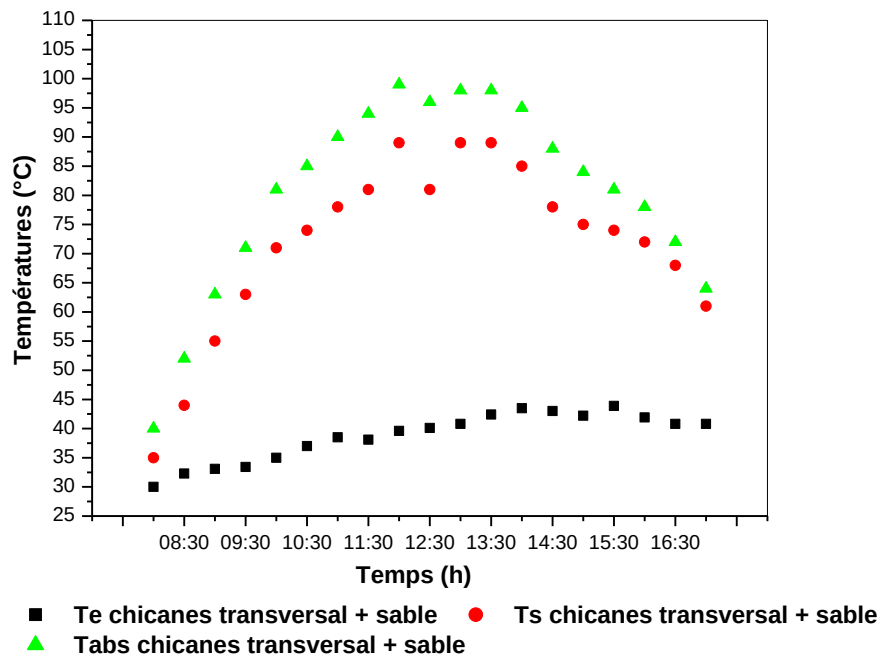


Figure (III.5c) : Forme de la température d'entrée, sortie des capteurs solaires et la température de l'absorbeur.

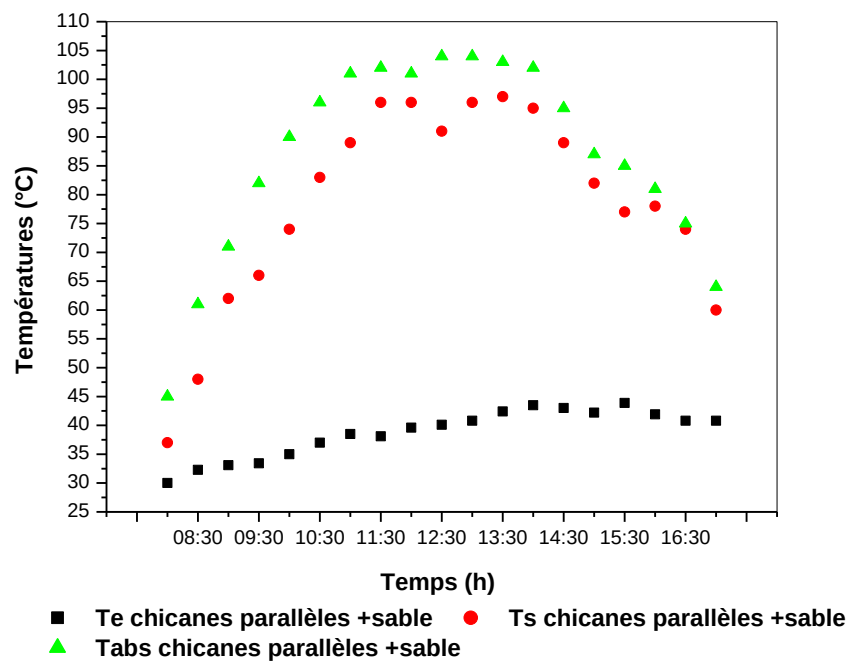


Figure (III.5d) : Forme de la température d'entrée, sortie des capteurs solaires et la température de l'absorbeur.

III.5.3. Température de sortie

La variation de température à la sortie pour les quatre capteurs est montrée aux figures (III.6a), (III.6b), (III.6c) et (III.6d).

Premièrement : Pour le capteur sans chicanes et sans sable (témoin), où la température a été enregistrée à 08h00, 35 °C, où elle a commencé à augmenter pour atteindre un maximale de 89 °C à 13h30, puis décroître progressivement pour atteindre 53 °C à 17h00 figures (III.6a).

Deuxièmement : Pour le capteur sans chicanes et avec sable , où la température a été enregistrée à 08h00, 33.2 °C, où elle a commencé à augmenter pour atteindre un maximale de 69 °C à 13h30, puis décroître progressivement pour atteindre 61 °C à 17h00 figures (III.6a).

Troisièmement: À travers la courbe (figures (III.6b)), on remarque que le capteur avec chicanes transversales + sable a commencé à 8h00 à une température de 35°, pour atteindre la valeur maximale 93 °C à 13h30, puis il a diminué progressivement jusqu'à 59 °C à 17h00.

Quatrièmement : Pour le capteur avec chicanes parallèles + sable, où la température de l'air a été enregistrée à 08h00, était de 37 °C, où elle a commencé à augmenter progressivement, puisqu'il atteint son maximale de 97 °C à 13h30, puis il a diminué pour atteindre 60 °C à 17h00 figures (III.6c).

De là, nous concluons que le capteur avec chicanes parallèles + sable est meilleur que le capteur sans chicanes et sans sable (témoin).

La variation de la différence de température ($T_s - T_e$) pour les trois capteurs est montrée dans la figure (III.7).

De la figure (III.7a) on constate que la différence de température au capteur sans chicanes + Sable est supérieure à la différence de température au capteur témoin , la différence de température de capteur avec sable varie entre (5-48, 2) et sa valeur maximale était de 48,2 °C, dans le cas de capteur témoin la différence de température varie entre (3,2-32,9), et la valeur maximale de 32,9 °C.

Dans le cas de capteur avec chicanes transversales + sable la différence de température varie entre (5-52,4), et la valeur maximale de 52,4 °C.

Nous constatons sur la figure (III.7b) que la différence de température dans le capteur solaire avec chicanes transversale + sable est supérieure de 29 °C à la différence de température du capteur témoin.

La différence de température de capteur avec chicanes parallèles varie entre (7-57,9) et sa valeur maximale était de 57,9 °C.

De la figure(III.7c), il est clair que la différence de température dans le capteur solaire avec chicanes parallèles + sable est supérieure à la différence de température dans le capteur solaire sans chicanes et sans sable (témoin) jusqu'à ce que la valeur maximale atteigne environ 33 °C.

A travers ces données, la meilleure resultat est montrée dans la différence de température dans le capteur solaire avec chicanes parallèles + sable, où la différence de température atteint entre 11h30 et 12h00 environ 58 °C. Vient ensuite le capteur solaire avec chicanes transversale + sable en deuxième position, suivi le capteur solaire sans chicanes + sable ; et celui-ci est toujours comparé au capteur témoin.

Nous concluons de ce qui précède que les chicanes et le sable et la façon dont elles sont répartir dans le capteur a élevé la température à la sortie du capteur.

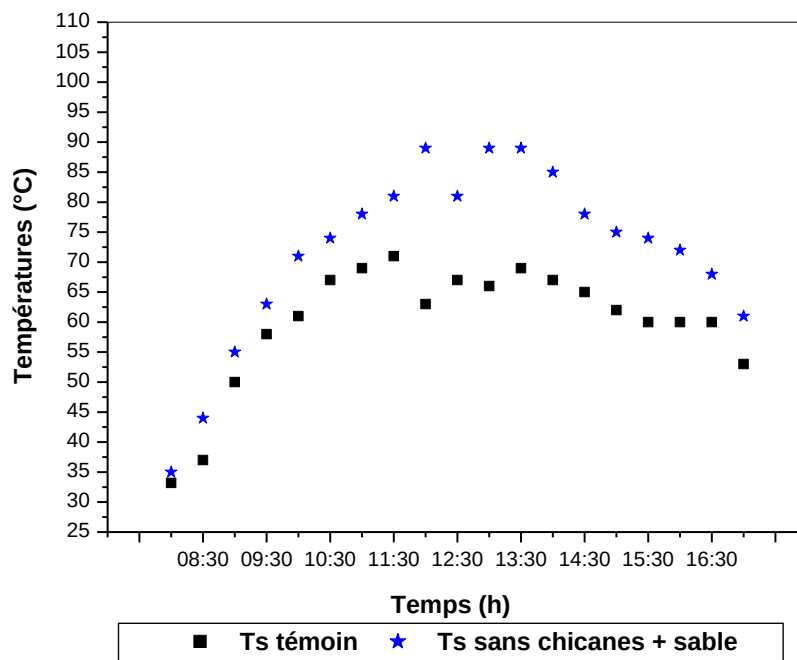


Figure (III.6a) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.

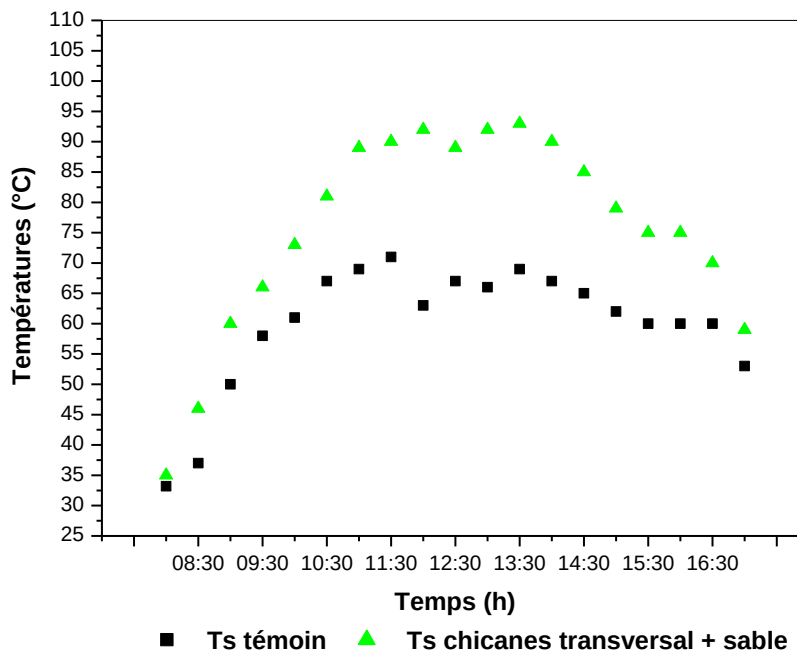


Figure (III.6b) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.

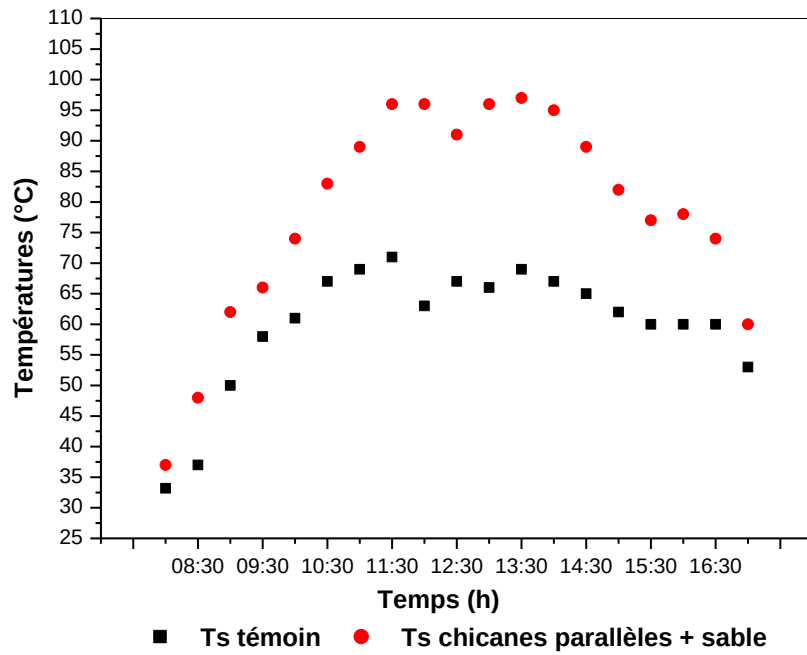


Figure (III.6c) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.

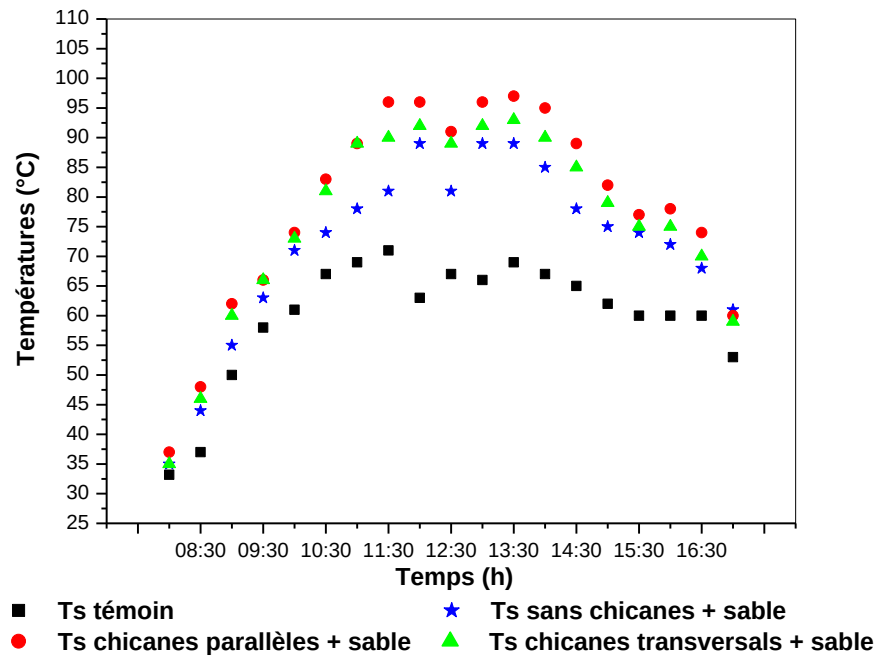


Figure (III.6d) : Forme de la température de sortie des capteurs solaires.

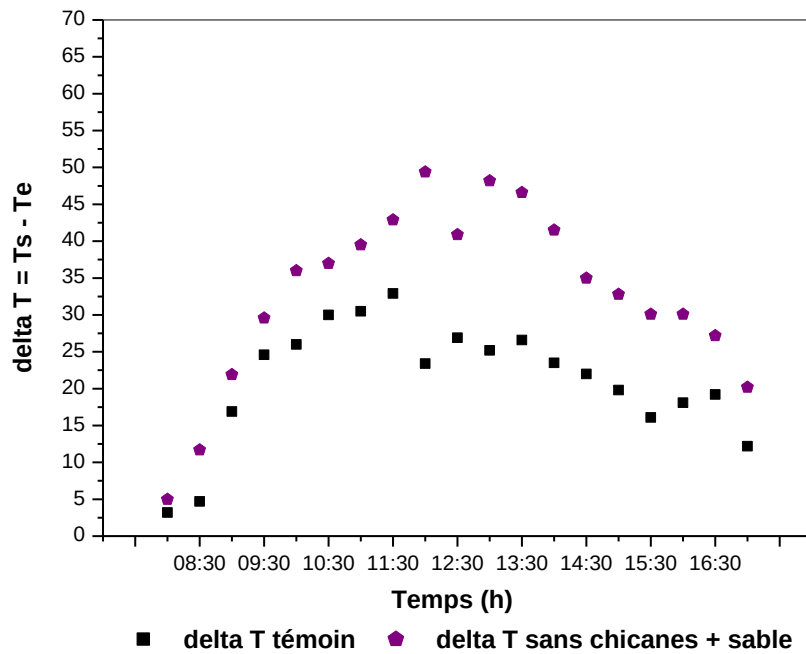


Figure (III.7a) : Forme de la différence de température des capteurs solaires.

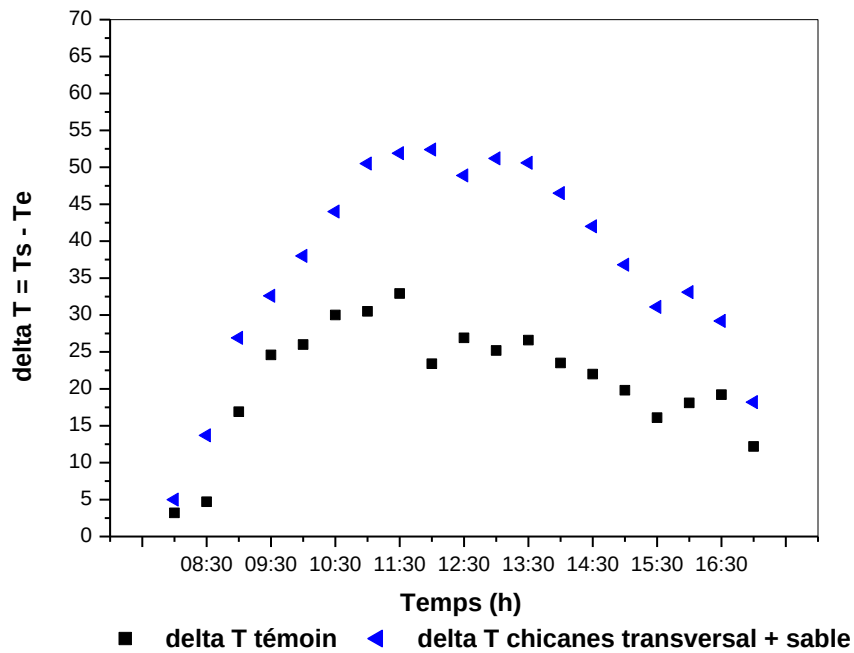


Figure (III.7b) : Forme de la différence de température des capteurs solaires.

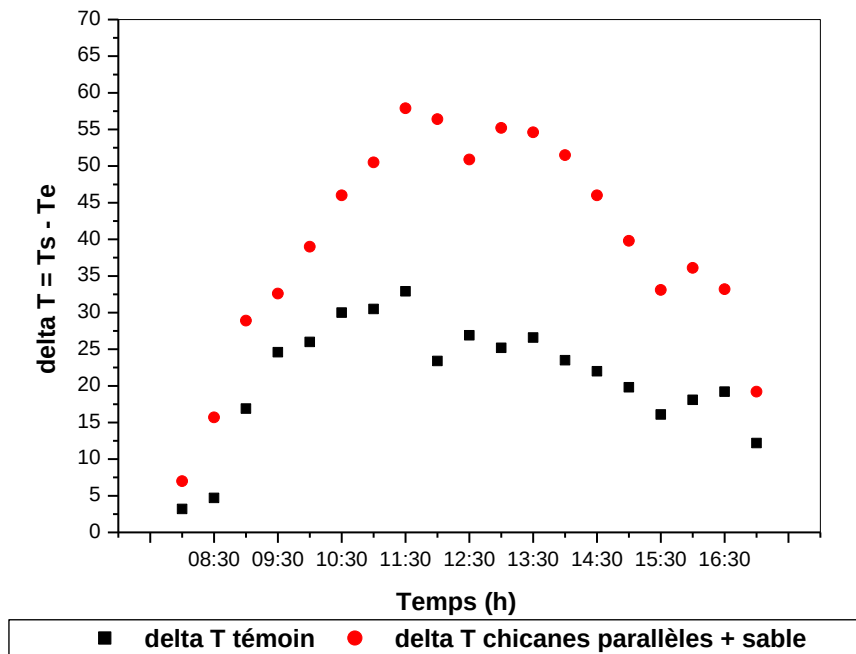


Figure (III.7c) : Forme de la différence de température des capteurs solaires.

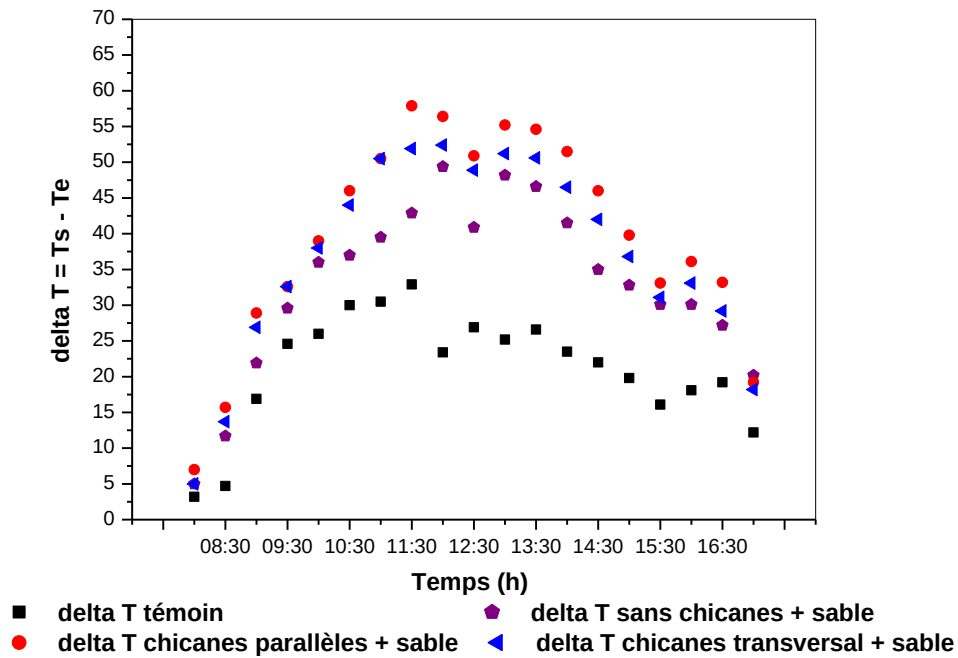


Figure (III.7d) : Forme de la différence de température des capteurs solaires.

III.5.4. Efficacité thermique des capteurs solaires

Dans cette partie nous présentons les résultats de l'efficacité thermique sous forme des graphes et des colonnes avec leurs interprétations.

Dans la figure (III.8), on note que l'efficacité thermique du capteur solaire avec sable et sans chicanes est supérieure à celle du capteur témoin. Le rendement thermique maximum pour le capteur sans chicanes (témoin) était de 40,68 % et la valeur minimale était de 8,5 % à 08h00 et le rendement thermique maximum pour le capteur sans chicanes + sable était de 68 % et la valeur minimale était de 13,29 % à 08h00

D'après la figure (III.8), on constate que l'efficacité thermique au niveau du capteur avec chicanes parallèle + sable et chicanes transversales + sable sont presque les mêmes, où le rendement thermique maximum pour le capteur avec chicanes parallèles +sable était de 80 % et la valeur minimale était de 18,62 % à 08h00, et le rendement thermique maximum pour le capteur avec chicanes transversales + sable était de 73,77 % et la valeur minimale était de 13,29 % à 08h00.

À travers les colonnes qui représente l'efficacité thermique de chaque capteur solaire; il apparaît que l'efficacité du capteur solaire avec chicanes parallèles + sable est la meilleure.

L'existence des chicanes homogénéise donc la distribution de la température suivant toute la veine fluide du capteur, ce qui permet d'augmenter le transfert de chaleur et par la suite améliorer le rendement du capteur solaire.

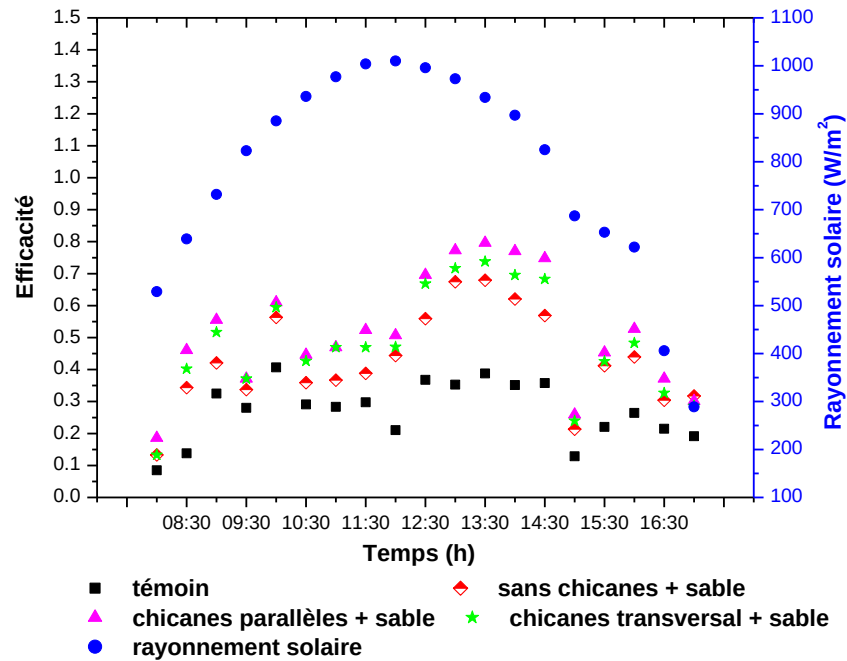


Figure (III.8) : Forme de l'efficacité thermique pour les tous capteurs solaires.

III.6. Conclusion

Après notre étude expérimentale du capteur solaire plan à air, qui s'incline d'un angle de 33° , nous avons enregistré les résultats des différences de température au niveau de chaque capteur, et compris la mesure du rayonnement solaire et de la vitesse du vent.

A travers les résultats, on constate que le capteur avec chicanes parallèles + sable est considéré comme le meilleur pour chauffer l'air que les autres capteurs :

- Capteur solaires avec chicanes transversales + sable.
- Capteur solaires sans chicanes et avec sable.
- Capteur solaires sans chicanes et sans sable.

Conclusion

generale

Conclusion generale

L'objectif de ce travail est de concevoir et réaliser un capteur solaire plan à air avec chicanes et additionné de 800 g de sable avec un diamètre de 0.125 mm.

Cette conception nous avons demandé beaucoup de temps, et notre conception a été élaborée et coûteuse de la part de certains des experts pour réaliser ,cette structure composée de quatre capteurs thermiques de dimensions 1 m x 0,5 m.

À partir de cette conception, nous avons mené notre étude expérimentale afin de comparer les composants du capteur et les courbes obtenues pour améliorer le rendement de capteur étudié avec ces données.

Nous avons mené plusieurs tests et expériences au cours des mois de mai et juin de cette année 2022, et le résultat qui a été atteint est un impact direct sur le niveau des capteurs solaires plans à air , en termes de rayonnement solaire global, de vitesse du vent et de sa température incontrôlable ; mais l'étude portait sur les composants du capteur solaire lui-même, les plus utiles pour découvrir certaines erreurs et les corriger au cours de l'expérience.

Et afin d'améliorer l'efficacité du capteur, nous devons choisir un couvercle en verre ordinaire d'une épaisseur de 3 mm et un absorbeur en aluminium d'une épaisseur de 2 mm.

Nous concluons de cette étude expérimentale que le rendement thermique du capteur avec chicanes parallèles + sable était supérieur de 91 % comparé avec du capteur sans chicanes (témoin).

Les résultats obtenus à partir des différents types de capteurs solaires considérés permettent de déduire que l'introduction des chicanes et le sable au niveau de l'absorbeur est un facteur important pour l'amélioration de rendement d'un capteur.

Au terme de ce à quoi nous sommes parvenus, c'est que nous proposons de poursuivre l'étude, toujours dans le but d'atteindre le capteur dont les performances sont optimales parmi les capteurs solaires plans à air proposés dans l'expérimentation, et dans ce cas nous jugeons de la préférence du capteur qui a une bonne performance

pour donner le résultat souhaité. En fin de compte, cela reste le sujet est soumis à des expériences pour l'améliorer par nos étudiants à l'avenir. Dieu est le conciliateur.

References

bibliographiques

References bibliographiques

- [1] **mohamed mogharbi, daoud halassa**. Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air. MEMOIRE de MASTER en Mécanique Énergétique, Université de Ouargla, 2011, pp 1.
- [2] **Nadir Nadia**. 2021. Approche théorique et expérimentale du séchage solaire des produits agroalimentaires. Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Kasdi Merbah-Ouargla, pp 1.
- [3] **Bouragbi Lakhdar**. 2008. Etude et amélioration du rendement de la conversion photothermique du capteur solaire. Thèse de Magister en Génie Mécanique, Université Badji Mokhtar –Annaba, pp. 19.
- [4] **kamelia, helali**. Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative, mémoire de magister en électrotechnique, Université de Tizi-Ouzou, 2012.
- [5] **Sellami mohamed hassen**, étude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ouargla), thèse de doctorat en sciences physiques option: physique énergétique, université d'Ouargla, 2014, pp 46, 47.
- **G. Menguy, M.Schwartz** ; le rayonnement solaire conversion thermique et Application. Paris. Vol. 55 (1980), pp 92-93.
- [6] **Sellami mohamed hassen**, Etude et amélioration des techniques de distillation solaire dans la région sud-est algérien (Ouargla), thèse de doctorat, université d'Ouargla, 2014.
- [7] **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [8] **A, H, Khedim**. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [9] **Z, Sen**. Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [10] **saadi souad**, effet des parametres operationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, mémoire de Magistère en physique, universite mentouri de constantine, 2010.
- [11] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz**. Le rayonnement solaire, conversion

thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).

[12] **J, A, Duffie; W, A, Beckman**. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).

[13] **A, Sfeir ; G, Guarracino**. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).

[14] **Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge**. Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).

[15] (F.Miguet et B.Paule, 1981).

[17] (A.Liébard, A.De Herde, 2005).

[18] (F. Harouadi et Al, 2007).

[19] Giovanni Tanda *, Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004), pp 229–243.

- **Arafakaddouri**, « Conception et réalisation d'un suiveur solaire à deux axes'' Mémoire de Projet de fin d'étude » Ingénieur d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdallah, 2015.

[20] **Lauger. A et Roger. A**, 1981, Les photopiles solaires techniques et documentation, Edition Français.

[21] **Mr bailek nadiem**, Etude et modélisation du flux solaire globale sur surface inclinée dans la région de touat, thèse de doctorat, sciences exactes université de sidi bel abbes, 2012.

[22] **HADJOU SMIR Hachmi, CHOGUEUR Amine**, (Etude technico-économique de l'irrigation par pompage solaire photovoltaïque, d'une palmeraie de palmiers. Etude de cas), Mémoire de Master, Université Tlemcene, 19/06/2018, pp 6.

[23] **M. Boubekri, A. Chaker et I. Zeghib**, «Contribution numérique à l'étude du rayonnement solaire incident sur un capteur plan pour le site de Constantine », Laboratoire de Physique Energétique, Université Mentouri, Constantine.

- [24] **MERAD Faiza**, Conception d'un programme de calcul du rayonnement solaire, cas particulier de la région de Mostaganem. mémoire de Magister en Physique, Université de Mostaganem, 2013.
- [25] (A.Liébard, A.De Herde.2005).
- **Djarallah.M**, 2008, Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique, Thèse de Doctorat en Science, université de Batna.
- [26] <https://www.fondation-lamap.org/fr/>
- [27] **Mr BAILEK Nadiem**, Etude et modélisation du Flux Solaire globale sur surface inclinée dans la région de Touat. Thèse de doctorat **2017-2018**.
- [28] Gisement solaire, <http://displace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf> (29/10/2017).
- [29] **Oudrane Abdellatif**, Contribution à la Modélisation et au Développement de Système de Chauffage Solaire à Usage Individuel, Thèse de Doctorat en Génie Mécanique, Ecole National polytechnique d'Oran-Maurice Audin, 2018.
- Activation thermique de la dalle béton-systèmes de chauffage et rafraîchissement
REHAU SA : Ambachtenlaan 22 – Ambachtszone Haasrode 3326 – 3001 Heverlee –
www.rehau.be.10/2010.
- [30] **Safa SKOURI**, « Contribution à l'Étude des Concentrateurs Solaires », Mémoire Docteur En énergétique, Mai 2016, École Nationale d'Ingénieurs de Monastir, Tunis, Laboratoire d'études des systèmes thermiques et énergétiques, Université de Monastir et Technopôle de Borj Cédria, Centre de recherches et de technologies de l'énergie, Laboratoire des procédés thermiques.
- [31] **Boudjelka Ammar, Guessoumi Farid**, (Commande d'un panneau solaire à l'aide d'un microcontrôleur ATMEGA), Mémoire de Master en Electricité, Université d'El-Oued, 2017/2018, pp 19,20.
- [32] **S. Bentouba, A. Slimani, M. S. Boucherit**, Revue des Energies Renouvelables 7, 109 (2007).

- [33] **S. Labeled**, Contribución al desarrollo de métodos para la electrificación rural fotovoltaica a gran escala. Thèse de doctorat. Universidad politécnica de madrid escuela técnica superior de ingenieros de telecomunicación, Madrid (2004).
- [34] **M. Salmi**, «Contribution à La Quantification De L'irradiation Solaire Globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques», Thèse de doctorat en Sciences, Université Ferhat Abbas de Sétif (2012).
- [35] <http://www.enerzine.com/1/235+algerie-le-nouvel-eldorado-solaire-energie+.html> (consulté mois du décembre 2010).
- [36] **R. Sellami, M. Abbas, H. Bendjebbas** , Installation et étude d'un chauffe-eau solaire couple a un cumulus pour alimenter la cuisine de l'udes en eau chaude, Rapport préliminaire. Centre de Developpement des Energies Renouvelables, Algérie (2007).
- [37] **Mohamed lakhdar louazene**, contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – application zone de Ouargla, Thèse de doctorat en sciences, université de Batna, 2015.
- [38] **Dr Mohamed-Khireddine Kholladi**, SIG pour le suivi de la remontée des eaux de la wilaya d'El Oued Souf, Université Mentouri de Constantine. Conference Paper · November 2005.
- <https://www.researchgate.net/publication/235438102>.
- [39] **Noun Mohamed Sedik**, Etude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire, Mémoire de Master en Génie mécanique énergétique, université-Annaba.
- [40] **A.K. Singh and al**; optimization of orientation for higher yield of solar still for a given location. Energy Conversion and Management. Vol.36 (1995), pp 175-187.
- [41] **D, K, Edwards**. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [42] **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [43] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz**. Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).

- [44] **Duffie JA, Beckman WA.** Solar engineering of thermal processes. New York:Wiley Interscience publications , NY,1980.
- [45] **Amel boulemtafes** épouse boukadoum, simulation numérique de l'amélioration du transfert thermique dans un capteur solaire à air, mémoire de magister en physique, université des sciences et de la technologie d'alger, 2010.
- [46] www.ines-solaire.com.
- [47] <https://fr.wikipedia.org/wiki>.
- [48] **Bounar islam et zaoui abderrahim**, (étude expérimentale évaluant l'effet de la poussière sur les performances des panneaux hybrides pv/t), mémoire de master, génie mécanique, université- jijel, 2018/ 2019.
- [49] <https://photovoltaïque-energie.fr>.
- [50] **S.Youcef-Ali**, Etude numérique et expérimentale des séchoirs solaires indirects à convection forcée : Application à la pomme de terre, Thèse de Doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2001.
- [51] **Mr. Zineddine Mohammed Salah et Mr. Bouchena Haroun**, Etude théorique d'un capteur solaire plan à air, Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme de Master en Physique, UNIVERSITE AHMED DRAIA -ADRAR-0221.
- [52] **Bouhediba Malika**, Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS), Mémoire de Master, Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2012.
- [53] **Mr. krouchi ghiles et Mr. ouachehi gaya**, (Etude et réalisation d'un concentrateur solaire cylindro-parabolique avec stockage d'énergie par chaleur latente), mémoire de master en génie mécanique, université mouloud mammeri de tizi ouzou, 2020.
- [54] <https://www.techno-science.net/definition/3360.html>
- [55] **ÖZTÜRK, H.H**, 1997. The Research on Storage of Solar Energy in Phase Change Material (PCM) for Greenhouse Heating. PhD Thesis, Ç.Ü. Institute of Natural and Applied Sciences, Adana. (In Turkish).
- [56] <http://ilmperso.univlyon1.fr/~asmiguel/teaching/Thermodynamique/thermo11.pdf>

- [57] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_018_06.pdf
- [58] **ababsa dalila**, Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives, mémoire de magistère en physique, université el-hadj lakhdar-batna, 2010.
- [59] **Bouguima adel abdelhadi et abbou kamel**, étude et réalisation d'un capteur solaire plan à eau, mémoire de master en génie mécanique, Université – Tlemcen, faculté de technologie, 2015.
- [60] A. BenKhelifa (1998).
- [61] S. Youcef-Ali (2005).
- [62] Ali M. El-Nashar (2006).
- [63] **Bouhediba Malika**, Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS), Mémoire de Master en Génie Mécanique, Université de Chlef, 2012, pp 37.
- [64] **Noun mohamed sedik**, étude des paramètres impactant sur le rendement d'un capteur solaire, mémoire de master, génie mécanique, université-annaba, 2017-2018, pp 64-67.
- [65] **P, H**, Communay. Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002).
- **G.iordanou**, flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic, thesis, university of durham, (2009).
- [66] **N, Bellel**. Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; Thèse de Magistère, Université de Constantine, 1989.
- [67] A.M. Lanjewar, J.L. Bhagoria and R.M. Sarviya, Heat transfer enhancement in solar air heater, Vol. 3 No. 8 (Aug 2010).
- [68] K. Sopian ^{a,*}, M.A. Alghoul ^a, Ebrahim M. Alfegi ^b, M.Y. Sulaiman ^a, E.A. Musa ^b, Evaluation of thermal efficiency of double-pass solar collector with porous–nonporous media, Renewable Energy 34 (2009) 640–645.

- [69] M.K. Mittal^a, Varun^{a,*}, R.P. Saini^b, S.K. Singal^b, Effective efficiency of solar air heaters having different types of roughness elements on the absorber plate, *Energy* 32 (2007) 739–745.
- [70] C.Choudhury,P. M. Chauhan And H. P. Garg, Performance And Cost Analysis Of Two-Pass Solar Air Heaters, Centre for Energy Studies, Indian Institute of Technology, Hauz Khas, New Delhi 110016, India, (Received 3 October 1994).
- [71] J.L. Bhagoria ^a, J.S. Saini ^{b,*}, S.C. Solanki ^b, Heat transfer coefficient and friction factor correlations for rectangular solar air heater duct having transverse wedge shaped rib roughness on the absorber plate, *Renewable Energy* 25 (2002) 341–369.
- [72] A. Abene ^{*}, V. Dubois, M. Le Ray, A. Ouagued, Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape, *Journal of Food Engineering* 65 (2004) 15–22.
- [73] BAA Y ousef NM Adam, Performance analysis for flat plate collector with and without porous media, *Alternative and Renewable Energy Laboratory*, Institute of Advanced T echnology , Universiti Putra Malaysia, Serdang, Malaysia.
- [74] Abdul-Malik Ebrahim Momin ^{a,*}, J.S. Saini ^b S.C. Solank^b, Heat transfer and friction in solar air heater duct with V-shaped rib roughness on absorber plate, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 45 (2002) 3383–3396.
- [75] Md.Yusof Theeran; Mohd. Yusof bin Hj. Othman; Baharudin bin Yatim; Kamarulzaman bin Sopian, Mohd. Hafidz bin Roslan and Azami Zaharim, Transient Analysis of Double Pass Solar Air Heater with Porous Media, 2nd WSEAS/IASME International Conference on RENEWABLE ENERGY SOURCES (RES'08) Corfu, Greece, October 26-28, 2008
- [76] Supattarachai Suwannapan, Suriya Chokphoemphun, Chinaruk Thianpong and Pongjet Promvong, Thermal Behavior in a Square Channel with Angled Ribs, The Second TSME International Conference on Mechanical Engineering 19-21 October, 2011, Krabi.

- [77] Pongjet Promvonge*, Chinarak Thianpong, Thermal performance assessment of turbulent channel flows over different shaped ribs☆, International Communications in Heat and Mass Transfer 35 (2008) 1327–1334.
- [78] K.R. Aharwal^{a,*}, B.K. Gandhi^b, J.S. Saini^b, Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater, Renewable Energy 33 (2008) 585–596.
- [79] K. R. Aharwal ¹, B. K. Gandhi ², J. S. Saini ², An experimental investigation of heat transfer and fluid flow in a rectangular duct with inclined discrete ribs, INTERNATIONAL JOURNAL OF ENERGY AND ENVIRONMENT, Volume 1, Issue 6, 2010 pp.987-998.
- [80] Thakur Sanjay Kumar¹, Vijay Mittal^{2*}, N. S. Thakur³ and Anoop Kumar⁴, Heat Transfer and Friction Factor Correlations for Rectangular Solar Air Heater Duct Having 60° Inclined Continuous Discrete Rib Arrangement, British Journal of Applied Science & Technology, 1(3): 67-93, 2011.
- [81] M.M.Sahu^a, J.L.Bhagoria^{b,*}, Augmentation of heat transfer coefficient by using 90° broken transverse ribs on absorber plate of solar air heater, Renewable Energy 30(2005)2057-2073.
- [82] Giovanni Tanda *, Heat transfer in rectangular channels with transverse and V-shaped broken ribs, International Journal of Heat and Mass Transfer 47 (2004) 229–243.
- [83] M. E. Taslim, H. Liu, A Combined Numerical and Experimental Study of Heat Transfer in a Roughened Square Channel with 45° Ribs, International Journal of Rotating Machinery 2005:1, 60–66.
- [84] Adisu Bekele, Manish Mishra, and Sushanta Dutta, Effects of Delta-Shaped Obstacles on the Thermal Performance of Solar Air Heater, Hindawi Publishing Corporation, Advances in Mechanical Engineering, Volume 2011, Article ID 103502, 10 pages.
- [85] **Yves JANNOT**, Thermique solaire, Mars 2011. pp 14.

[86] Application du SIG pour déterminer la qualité physico-chimique des eaux des forages destinées à l'aep dans la région du Souf, Mémoire de Master en hydraulique, Université d'El-Oued.2018.

ANNEXE A

ANNEXE A

Tableau climatique d'El Oued (ce contenu il faut être à l'annexe)

	Jan.	Fév.	Mars.	Avril.	Mai.	Juin.	Juil.	Aout.	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
Température moyenne (°C)	9.9	11.8	16.4	21	25.7	30.2	33.3	32.7	28.6	23.1	15.5	10.8
Température minimale (°C)	4.9	6.2	10	14.2	18.6	22.7	25.8	25.6	22.4	17.3	10.4	6.2
Température maximale (°C)	15.5	17.6	22.6	27.4	32.2	36.9	40.1	39.1	34.5	28.8	21	16.1
Précipitations (mm)	13	4	8	8	3	1	0	1	6	5	8	8
Humidité (%)	61	47	39	32	28	25	23	26	36	43	53	63
Jours de pluie (jrée)	2	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1
Heure de soleil (h)	8.8	9.6	10.5	11.5	12.4	12.9	12.7	12.0	11.1	10.1	9.2	8.6

Entre les mois le plus secs et le plus humides, l'amplitude de pluviométrie est du 13 mm.

Au cours de l'année, La température la plus basse et la plus élevée a une différence de l'ordre de 23.5 °C.

L'humidité relative la plus élevée est mesurée en Décembre (62.89%), la plus basse en juillet (23.01%).

Janvier (2.03 jours) a en moyenne les jours les plus pluvieux par mois, le moins de jours de pluie est mesuré en juin (0.20 jours).