

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

UNIVERSITE d'ADRAR
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER en PHYSIQUE ENERGETIQUE et ENERGIES RENOUVELABLES**

Thème

**Contribution au développement d'un capteur solaire
thermique plan**

Soutenu le 10/06/ 2019

Présenté par :

- Mlle Abid amel
- Mlle. Abderraouf Yamina

Membres de jury :

Président :	Mr. Rahmouni Mostafa	Univ. d'Adrar
Encadré par :	Dr .Manaa saadeddine	URER - Adrar
Examineur :	Dr. Arbaoui Iliace	Univ . d'Adrar

Année Universitaire : 2018/2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne populaire et démocratique
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°.....B.C/S.R.B//U.A/2022



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البيئوغرافي

الرقم... 114... م.م.ب.ب / ج.أ. 2022

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): مالح سعد الدين

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: contribution au developpement d'un capteur solaire thermique plan

من إنجاز الطالب(ة): عابد أمال

و الطالب(ة): عبد الرؤوف عبيدة

كلية: علوم وتكنولوجيا

القسم: علوم المادة

التخصص: فيزياء طاقة وطاقات متجددة

تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. وإمكانهم لإيداع النسخ الورقية (02) والإلكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

ادرار في: 2022/04/20

مساعد رئيس القسم:



ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.

A decorative border of yellow sunflowers surrounds the text. The sunflowers are in various stages of bloom, with some showing their dark brown centers and others as bright yellow petals. The background of the border is a dense field of smaller sunflowers.

Remerciement

Nous remercions ALLAH pour la bénédiction qui ne peut pas être comptée, et à partir de laquelle nous pouvons l'aider à accomplir ce travail. Nous remercions sincèrement le professeur Mr Abdelkader IDDOU et lui adressons nos sincères remerciements.

Qui ne nous a pas épargné de fournir sons expérience a chaque étape que nous passions et nous tenons chaque jour au plus près de nos conseils et guidés et encadreur était le sens du mot et était très gentil avec nous, malgré les difficultés que nous avons toujours encouragées, merci beaucoup.

Nous remercions également,

Les membres du jury de nous avoir fait l'honneur de juger ce mémoire veuillez acceptes l'expression de nous vive gratitude.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribue directement a la fin de notre travail a la fin de l'étude.

Sommaire

Liste des figures	Erreur ! Signet non défini.
Liste des tableaux	Erreur ! Signet non défini.
Introduction Générale.....	13

Chapitre I : Etat de L'art

I.1. Introduction :.....	3
I.2. Le système solaire [2]:	3
I.2.1. Généralités sur le soleil.....	4
I.2.1.1. Présentation générale	4
I.2.1.2. Le soleil source d'énergies :.....	4
I.2.1.3. Carte d'identité du soleil :.....	5
I.2.1.4. Spectre solaire [6]	5
I.2.1.5. Constitution du soleil : [7]	6
I.2.1.5.1. L'intérieur :	6
I.2.1.5.1. La photosphère :	6
I.2.1.5.2. Chromosphère :	6
I.2.1.5.3. La couronne :	6
I.2.1.5.4. Mouvements du soleil [8-10]	6
I.2.1.7. Les coordonnées célestes	7
I.2.1.7.1. Les coordonnées géographiques :	7
I.2.1.7.2.3. Les coordonnées horizontales:	7
I.2.1.8. Le rayonnement solaire [11-13].....	8
I.2.1.8.1. Le rayonnement solaire direct.....	9
I.2.1.8.2. Le rayonnement solaire diffus.....	10
I.2.1.8.3. Le rayonnement global.....	10
I.9. La constante solaire :	10
I.10. Les temps solaires :	11
I.10.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).....	11
I.10.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :	11
I.10.3. Le Temps Universel (T.U) :	11

I.10.4.Le Temps Légal (T.L).....	11
I.10.5. Le Temps Civil.....	12
I.11.Direction des rayons solaires par rapport à un plan : [15]	12
I.11.1.Aspects énergétiques du rayonnement solaire :	12
I.12. Etudes effectuées sur les capteurs solaires.....	13
I.12.1.Les Capteurs solaires [17].....	13
I.12.1.1.corps noire :.....	13
I.12.1.2.Effet de serre :.....	13
I.12. 2.Capteurs solaires thermiques [17].....	14
I.12.3.Capteurs à circulation de liquide [17]	14
I.12.3.1.Capteur plan (ou isolateur).....	14
I.12.3.2.Capteurs plan vitrés.....	14
I.12.3.3.Capteurs plans non vitrés	15
I.12.3.4. Capteurs plan à haute performance	15
I.12.3.4.1.Capteurs plans sélectifs	15
I.12.3.4.2. Capteurs plans sous vide	16
I.12.3.4.3.Capteurs à air [17].....	16
I.12.3.4.3.1.Différents types des capteurs solaires plans à air :.....	16
I.12.3.4.3.2. Capteurs à absorbeur plan :	17
I.12.3.4.3.3.Capteurs à absorbeur perméable :	17
I.12.3.4.3.4.Capteurs à absorbeur à géométrie variable	18
Chapitre II : Généralités et principes de fonctionnement des CS plan thermique	
II.1.Introduction	20
II.2. historique des capteurs Solaires thermiques :	20
II.3. Principaux types des capteurs solaire thermiques:	21
II.3.1. capteur sans vitrage :	22
II.3.2. capteurs plans vitrés :.....	22
II.3.2.1. Le coffre (ou boîtier) :	22
II.3.2.2.L'absorbeur :.....	23
II.3.2.2.1.L'efficacité de l'ailette F	23
II.3.2.3.Un circuit de fluide caloporteur :.....	24

II.3.2.4. L'isolation thermique :	24
II.3.2.5. La couverture transparente (généralement vitrage) :	24
II.3.3. capteurs sous vide :	25
II.3.3.1. Tubes sous vide à flux direct :	25
II.3.3.2. Tubes sous vide à caloduc :	25
II.4. Performances des capteurs :	26
II.5. Structure et principe de conception d'un capteur solaire plan à air	27
II.5.1. Le capteur solaire à air	27
II.5.2. Éléments constitutifs :	27
II.5.2.1. Surface absorbante :	27
II.5.3. Composants du capteur solaire à air	28
II.5.3.1. La couverture transparente	28
II.5.3.2. L'absorbeur	28
II.5.3.3. Le fluide caloporteur	28
II.5.3.4. L'isolant thermique	29
II.5.3.5. Le cadre	29
II.5.3.6. Absorbeur sélectif [25]	29
II.6. Les différents revêtements possibles :	29
II.6.2. Oxyde de chrome:	29
II.6.3. Traitement sous vide :	30
II.6.3.1. L'absorbeur	31
II.6.3.2. Le fluide caloporteur : [23]	31
II.7. Principe des échanges et fonctionnement d'un capteur solaire plan à air	33
II.7.1. Principe de captation du rayonnement solaire :	33
II.7.2. Capteur solaire à air plan simple	33
II.7.2.1. Échanges thermiques par rayonnement :	34
II.7.2.2. Échange thermique par conduction :	34
II.7.2.3. Échanges thermiques par convection :	34
II.7.2.4. Échange thermique par convection dû au vent :	34
II.7.2.5. Échange thermique par convection dû au fluide caloporteur :	35

Chapitre III : Etude numérique du capteur solaire à air

Introduction :	38
III.1. Système énergétique étudié	38
III.2. Rappel des différents modes des transferts thermiques à étudier :	39
III.2.1 Conduction [41].....	39
III.3. Modélisation de l'isolateur	41
III.3. 1. Méthode par tranches (Méthode pas à pas) [43]	41
III.3.2. Méthode globale [43]	42
III.4. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques Capteur solaire à air plan simple	43
III.5. Echanges thermiques par rayonnement	44
III.5.1 Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste.....	44
III.5.2. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre	45
III.5.3. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol.....	45
III.6. Puissance absorbée «Pab»	46
III.7. Calcul des coefficients des pertes	47
III.8. Calcul du rendement de CSP :	48

Chapitre IV: Résultats expérimentaux et discussions

IV.1. Introduction	50
IV.2. Evaluation et calculs des performances du capteur solaire :	50
IV.3. Les Mesures effectuées :	50
IV.3.1. Mesure du flux solaire :	50
IV.3.2. Mesure des paramètres climatiques :	51
IV.3.3. Mesure du débit d'air	52
IV.3.4. Mesure des températures	52
IV.4. Détermination expérimentale et calcul du rendement thermique du capteur solaire	52
IV. 5. Détermination expérimentale et calcul du rayonnement solaire incident :	52
IV.5.1. Calcul du rayonnement solaire reçu :	52
IV. 6. Variation de la température ambiante et celle du ciel :	53
IV.7. Variation de la température des différents éléments du capteur	55
IV.8. Variation de la puissance utile et la puissance absorbée	56

IV.9. Variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée.	57
IV.10. Evolution de la puissance utile (q_u) et de la puissance absorbée en fonction de la température de l'absorbeur (T_{ab}).....	57
IV.11. Variation de la température théorique et expérimentale du fluide caloporteur en fonction de la température de l'absorbeur	58
IV.12. Rendement thermique de l'isolateur	59
IV.12. Influence de l'épaisseur de la vitre sur le rendement instantané	60
IV.13. Influence de la température ambiante sur le rendement.....	62
IV. 14. Influence du rayonnement solaire incident	62
IV.15. Influence de la vitesse du vent	63
IV.16. Influence de la nature du matériau de l'absorbeur sur le rendement :.....	64
IV.17. Influence de la sélectivité.....	65
IV. 18. Influence de la température moyenne de l'absorbeur	65
IV.19. Influence de l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage sur le rendement ...	66
IV.20. Influence du débit d'air sur le rendement.....	66
IV.21. L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur	67
Conclusion générale	51
REFERENCES	50

Nomenclature

Symboles	Désignations	Unité
a	Angle azimutal du soleil.	
C_{pf}	Capacité calorifique du fluide à pression constante	[J/(kg.K)]
e_b	Epaisseur de la plaque isolantes arrière en bois	[m]
e_{pal}	Epaisseur de la plaque métallique isolantes interne	[m]
e_{pol}	Epaisseur de la plaque (couche) du polystyrène	: [m]
T	Température du fluide caloporteur	. [°C] ou [K]
I_o	Constante solaire	[W/m ²]
I_{oc}	Constante solaire selon une formulation simple	[W/m ²]
R	Constante des gaz parfaits	J/k.mol
ϕ	Flux de chaleur	W
λ_c	Conductivité thermique	en w/m.k
h_c	Coefficient de transmission par convection	W/m ² .K
T_p	Température la plus chaude (paroi)	K
T_∞	Température la plus froide	K
q_r	La quantité d'énergie rayonnée	W
I_{diff}	: Rayonnement diffus reçu au sol	[W/m ²]
I_{dir}	Rayonnement direct reçu au sol	[W/m ²]
I_g	Puissance du rayonnement reçue par une surface au sol	[W/m ²]
N	Nombre de vitrage	
L	Longueur du capteur plan à air	[m]
l	Largeur du capteur plans à air	[m]
T_c	Température équivalente du ciel	[°C] ou [K]
T_f	Température du fluide caloporteur	[°C] ou [K]
φ_a	Flux solaire absorbé du rayonnement solaire en	W/m ²
φ_p	Flux perdu par la paroi absorbante	W/m ²
φ_u	Flux utile transmis au fluide caloporteur	W/m ²
φ_{st}	Flux stocké dans le capteur	w/m ²
M_f	Masse en air du capteur	w/m ²

τ_V	Coefficient de transmission de la couverture transparente	%
α_A	Coefficient d'absorption de l'absorbeur en%	%
S	Surface de la paroi absorbante en m ²	m ²
E	Eclairement ou densité de flux au niveau du capteur	W/m ²
\dot{m}	Débit massique du fluide caloporteur	Kg/s.m ²
$\frac{1}{h_r}$	Résistance thermique par rayonnement du capteur	Ω
$\frac{1}{h_c}$	Résistance thermique par convection du capteur	Ω
$\frac{1}{h_d}$	Résistance thermique par conduction du capteur	Ω
$h_{r,c-v}$	Coefficient d'échange par rayonnement	W/m ² .°C
ε_V	Emissivité de la couche du verre	w/m ² .°C
σ	constante de Stefan-Boltzmann	w/m ² k ⁴
ε_p	L'émissivités de la couche de la plaque absorbante	%
ε_V	L'émissivités de la couche de la plaque absorbante	%
λ_i	Conductivité thermique du composant i	W/m.c
e_i	L'épaisseur du composant i	M
h_c	Coefficient d'échange par convection	W/m ² .°C
D	plus petite dimension géométrique du problème en m	M
λ_f	Conductivité thermique du fluide	W/m.°C
ρ_f	masse volumique du fluide en	kg/m ³
L	Longueur du capteur	M
G	Rayonnement solaire global incident	w/m ²
T_{fe}	: Température du fluide caloporteur à l'entrée du capteur	[°C] ou [K]
M	La masse du matériau de stockage	Kg
ΔT	La différence entre température finale et initiale	°C
T_{fs}	: Température du fluide caloporteur à sa sortie du capteur	[°C] ou [K]
c_{pf}	chaleur spécifique du fluide caloporteur	J/kg.°C
T_{fe}	Température du fluide entré	°C
T_{fs}	Température du fluide sortie	°C

T_{pm}	Température moyenne de la paroi absorbante	°C
λ	Conductivité thermique	w/m.k
U_v	Vitesse du vent	m/s
C_p	Chaleur spécifique	J/kg.k
L_s	Chaleur latente de fusion	J/kg
Q	Quantité de la chaleur	J
α_A	Coefficient d'absorption de l'absorbeur	%
τ_v	Coefficient de transmission de la vitre	%
h_c	Coefficient d'échange convective	W/m ² .k
S	Surface de la paroi solide	m ²
η	Rendement instantané du capteur plan	%
P_r	Nombre de Reynolds	-
N_u	Nombre de Nusselt	-
P_r	Nombre de Prandtl	-
G_r	Nombre de Graetz	-
T_v	Température de la vitre	°C
T_p	Température de la plaque absorbante	°C
h_{van}	Coefficient d'échange thermique par convection entre fluide et l'absorbeur	-
h_{vai}	Coefficient d'échange thermique par convection entre fluide et l'isolant	-
h_{vvn}	Coefficient d'échange par conduction entre la vitre et l'absorbeur	.
h_{rvc}	Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur	.



Introduction

Général

Introduction Générale

L'énergie est un besoin utile et indispensable à la vie quotidienne, la demande énergétique mondiale est en constante augmentation en même temps les ressources combustibles de la terre s'épuisent de jour en jour. Ainsi l'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit l'homme à s'intéresser de plus en plus à des sources d'énergies renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile. On s'est vite aperçu que l'énergie solaire, contrairement à une idée répandue, n'est pas tout à fait gratuite : son utilisation nécessite un investissement de départ souvent plus lourd que pour les sources d'énergie conventionnelles.

Les systèmes à énergie solaire sont devenus une source viable d'énergie renouvelable dans les deux ou trois dernières décennies, et maintenant ils sont employés couramment dans une série d'applications industrielles et domestiques. Ces systèmes appelés capteur solaire collectent le rayonnement solaire incident et le convertissent en électricité ou énergie thermique.

La conversion la plus réussie de l'énergie solaire reste celle en énergie thermique vu sa simplicité d'installation et son large domaine d'utilisation. Or l'étude du rayonnement solaire caractérisé par des modèles mathématiques est le point de départ de tout investissement dans le domaine de l'énergie solaire.

C'est dans cet axe que se situe notre travail, qui consiste en la description de différents modèles pour l'estimation de l'évolution du flux solaire et de la température ambiante au cours d'une journée. Ces deux derniers représentent des paramètres climatiques très importants qui influent sur le rendement d'un capteur. Ensuite, nous passons à la modélisation des différents types de capteurs solaires thermiques qui nous intéressent (capteur plan, capteur parabolique et cylindro-parabolique).

Nous développerons une application simulant le profil du flux solaire et de la température de sortie du fluide d'un capteur solaire tout en donnant à l'utilisateur le choix de différents modèles. Cette application sera réalisée en associant JAVA et MATLAB afin d'avoir, entre autres, une meilleure portabilité et maintenabilité ainsi qu'une précision et rapidité de calcul qui font la réputation de MATLAB.

Notre mémoire s'articule autour de deux parties :

La première partie est l'étude théorique, elle sera divisée en trois chapitres : dans le premier chapitre : nous définirons les principaux paramètres climatiques influant sur le rendement d'un capteur solaire ensuite nous exposerons de manière générale les capteurs solaires thermiques que nous étudierons tout au long du mémoire. Dans le deuxième chapitre nous abordons l'aspect théorique où nous donnons les modélisations mathématiques des capteurs, du flux solaire incident et de la température ambiante. Dans le troisième chapitre : à travers une recherche bibliographique on met en évidence l'orientation des recherches entreprises dont le but est l'optimisation de ces capteurs.

- La deuxième partie est axée sur l'aspect pratique de notre travail ou nous aborderons en un chapitre la conception et la réalisation du logiciel.

- Nous terminerons notre mémoire par une conclusion et des perspectives.

Chapitre I

Etat de l'art

I.1. Introduction :

Le soleil a une importance primordiale dans la vie des êtres vivants car il est à l'origine de leur survie sur terre en leur fournissant d'énormes quantités d'énergie permettant la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux produisant l'oxygène. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

Les systèmes énergétiques de production ou de transformation et de maîtrise des énergies, constituent l'un des secteurs industriels les plus complexes techniquement. C'est un secteur assez puissant pour le développement de l'économie nationale. Aujourd'hui on s'intéresse d'une part à rationaliser leur utilisation en adoptant des systèmes à la fois plus performants, portant moins atteinte à l'environnement et plus économiques. La part des énergies renouvelables dans la production d'énergies reste encore faible, 20 % du courant produit sur la planète est d'origine renouvelable. L'essentiel étant toujours issu des combustibles fossiles, tels que le pétrole ou le charbon (62,7%) et par l'énergie nucléaire (17,1%).

À elle seule, l'hydroélectricité génère 92,5% de l'électricité issue des énergies renouvelables. Les utilisations de la biomasse produisent 5,5% du courant mondial, la géothermie 1,5%, l'éolien 0,5 % et les techniques solaires y contribuent seulement pour 0,05%.

I.2. Le système solaire [2]:

Le Système solaire est composé du Soleil ainsi de tout ce qui gravite autour de celui-ci : les planètes et leurs satellites, les planètes naines, les astéroïdes, les objets de la ceinture de Kuiper et les comètes (figure 1).

On parle également de Système solaire lorsqu'on fait référence à un groupe de corps célestes orbitant autour d'une étoile (on parle alors de planètes extrasolaires). Dans cet article, le Système solaire représente le système incluant le Soleil et la Terre. Les dimensions du système solaire sont définies par rapport à la distance Soleil-Terre, que l'on appelle « unité astronomique » (UA). Une UA fait 150 millions de km. On estime que la distance entre le soleil et la frontière du système solaire (c'est-à-dire l'endroit où s'arrête le champ magnétique solaire et là où commence l'espace interstellaire) est d'environ 86 à 100 UA.



Figure I.1 : Le système solaire [3]

I.2.1. Généralités sur le soleil

I.2.1.1. Présentation générale

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. [2-3]

I.2.1.2. Le soleil source d'énergies :

Les énergies renouvelables sont des énergies d'origine solaire directe (solaire thermique et photovoltaïque), ou indirecte (hydraulique, éolienne, biomasse...), elles regroupent aussi les déchets de l'agriculture et de l'exploitation forestière, les déchets industriels et les ordures ménagères. Ces énergies sont inépuisables, propres, non polluantes et prometteuses, en plus elles sont abondantes (les gisements d'énergies renouvelables sont disponibles dans tous les pays du monde) et ont un impact limité sur l'environnement. On dénombre cinq énergies renouvelables : l'eau, la biomasse (bois et déchets), le vent, le solaire et la géothermie. Au total, les énergies renouvelables contribuent au bilan énergétique mondial de 19% des consommations d'énergie mondiales.

L'énergie solaire est fluctuante et instantanée. Pour dimensionner un système solaire il faut pour la région considérée définir le profil des fluctuations annuelles du rayonnement solaire en intensité et en qualité à partir d'une étude statistique.

Le soleil est considéré comme une sphère gazeuse composée d'hélium et d'hydrogène avec du carbone et d'autres éléments en très faible. Son diamètre est de 1391.10^3 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 21027 tonnes [1, 4]. Toute l'énergie du soleil provient des

réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie, ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance moyenne de 150.106 km du soleil.

I.2.1.3. Carte d'identité du soleil :

L'étude astrophysique du soleil conduit aux valeurs suivantes:

- Masse : 2.103 kg, soit 333432 fois celle de la terre
- Rayon : 7. 108 m, soit 109 fois celui de la terre.
- Densité du soleil: 1400 kg/m³
- Age de soleil: 4,7. 109 années.
- Puissance rayonnée par le soleil : 4.1023kw.
- Distance moyenne (d) à la terre : 149,6. 109 m, il faut de plus de 8mn pour que la lumière solaire nous parvienne. [5]

I.2.1.4. Spectre solaire [6]

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière : appelés photons.

L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ .

$$E = h \times \nu = h \times c/\lambda \dots\dots\dots(I.1)$$

- $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$: est la constante de Planck.
- $c = 3 \cdot 10^8 \text{m.s}^{-1}$: la vitesse de la lumière.
- ν : La fréquence. (S-1)

Pour une bande spectrale, de largeur $\Delta\lambda$, centrée sur la longueur d'onde λ , on mesure la puissance rayonnée ce qui fournit la puissance spectrale E appelée émit tance énergétique monochromatique. Celle-ci est donnée par mètre carré et micro- mètre ($\text{W/m}^2 \cdot \text{m}$). En faisant la somme des émit tances monochromatique sur tout le spectre, on obtient la constante solaire C^* .

On définit la quantité D_h par la formule suivante :

$$D_h = \frac{\int_0^\lambda E_\lambda d\lambda}{\int_0^\infty E_\lambda d\lambda} = \frac{\int_0^\lambda E_\lambda d\lambda}{C^*} \dots\dots\dots(I.2)$$

Cette quantité correspond à la fraction d'énergie émise par le soleil dans la bande spectrale $[0, \lambda]$. Cette grandeur est intéressante pour connaitre la puissance rayonnée dans une bande spectrale $[\lambda_1, \lambda_2]$ donnée. Il suffit pour cela d'écrire :

$$\int E_\lambda d\lambda = C * (D_{\lambda_2} - D_{\lambda_1}) \dots\dots\dots(I.3)$$

Des mesures expérimentales ont permis de dresser le tableau **I-1**, pour une longueur d'onde, l'émission énergétique monochromatique E ainsi que la quantité D .

I.2.1.5. Constitution du soleil : [7]

C'est une sphère non homogène dans laquelle on peut distinguer 3 zones principales : l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et couronne solaire.

I.2.1.5.1. L'intérieur :

C'est la source d'énergie du soleil, il est composé de $2/3$ d'hydrogène et $1/3$ d'hélium. La température atteint de l'astre 15.10^6K .

I.2.1.5.1. La photosphère :

C'est la couche gazeuse qui enveloppe le soleil .elle est responsable de presque la totalité du rayonnement que la terre reçoit.

Elle est mince d'environ 300km, et de pression de 10^{-2} atmosphère et une densité de 10^{-8}g/cm^3 .

I.2.1.5.2. Chromosphère :

Elle surmonte la photosphère .c'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire dont l'épaisseur ne dépasse pas 800km et sa température est de 10^4k .

I.2.1.5.3. La couronne :

C'est une auréole blanche irrégulière sans limite définies, son épaisseur est de l'ordre de 3.10^6 km .

I.2.1.5.4. Mouvements du soleil [8-10]

La figure 2 représente le mouvement annuel de la terre autour du soleil dans un plan appelé plan écliptique. Le nom d'écliptique provient du fait que la lune doit être dans ce plan pour qu'une éclipse se produise.

Ce mouvement annuel de la terre donne l'impression que le soleil se déplace, au cours de l'année, sur un grand cercle de la sphère céleste appelé cercle écliptique :

Le cercle écliptique coupe le cercle équatorial en deux points γ et γ' ; le point γ , appelé point vernal, indique la direction dans laquelle un observateur terrestre verra le soleil le jour de l'équinoxe de printemps.

L'axe des pôles terrestres P et P' fait avec l'axe des pôles Q et Q' de l'écliptique un angle ϵ dont la valeur est égale à $23^\circ 27'$.

Cette révolution fait varier les durées relatives du jour et de la nuit au rythme des saisons limitées par les deux équinoxes et les deux solstices (voir figure 2)

- Equinoxe de printemps correspond au 21 Mars

- Equinoxe d'automne correspond au 23 Septembre
- Solstice d'été correspond au 22 Juin
- Solstice d'hiver correspond au 22 Décembre.

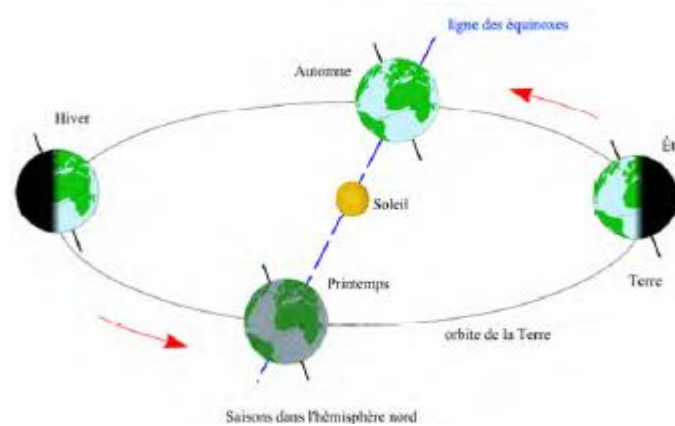


Figure I.2. Mouvement apparent du soleil

2.1.7. Les coordonnées célestes

2.1.7.1. Les coordonnées géographiques :

2.1.7.1.1. La longitude L : est comptée positivement vers l'Est et négativement vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich.

1.2.1.7.1. La latitude Φ : permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère Nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère Sud.

1.2.1.7.2. Les coordonnées horaires :

1.2.1.7.2.1 La déclinaison δ : c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^\circ 27'$ à $-23^\circ 27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$\delta = 23,45 \cdot \left[\frac{284 + N}{365} \cdot 360 \right]$$

N : le numéro du jour dans l'année compte à partir du 1er Janvier.

1.2.1.7.2.2. L'angle horaire ω : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° .

1.2.1.7.2.3. Les coordonnées horizontales:

1.2.1.7.3.1 L'azimut as : ou l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

1.2.1.7.3.2 La hauteur h : ou l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

On appelle quelquefois distance zénithale le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante :

$$\sin (a.) \cos (h) = \cos (\delta) \sin (\omega) \tag{I.4}$$

$$\cos (a.) \cos (h) = \cos(\delta) \cos(\omega) \sin(\Phi) - \cos (\Phi) \sin (\delta) \tag{I.5}$$

$$\sin (h) = \cos (\Phi) \cos (\delta) \cos (\omega) + \sin (\Phi) \sin (\delta) \tag{I.6}$$

I.2.1.8. Le rayonnement solaire [11-13]

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10 les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8µm [11].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une temps correspondant pas à la réalité physique [12].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau I.2

Tableau 1. Répartition spectrale du rayonnement thermique [7]

Longueur d'onde (µm)	0-0,38	0,38-0,78	0,78
Pourcentage %	6,4	48	45,6
Energie (W/m²)	87	656	623

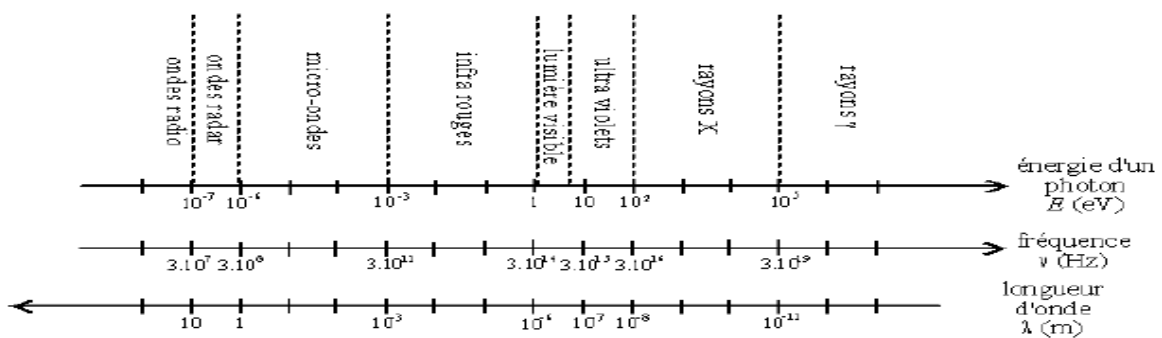


Figure I.3. Spectre solaire

* La constante solaire

C'est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [13].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [7]

$$C^* = C^*_0 + 0.033 * \cos(0.948 * n)$$

C^* : la constante solaire.

$C^*_0 = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [6].

n : le numéro du jour de l'année.

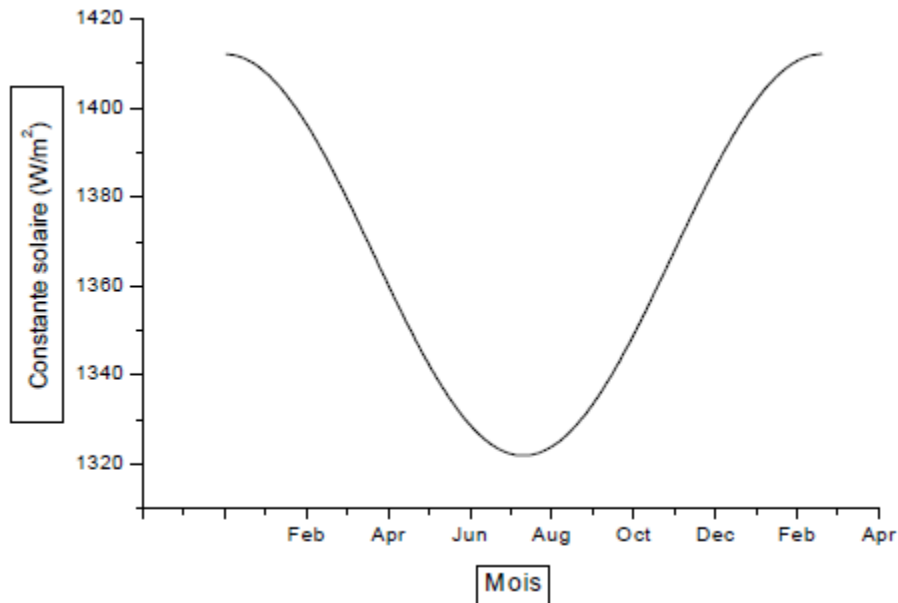


Figure I. 4. Variation mensuelle de la constante solaire [7]

I.2.1.8.1. Le rayonnement solaire direct

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d'un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [12].

L'état du ciel est défini par deux coefficients, a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique du lieu où se trouve le capteur solaire (tableau I.3).

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par :

$$\tau_{\text{dir}} = a \cdot \exp\left(\frac{-p \times b}{1000 \times \sinh}\right)$$

Où:

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

Tableau 2. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [11]

	Ciel pur	Conditions normales	Zone Industrielle
a	0,87	0,88	0,91
b	0,17	0,26	0,43

Dans le tableau suivant on présente la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Tableau 3. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [11]

Altitude	0	500	1000	1500	2000	5000

P (mbar)	1000	950	900	850	800	500
----------	------	-----	-----	-----	-----	-----

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par [10] :

$$G_{dirh} = C^* \cdot \tau_{dir}$$

G_{dirh} : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique G_{dir} reçu sur un plan incliné est donné par [13]:

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos \theta$$

θ : angle d'incidence des rayons solaires.

I.2.1.8.2. Le rayonnement solaire diffus

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voute céleste [12].

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est [13]:

$$\tau_{dif} = 0,271 - 0,2939 \cdot \tau_{dir}$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par [13]:

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2}$$

$$G_{dif1} = G_{dirh} \times \frac{1 + \cos(i)}{2}$$

$$G_{dif2} = alb \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \times (G_{difh} \times \sin(h) + G_{difh})$$

G_{dif1} , G_{dif2} : rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

Alb : albédo du sol.

i: angle d'inclinaison du plan du capteur par rapport à l'horizontale.

I.2.1. 8.3. Le rayonnement global

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct [12]:

$$G = G_{dir} + G_{dif}$$

I.9. La constante solaire :

La valeur du rayonnement solaire " I_e ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻².

En première approximation, on peut calculer la valeur de "Ic" en fonction du numéro du jour de l'année "nj" par la relation suivante [14] :

$$I_c = I_0[1 + 0.033 \times \cos(0.984 \times nj)] \quad (I.7)$$

I.10. Les temps solaires :

I.10.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil w. Il est donné sous la forme suivante [15] :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (I.8)$$

ω : En degré.

Si $\omega = 0$, TSV=12h.00

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

I.10.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M) :

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [15] :

$$Et = TSV - TSM \quad (I.9)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]}$$

Où: $N' = (nj - 81) \times 360/365$

Où : nj est le numéro du jour dans l'année.

I.10.3. Le Temps Universel (T.U) :

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time) [15]:

$$TU = TSM - (L/15) \quad (I.10)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

I.10.4. Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [15] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.11)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.10.5. Le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [15].

I.11.Direction des rayons solaires par rapport à un plan : [15]

On considère un plan quelconque situé dans un lieu de latitude F caractérisé par deux angles :

α : L'angle entre le méridien local et la normale au plan.

$\alpha = 0$; le plan est orienté vers le Sud.

$\alpha = \pi$; le plan est orienté vers le Nord.

$\alpha = -\pi/2$; le plan est orienté vers l'Est.

$\alpha = \pi/2$; le plan est orienté vers l'Ouest.

γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$; le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$; le plan est vertical

Soit :

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires.

n : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

i : L'angle d'incidence (n, N)

$$\vec{N} = \begin{cases} \sin(\alpha) \cdot \cos(h) \\ \cos(\alpha) \cdot \cos(h) \\ \sin(h) \end{cases} \quad \vec{n} = \begin{cases} \sin(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \cdot \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{cases}$$

I.11.1.Aspects énergétiques du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes...).

Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope [16]

I.12. Etudes effectuées sur les capteurs solaires.

I.12.1. Les Capteurs solaires [17]

Définition :

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique, la chaleur reçue de cette conversion est utilisée soit directement (cas de Chauffage), soit elle-même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire des cycles Thermodynamique. Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, ce dernier arrive au niveau du couvert et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noir, appelé absorbeur. L'absorbeur absorbe une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé.

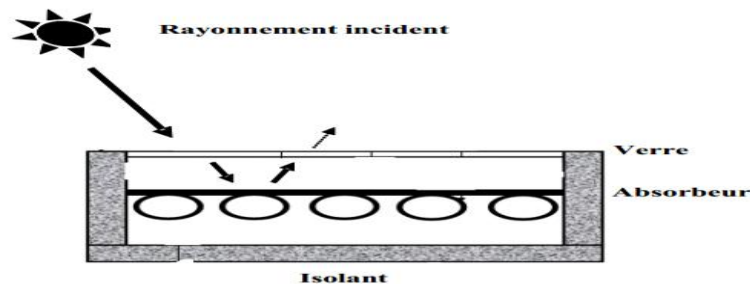


Figure I.5 : schéma d'un capteur solaire

I.12.1.1. corps noir :

On appelle corps noir toute matière qui absorbe de façon idéale la totalité de la lumière qu'elle reçoit, c'est la raison pour laquelle nous le choisissons pour capter la lumière solaire.

I.12.1.2. Effet de serre :

Certains matériaux laissent passer une gamme étendue de longueurs d'onde, alors que le verre est transparent seulement au visible et au proche infrarouge. Entourant un corps noir d'une cage de verre, la lumière traversant le verre chauffe le corps noir et la porte à une température de 30° à 100°C environ.

Ce corps noir faiblement chauffé va donc émettre dans l'infrarouge pour lequel le verre est opaque, l'infrarouge piégé dans la cage va retourner au corps noir contribuant ainsi un échauffement ; c'est l'effet de serre.

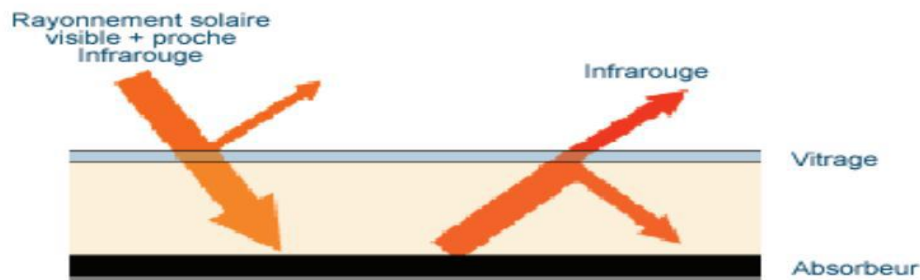


Figure I.6: L'effet de serre dans un capteur solaire

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires :

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire plan thermique.

I.12. 2.Capteurs solaires thermiques [17]

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :

- Capteurs à circulation de liquide.
- Capteurs à air.

Dans notre étude nous avons un prototype de capteur plan à air donc nous nous intéressons aux capteurs solaires à air.

I.12.3.Capteurs à circulation de liquide [17]

Ce sont des capteurs où le fluide caloporteur qui circule à travers un circuit solaire c'est un liquide (eau, huile, un fluide thermique, antigel).

Les capteurs solaires à circulation de liquide les plus répandus sont :

- les capteurs plans.
- les capteurs à concentration.

I.12.3.1.Capteur plan (ou isolateur)

Il existe trois types de capteurs solaires plans :

- Capteurs plans vitre.
- Capteurs plans non vitre.
- Capteurs plans à haute performance.

I.12.3.2.Capteurs plan vitrés

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement

transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement.

Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré. Figure (I.5).

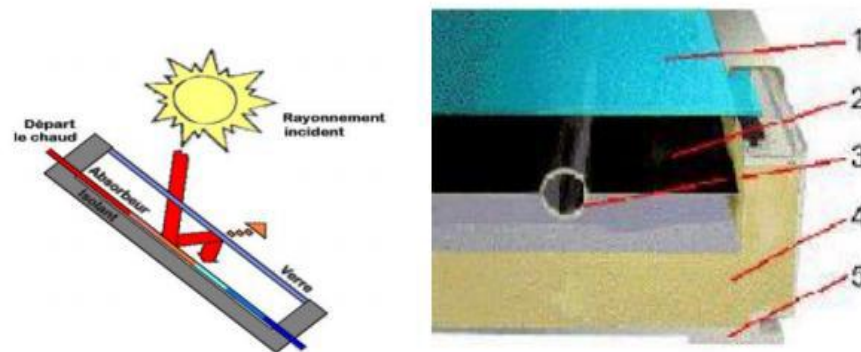


Figure I.7: Coupe d'un capteur solaire plan vitré [17]

- 1- Un ou plusieurs couverts transparents,
- 2- Une plaque absorbante,
- 3 - Un circuit hydraulique pour l'évacuation du fluide,
- 4 - Une isolation thermique,
- 5- Un bac portant le tout.

I.12.3.3. Capteurs plans non vitrés

Ce capteur est le plus simple que l'on puisse imaginer, son application usuelle est le chauffage de piscine en plein air, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres.

I.12.3.4. Capteurs plan à haute performance

I.12.3.4.1. Capteurs plans sélectifs

Chaque par exemple Certains absorbeurs ont un revêtement sélectif dont la propriété est d'émettre qu'une faible portion de l'énergie absorbée (7 à 20%). Pour la plupart des capteurs ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome. L'absorbeur sélectif améliore le rendement du capteur. Cette particularité est d'autant plus intéressante pour des climats froids et pour des applications nécessitant des températures importantes (eau) figure (I.6).

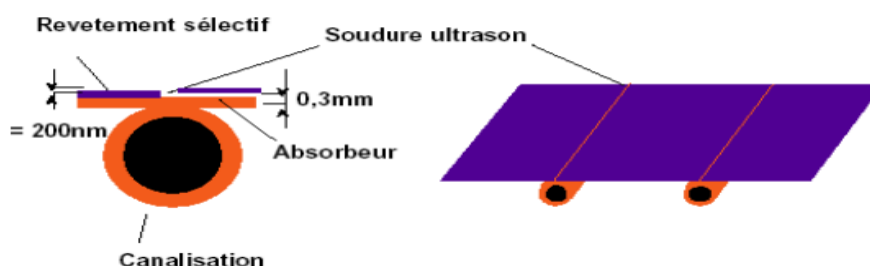


Figure I.8: Absorbeur et revêtement sélectif

I.12.3.4.2. Capteurs plans sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif.

Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration. Voir Figure (I.7).

On distingue trois types de tubes sous vides :

Tubes sous vides à flux direct.

Tubes sous vides à caloduc.

Tubes sous vides type « Sydney ».



Figure I.9 : Capteur sous vide

I.12.3.4.3. Capteurs à air [17]

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur. Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide.

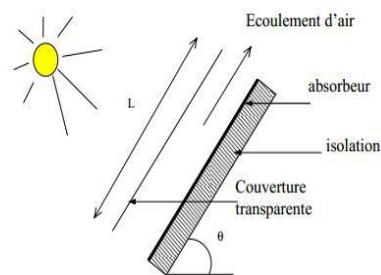


Figure I. 10 : Capteur plan à air

I.12.3.4.3.1. Différents types des capteurs solaires plans à air :

Les types de capteurs solaires sont très divers même si leur composition reste approximativement le même [18].

On distingue trois grandes catégories de capteurs plans à air :

- 1- capteurs à absorbeur plan.

- 2- capteurs à absorbeur perméable.
- 3- capteurs à absorbeur à géométrie variable.

I.12.3.4.3.2. Capteurs à absorbeur plan :

L'absorbeur est une plaque en tôle plane, leur variété réside dans le nombre des veines d'écoulement d'air.

On distingue quatre types des capteurs selon leurs modes d'écoulement :

- Type 1 avec écoulement d'air au-dessus de l'absorbeur.
- Type 2 avec écoulement en dessous l'absorbeur.
- Type 3 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur de même sens.
- Type 4 avec l'écoulement des deux côtés de l'absorbeur au sens contraire.

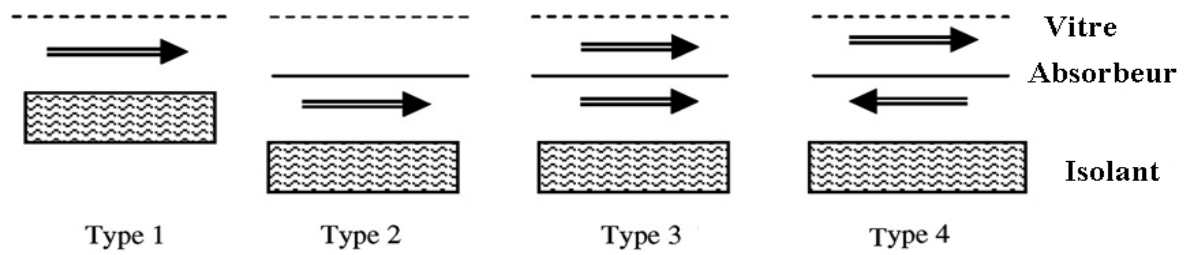


Figure I.11- Les types génériques principaux d'écoulements [19]

I.12.3.4.3.3. Capteurs à absorbeur perméable :

L'amélioration du rapport surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur consiste à utiliser un absorbeur poreux.

On peut utiliser à cet effet du tissu noir, de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés, de la laine d'acier ou des assemblages de lamelles.

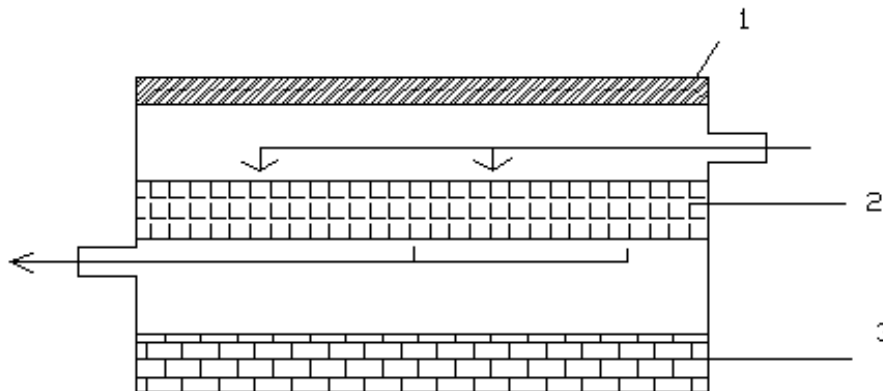


Figure I.12- Capteurs à absorbeur perméable [20]

- 1-vitre.
- 2-absorbeur poreux.
- 3-isolant.

I.12.3.4.3.4. Capteurs à absorbeur à géométrie variable

Si l'on veut utiliser le vitrage comme une garde pour réduire les pertes de chaleur il faut que le transfert de chaleur ait lieu entre le dos de l'absorbeur et l'air l'absorbeur constitue alors la paroi frontale du canal d'air et le revêtement intérieur de l'isolation constitue le fond du canal on peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et a la face interne de l'isolation, soit en donnant a l'absorbeur une surface striée ou rainurée.

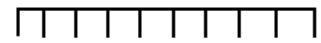
Les formes les plus utilisées sont les suivants :



Absorbeur en forme V



Absorbeur en forme U



**Absorbeur à ailettes
droit**

Figure I.13. Différents type d'absorbeur [21].

Chapitre II

Généralités et principes de fonctionnement des
CS plan thermique

II.1.Introduction

Un capteur solaire est destiné à convertir le rayonnement incident en énergie thermique à basses et moyennes températures et à la transférer au fluide caloporteur donc il est concédé comme l'élément moteur de n'importe quelle chaîne énergétique. La technologie de ces systèmes est simple : Elle se repose sur le pouvoir absorbant d'une surface traitée, l'absorbeur. Le capteur solaire combine deux principes physiques : les effets de serre et celui du corps noir. La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [22]:

- 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 [22]. Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur et les pertes de chaleur par ces différentes faces [23], [24].

II.2. historique des capteurs Solaires thermiques :



Saussure
(1740-1799)

Horace Bénédict de Saussure (1740-1799) :

Ce physicien suisse est considéré comme l'inventeur de la « boîte chaude » en 1767. Il s'intéressa à l'effet de serre au moyen de vitrages superposés et de ce fait son invention est considérée, à juste titre d'ailleurs, comme le précurseur du capteur solaire plan. Nous aurons l'occasion de lui rendre hommage plus loin, notre réalisation n'étant qu'une version améliorée de sa « boîte chaude ».[25]



Joseph Fourier
(1768-1830)

Joseph Fourier (1768-1830) :

Mathématicien et physicien français Il aborde la notion de chaleur obscure que nous dénommons de nos jours sous le terme d'ondes infrarouges. Il décrit parfaitement le fonctionnement du capteur plan décrit dans cet ouvrage et précise le rôle du vitrage dans la création de l'effet de serre et la capture des calories solaires.[24]

Parmi les travaux scientifiques portant sur la caractérisation et l'étude des performances des capteurs solaires, on peut citer les travaux suivants :

En 1942 : la théorie des capteurs, établis par HOTTEL et WOERTZ , depuis, d'autres d'étude ont été faites notamment celle portant sur la modélisation relative à différences configurations de capteurs solaire thermique.

En 1986 : M. MERZOUK, au centre d'études nucléaires et solaires étudie la contribution à la détermination des performances théoriques et expérimentales des capteurs solaires sous vide en régime permanent. On peut citer aussi l'étude effectuée, la même année par N. KASBADJI, au CNR de Padoue en Italie, qui porte sur l'étude théorique et expérimentale de trois capteurs solaires en régime permanent.[26]

En 1990 : SEMMAR. D contribue à l'étude et la conception d'un capteur solaire à air pour la production d'air chaud au sein du CDER. Il définit un certain nombre de règles et de critères pour les systèmes utilisant l'air comme fluide caloporteur.[26]

En 2001 : D.LAFRI étudie dans le cadre d'un magister les performances d'un chauffe –eau solaire pour prévoir le comportement thermique de l'eau dans la cuve de stockage. Il conclue qu'avec une capacité de stockage élevée, le rendement des systèmes solaire croit.[26]

En 2014: Vincent Qinglong invente nouvelle génération de capteur plan à concentration.[26]

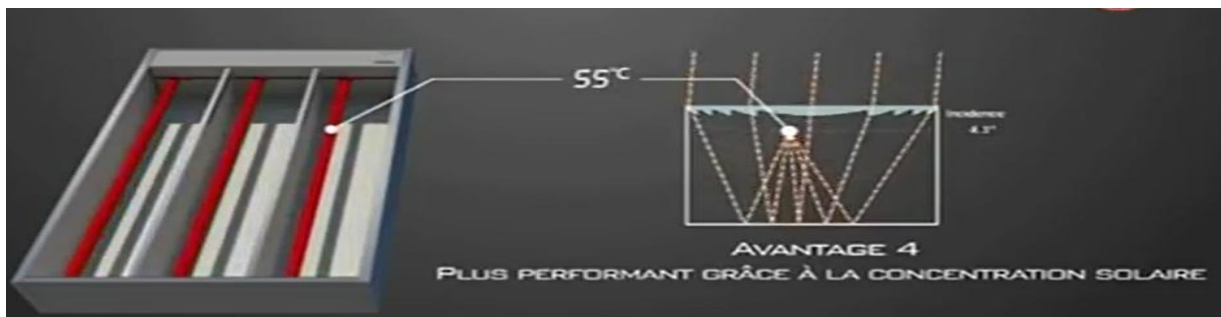


Figure II.1: capteur thermique à concentration.[27]

II.3. Principaux types des capteurs solaire thermiques:

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur.

Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, par courue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur Pour limiter les déperditions par conduction.

Différentes configurations conduisent à des types de capteurs distincts, dont les performances varient en fonction des domaines d'utilisation [28].

II.3.1. capteur sans vitrage :

Egalement appelé « **capteur moquette** », il est constitué de réseau de tubes Noires, généralement en matière plastique souple de type élastomère, l'EPDM (Éthylène propylène diène monomère) [29].

Il est utilisé pour des eaux ne nécessitant pas une température supérieure à 30°C (l'eau de piscine par exemple).

Ce type de capteur est facile à intégrer, on peut le posé sur le sol (à proximité de la piscine) ou sur la toiture. Le rendement du capteur moquette est très bon pour produire des températures proches de la température de l'air ambiant.

II.3.2. capteurs plans vitrés :

C'est Les capteurs munis d'une couverture transparente, ils sont les plus utilisés (figure 2-1). Les principaux éléments constituant un capteur plan sont :

- Le coffre (ou boîtier)
- L'absorbeur
- Un circuit de fluide caloporteur
- Un isolant thermique sur la face arrière
- La couverture transparente (généralement vitrage)

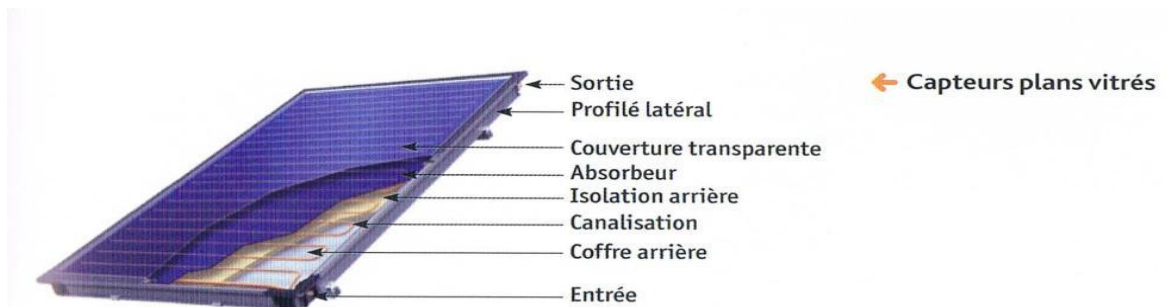


Figure II.2 : capteur plan vitre

II.3.2.1. Le coffre (ou boîtier) :

Il assure la protection à l'arrière du capteur et participe à sa rigidité. Les matériaux les plus utilisés, pour constituer le fond du coffre, sont le métal (tôle d'acier pré laquée ou aluminium) et les matériaux plastiques [ABS (poly(Acrylonitrile-Butadiène-Styrène)), polyester]. Ils doivent présenter les caractéristiques suivantes : bonne tenue à la corrosion, faible prix de revient, transformation facile.

II.3.2.2.L'absorbeur :

C'est le composant qui permet de transformer le rayonnement solaire en chaleur et de transférer l'énergie thermique ainsi produite à un fluide caloporteur (voir figure 2-2(b)). Le matériau le plus utilisé est le cuivre, car il possède une bonne tenue à la corrosion et sa conductivité thermique est élevée.

L'absorbeur peut être considéré comme une juxtaposition d'ailettes (figure 2-2(b)).

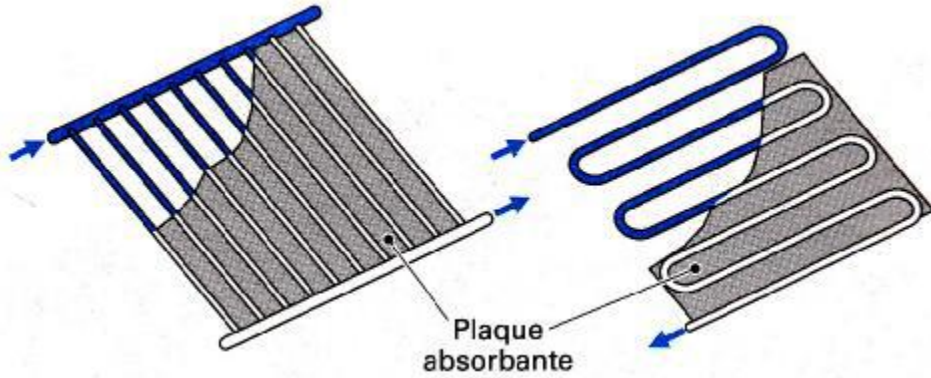
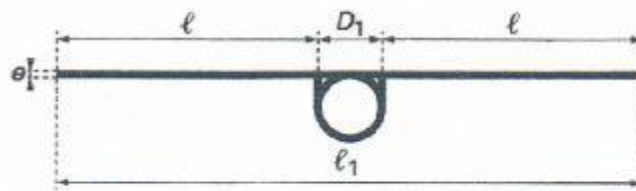


Figure II.3 (a) : Absorbeurs sous forme d'échelle et de serpentins [29]



- e épaisseur de l'absorbeur
- D_1 diamètre extérieur du tube
- l largeur de l'ailette
- l_1 largeur de l'ailette double

Figure II.4 (b) : vue en coupe d'une ailette

II.3.2.2.1.L'efficacité de l'ailette F

L'augmentation des surfaces des échanges influents positivement sur le rendement des capteurs, pour cette raison on ajoute des ailettes

Les ailettes sont des géométries distinguées, pour cela on calcule le facteur de forme comme suite:

$$F = \frac{\text{th} \left[\left(\frac{l_1 - D_1}{2} \right) \sqrt{\frac{k}{\lambda * e}} \right]}{\left(\frac{l_1 - D_1}{2} \right) \sqrt{\frac{k}{\lambda * e}}} \dots \dots \dots \text{(II. 1)}$$

Avec :

K : pertes globales du capteur

λ : Conductivité du matériau constituant l'absorbeur

Lorsque l'absorbeur fonctionne à des températures moyennes (vers 70°C), les pertes par rayonnement deviennent importantes ; afin de les limiter on recouvre l'absorbeur généralement par un revêtement (sélectif) de dépôts électrolytiques à base de « chrome noir », de « nickel noir » ou de titane. On arrive à accroître le coefficient d'absorption α (qui voisinera 1) et à affaiblir le coefficient d'émission ε (qui voisinera 0,2). Plus rarement, on utilise l'acier inoxydable, ou l'absorbeur est constitué de deux feuilles planes qui après déformation, sont soudées en leur périphérie et par points dans la partie centrale. Le fluide circule entre ces deux parois et évacue l'énergie thermique. On désigne parfois ces absorbeurs par « à lame d'eau ».

II.3.2.3. Un circuit de fluide caloporteur :

La chaleur absorbée est véhiculée par le bief de fluide caloporteur, qui est généralement de l'eau (eau glycolée pour éviter le gel) ou de l'air. Ce fluide circule soit dans une canalisation, canaux ou nappes.

II.3.2.4. L'isolation thermique :

Elle est nécessaire afin d'éviter les déperditions par conduction (à l'arrière et sur les parties latérales de l'enveloppe du capteur). La mousse de polyuréthane est fréquemment utilisée, combinée parfois avec une couche de laine minérale en contact avec l'absorbeur. Pour des températures élevées on utilise que les mousses phénoliques, peu courantes et chères, et les laines minérales (laine de verre et surtout laine de roche qui présente l'avantage de ne pas absorber l'humidité).

II.3.2.5. La couverture transparente (généralement vitrage) :

Elle a la double fonction de passer le maximum de rayonnement solaire et d'éviter le refroidissement de l'absorbeur, en réduisant les phénomènes de convection de l'air et en bloquant le rayonnement infrarouge (effet de serre). Les matériaux les plus utilisés sont le verre trempé (pour réduire les risques d'accident en cas de bris). On notera également l'utilisation de vitrage à basse teneur en oxyde de fer, ces vitrages présentent des caractéristiques optiques légèrement supérieures aux vitrages standards. L'espace entre la couverture transparente et l'absorbeur se situe dans une fourchette de 25 à 40 mm. Un espace plus important favoriserait les pertes thermiques par effet de convection.

II.3.3. capteurs sous vide :

L'utilisation de ce type est très favorable dans le cas où la température de fonctionnement requise est très élevée ($>100^{\circ}\text{C}$), ou lorsque la température ambiante est faible (région de montagne). On distingue deux types :

II.3.3.1. Tubes sous vide à flux direct :

Il est constitué d'une série de tubes de verre dans lesquels passe un autre tube collecteur de chaleur. La paroi des tubes est double, comme celle d'une bouteille thermos, et on y fait le vide afin de limiter les pertes Thermiques par convection.

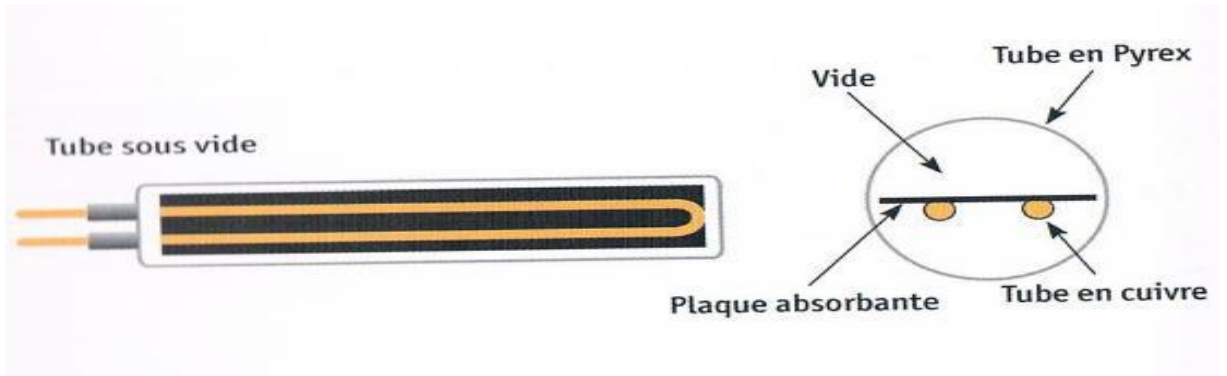


Figure II.5: principe du capteur sous vide à flux direct

L'effet thermos obtenu permet d'obtenir un meilleur rendement. On notera aussi que les pertes de puissances par convection et conduction sont quatre fois moins que pour un capteur plan dans les mêmes conditions de température extérieure.

II.3.3.2. Tubes sous vide à caloduc :

Dans les tubes sous vide à caloduc, le tube de l'absorbeur contient une petite quantité de liquide (fluide organique, alcool...).

Sous l'action du rayonnement solaire, le liquide se transforme en vapeur qui monte en haut du tube ou elle se condense au contact de l'échangeur et transfère la chaleur au fluide caloporteur.

Les tubes doivent impérativement être inclinés (figure 2-4). Le principal avantage d'un système à caloduc en regard du précédent est de pouvoir remplacer un tube défectueux sans avoir à démonter l'ensemble du capteur [30].

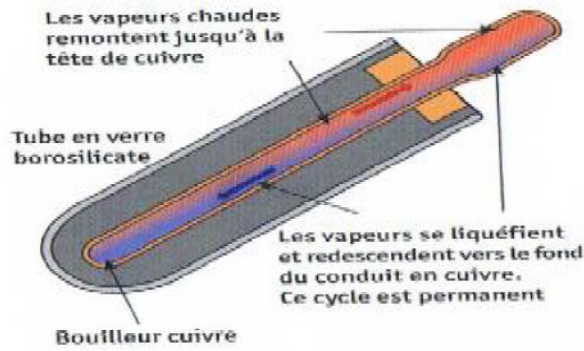


Figure II.6 : principe d'un capteur sous vide à caloduc

D'un point de vue thermique, les capteurs sous vide ont l'avantage de pouvoir monter en température rapidement, ainsi qu'un très bon rendement, notamment du fait d'un coefficient K plus faible que les capteurs plans. Bien qu'ils soient plus chers à l'achat, leur domaine d'application est plus large, surtout la possibilité de produire du froid par absorption.

II.4. Performances des capteurs :

On a vu précédemment que chaque type de capteur correspond à des Domaines d'utilisation particulière. Pour caractériser les performances d'un capteur, des essais normalisés (norme : NF EN 12975-2) ont été fait, pour établir la représentation graphique de la figure (2-5), ainsi qu'avoir l'équation suivante simplifiée du rendement d'un capteur [29].

$$\eta = \beta - K \frac{T_m - T_a}{w} - \acute{K} \frac{(T_m - T_m)^2}{w} \dots\dots\dots(\text{II.2})$$

Avec

T_m : température moyenne de l'absorbeur [°C]

T_a : température ambiante dans l'environnement du capteur [°C]

W : puissance de l'irradiation solaire mesurée dans le plan du Capteur [W/m²]

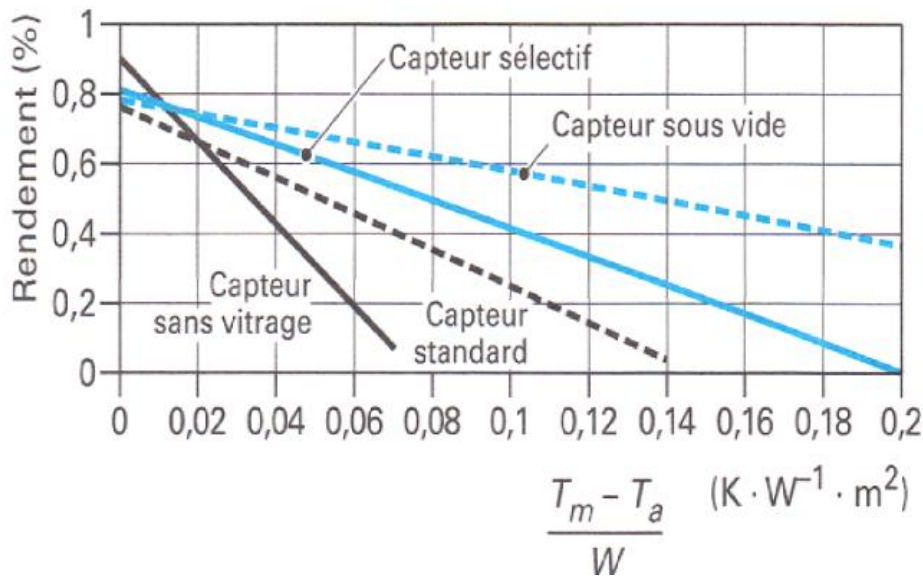


Figure II.7 : Courbe caractéristique des rendements des capteurs [29].

Dans la pratique, le coefficient K' étant très faible, il est souvent négligé et un capteur solaire est caractériser par les coefficients :

B : l'ordonnée à l'origine

K : la pente de la droite caractérisant le capteur

Ce sont ces deux coefficients qui sont utilisés pour calculer les installations utilisant des capteurs solaires

II.5. Structure et principe de conception d'un capteur solaire plan à air

II.5.1. Le capteur solaire à air

Un capteur à air (figure. II.7) est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est l'air, Il est constitué d'une surface de couleur foncée absorbant la chaleur et d'une surface transparente.[31]

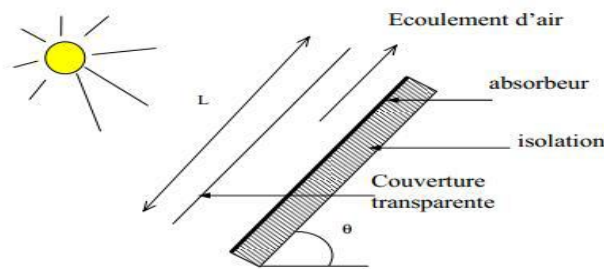


Figure II.8: Capteur plan à air

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :

- une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire et transmette au fluide caloporteur.
- une isolation thermique arrière est latérale.
- une couverture transparente généralement en verre à simple ou double vitrage qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en protégeant de vent. [23]

II.5.2. Éléments constitutants :

Les éléments constitutants sont :

II.5.2.1.Surface absorbante :

Son rôle est de transformer le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde en chaleur. En chauffant, l'absorbeur va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelée facteur d'émission infrarouge ϵ ou émissivité. L'émission E d'une surface à la température T s'écrit :

$$E = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \dots\dots\dots(II.3)$$

Où σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5.67.10^{-8} w/ m^2 .k^4$).

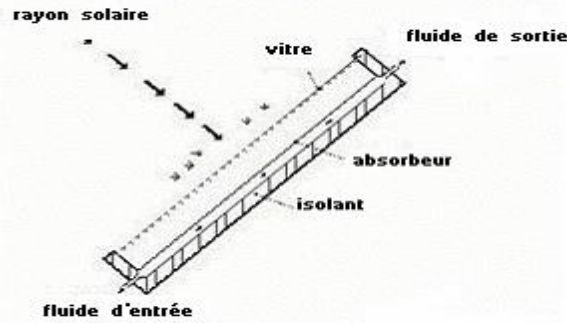


Figure II 9: schéma descriptif d'un capteur plan

Le tableau ci-dessous présente les caractéristiques thermo-physiques de quelques matériaux utilisés comme absorbeurs.

Tableau 1 : Caractéristique thermo-physiques de quelques matériaux métalliques [32]

Métal	Conductivité thermique $\lambda = (w/m.k)$	Chaleur massique $c_p=(J/kg.k)$	Masse volumique $\rho = kg/m^3$	Diffusivité thermique $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$ $\times 10^{-6} m^2/s$
cuivre	384	398	9800	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
aluminium	204	879	2700	86

II.5.3. Composants du capteur solaire à air

II.5.3.1. La couverture transparente

L'intérêt d'une couverture transparente (verre) habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70 °C que on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement.[33]

II.5.3.2. L'absorbeur

Plaque plane en métal (cuivre ou acier), Il a pour absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes, il doit être douée d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible.[33]

II.5.3.3. Le fluide caloporteur

L'air pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante.[33]

II.5.3.4. L'isolant thermique

Une ou plusieurs couches isolant (la laine de verre, polystyrène), pour limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur.[33]

II.5.3.5. Le cadre

Le cadre doit résister aux agressions des conditions extérieures, aux contraintes intérieures et aux chocs éventuels lors du transport et du montage. Il doit donc être solide, tout en étant le plus léger possible. Le cadre du capteur est en aluminium ou en acier. Le cadre des capteurs intégrés en toiture est protégé des intempéries et peut ainsi être valablement réalisé en bois.[29]

II.5.3.6. Absorbeur sélectif [25]

Une surface qui a un coefficient d'absorption élevé est un bon absorbant du rayonnement solaire, en général à une haute émit tance à l'infrarouge, une peinture noir mat qui absorbe 96% de l'énergie solaire sera également irradient d'une grande partie de l'énergie sous forme de chaleur qui dépend de la température de l'absorbeur et la vitre. Idéalement, une surface sélective et celle qui absorbe toutes les longueurs d'onde solaire et qui n'émette aucune des longueurs d'onde de chaleur, de sorte que plus de chaleur pourrait être transférée au fluide de travail, car une telle surface, $\alpha = 1$ et $\varepsilon = 0$. Les absorbeurs sélectifs fabriqués peuvent être approche de cet idéal.

II .6 . Les différents revêtements possibles :

II.6.1. la peinture noire: la peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption α compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission ε lui est très élevé (0,85) [25]



Figure .II.10- peinture noire sur absorbeur [31]

II.6.2. Oxyde de chrome:

Le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique son coefficient d'absorption α est de 0,95 et son coefficient d'émission ε de 0,12 à 0,18.

II.6.3. Traitement sous vide :

Ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par sa couleur bleu marine, ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, ...) sur la surface absorbante en présence du vide.

Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ϵ , inférieur à 0,05.

Tableau 2. Différents traitements de surface [34]

Revêtement	Absorption :	Emission : ϵ
Peinture noire	0.9-0.95	> 0.85
Black chrome	0.95	0.12a 0.18
Dépôt sous vide	> 0.95	< 0.05

Actuellement le procédé de revêtement sous vide a pris une grande place sur le marché grâce :

- à ses performances.
- à sa faible consommation en énergie lors de la fabrication (1 kWh par m2 d'absorbeur, c'est à dire moins de 10% de l'énergie nécessaire pour les autres revêtements)
- à son respect au niveau écologique (pas de dégagements de gaz ou solides, pas de pollution de l'eau).

On donne un tableau pour les valeurs de ϵ et α pour les matériaux absorbeur les plus utilisés dans les capteurs solaires plan:

Tableau 3. Le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ϵ pour les supports les plus utilisés comme absorbeur [35]

Support et traitement	α	E
Acier nickel noire sur nickel	0.95	0.07
Acier et chrome noire sur nickel	0.95	0.09
Acier et chrome noire	0.91	0.07
Cuivre et chrome noire	0.95	0.014
Acier et galvanisé et chrome noire	0.95	0.016
Cuivre et cuivre noire	0.88	0.015
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08
Aluminium d'oxyde de manganés	0.70	0.08
Acier et couche organique sur chrome noire	0.94	0.20
Peinture noire époxy	0.95	0.018
Peinture blanche époxy	0.25	0.19

II.6.3.1. L'absorbeur

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [23].

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [31]:

➤ Les avantages sont :

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

➤ Les inconvénients sont :

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

II.6.3.2. Le fluide caloporteur : [23]

Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit primaire de capteur solaire a pour rôle de véhiculer la chaleur cédée par l'absorbeur, différents fluides peuvent être utilisée mais doit satisfaire à des certains conditions :

- 1-Grande capacité calorifique.
- 2-Faible viscosité.
- 3-Coefficient de transfert thermique élevé.
- 4-Haute point de d'ébullition est bas point de congélation.
- 5-Degré d'agressivité faible devant les matériaux constituant le capteur Les fluides caloporteurs plus utilisée sont :

II.6.3.2.1. l'air

L'air comme agent de transport de calories a un grand avantage par son abondance et sa gratuité, est par l'absence des problèmes de gel et de corrosion ce qui donne au capteur une grande durée de vie est moins de travaux d'entretien.

Mais pour transporter une quantité raisonnable d'énergie il faut utiliser des volumes d'air très importants.

II.6.3.2.2. l'eau

Un excellent fluide caloporteur pour sa chaleur massique mais le risque de gel pendant les nuits d'hiver et le risque d'ébullition en cas haute température pose des problèmes.

La naissance des couches de tartre dans les canalisations au fil de temps diminue la quantité de chaleur échangées.

II.6.3.2.3. Les gilotherms

Des liquides organiques à base de poly phényles hydrogénés ou d'hydrocarbures linéaires traités pour ne pas présenter les mêmes défauts que l'eau, leur chaleur massique est 0,5Kcal/Kg.K. Ces hydrocarbures se détériorent en présence des traces d'eau ou d'air et combustibles à haute température.

II.6.3.3. La couverture transparente

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre. Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse.

L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C [36], en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, en effet :

Soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. A la surface de la terre, le rayonnement solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R pour lequel la transmissivité de la vitre est faible ne pouvant ainsi s'échapper et qui sera en partie absorbé par la vitre qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle-même s'échauffe [31], [37].

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

II.6.3.4. L'isolation thermique

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

- Partie avant de l'absorbeur la lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5

cm .En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [31].

- Parties arrière et latérale

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures, sinon, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [31], [26], [38].

II.7. Principe des échanges et fonctionnement d'un capteur solaire plan à air

II.7.1. Principe de captation du rayonnement solaire :

Le capteur solaire plan à air transforme le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie thermique utilisable, par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (air, eau, sel fondu....) [26], La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur. [39] le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure suivante :

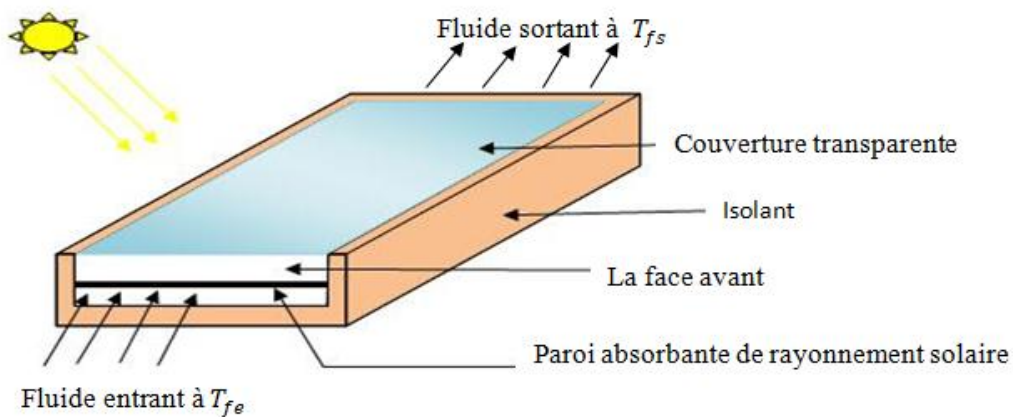


Figure II.11 : Schéma de principe du capteur solaire plan à air [24]

II.7.2. Capteur solaire à air plan simple

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert que nous appellerons capteur plan simple peuvent être schématisés comme indiquée sur la figure [23].

$$hc=2.8+3.UV \dots\dots\dots(I.6)$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle β , une autre relation est établie par **Stultz** et **Wen** définie par [26] :

$$hc=1.(Tv-Ta \cdot \cos\beta)^{13}+2.658.Uv \dots\dots\dots(I.7)$$

C'est cette dernière relation qui intervient dans notre modèle numérique, car elle tient compte de l'effet de l'inclinaison du capteur.[28]

II.7.2.5 Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur :

Au cours de la circulation du fluide caloporteur dans la conduite du capteur, ce dernier échange la chaleur par convection avec la couche du verre et de la plaque absorbante. Cet échange dépend de la géométrie des parois, de la vitesse de l'écoulement, des dimensions de la conduit.[11], Le coefficient d'échange thermique par convection est déterminé à l'aide de la relation suivante donnant le nombre de **Nusselt** :

$$Nu = D \frac{hc}{\lambda_f} \dots\dots\dots(II.8)$$

➤ Écoulement laminaire : **Re < 2100**

- $Gr < 100 \Rightarrow Nu = 3.66 + 0.085.(1 + 0.047.Gr^{32})$
- $Gr > 100 \Rightarrow Nu = 0,116.Gr^{13} + 0,87.Gr.(1 + 0,045.Gr^{13})$

➤ Ecoulement transitoire : **2100 < Re < 104**

$$Nu = 0.116.(Re^{23} - 125).(1 + (DHL)_{32}.Pr^{13})$$

➤ Ecoulement turbulent : **Re > 104**

$$Nu = 0.018.Re^{0.8}.Pr^{0.4}$$

Avec $Re = Pf.DHL.V_f$

$$Pr = \mu_f \lambda_f . C_p$$

$$Gr = Re Pr DHL$$

Re, Pr, Gr : sont respectivement le nombre **Reynolds**, nombre de **Prandlt** et le nombre de **Gratetz**.

Chapitre III

Etude numérique du capteur solaire

à air

Introduction :

La partie modélisation est consacrée à l'écriture des équations mathématiques des transferts et échange thermiques qui se trouve dans les parties de notre collecteur, aussi de proposer des simplifications dans le but de diminuer le nombre des inconnues.

III.1. Système énergétique étudié

Le système étudié se compose de deux sous-systèmes, le premier sous système est un capteur solaire à air de forme géométrique plane. Il joue le rôle d'un moteur d'énergie thermique transmise au second sous système qui est une chambre de séchage qui reçoit cette énergie sous forme d'une chaleur calorifique transportée par un fluide caloporteur (air).

Notre étude s'appuie sur le premier sous-système figures (1.a et 1.b) qui se compose d'une couverture transparente en verre, sous laquelle se trouvent une lame d'air immobile et une plaque métallique (peint en noir mat) comportant des chicanes pour assurer une absorption maximale du rayonnement solaire. Cette plaque joue le rôle d'un absorbeur-convertisseur car elle absorbe les rayons solaires et les transforme en énergie calorifique transmise au fluide caloporteur. Une plaque d'aluminium placée au-dessus de l'isolant en polystyrène et la structure de soutien en bois rouge BH.

Le deuxième sous système est une chambre de séchage constituée de six claies et équipé d'un système de ventilation. Dans laquelle l'air arrive de bas en traversant les six claies et sera évacué à l'extérieur à l'aide d'un ventilateur centrifuge.

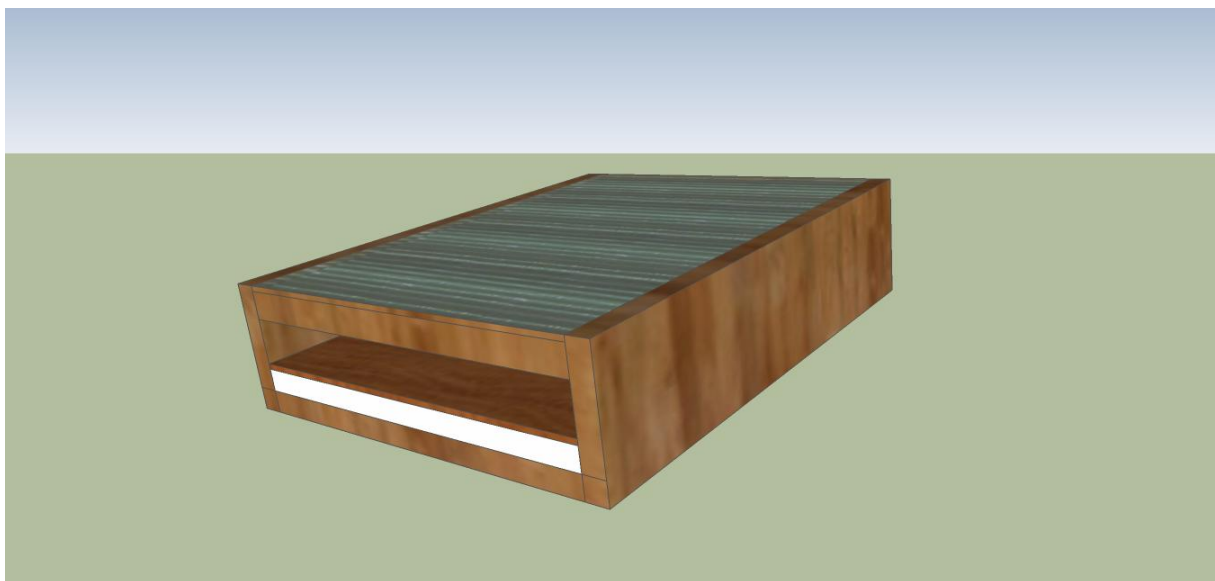


Figure III.1: vue d'ensemble du capteur réalisé

Tableau 1. Propriétés thermo-physiques des différents composants d'un capteur [40]

Matériaux	Propriétés physiques					
	Masse volumique		Conductivité thermique		Chaleur spécifique	
	Symbole	Valeur	Symbole	Valeur	Symbole	Valeurs
Verre	ρ_V	2500	λ_V	0.81	c_V	840
Polystyrène	ρ_p	700	λ_p	0.320	c_p	2310
Acier inoxydable	ρ_{Ai}	7850	λ_{Ai}	15	c_{Ai}	460

III.2. Rappel des différents modes des transferts thermiques à étudier :

III.2.1 Conduction [41]

La conduction représente le processus de propagation de la chaleur par le contact direct entre les particules du corps dont les différentes parties ne sont pas isothermes. Dans les solides diélectriques la conduction se fait par les ondes élastiques (les phonons) et dans les solides conducteurs électriques par la diffusion des électrons ou porteurs de charge mobiles en parallèle avec les ondes élastiques. Dans les liquides en l'absence de convection la conduction de la chaleur se fait également par l'intermédiaire des ondes élastiques. Dans les gaz en l'absence de convection, la conduction s'effectue par la diffusion moléculaire.

S'exprime alors par l'équation fondamentale suivant

➤ **Loi de Fourier : [42]**

$$P = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}T} \quad (\text{w}) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

- p : flux de chaleur.
- λ : coefficient de conductivité thermique.
- S : surface d'échange, et parfois noté aussi A.

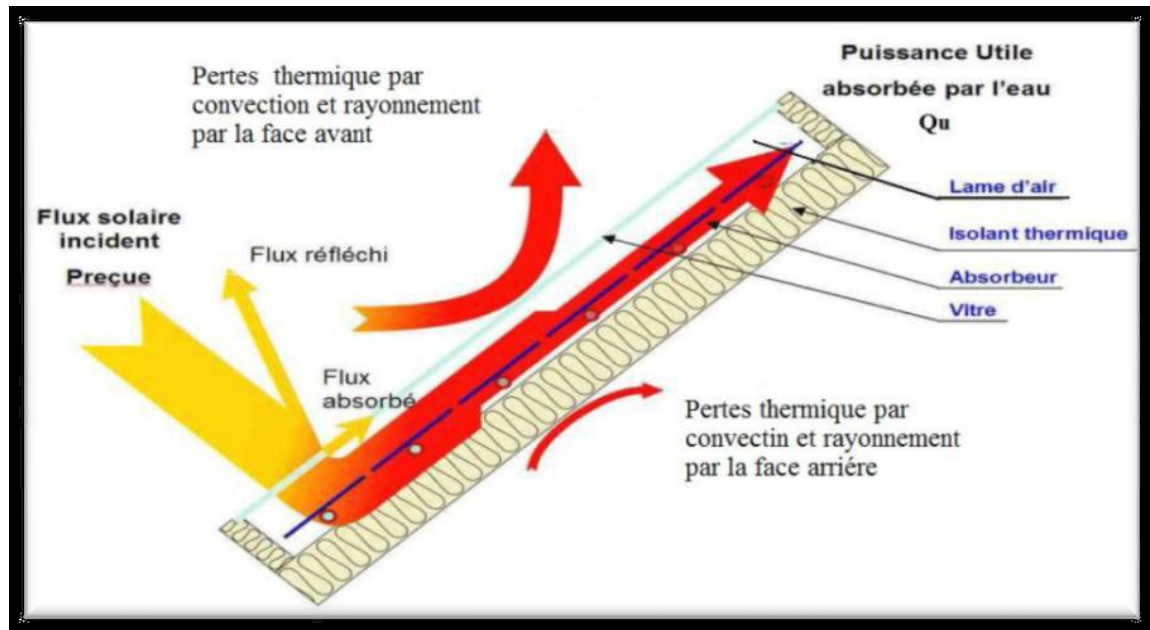


Figure III.2: Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré

2.2 Convection : [41]

La convection se réfère aux transferts thermiques qui ont lieu dans les fluides en mouvement macroscopique. Le transfert thermique est déterminé par le mouvement des particules élémentaires de fluide entre les zones ayant des températures différentes. Ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides qui échangent de l'énergie sous forme de chaleur et de quantité de mouvement entre elles.

On distingue :

- 2.2.1. **la convection naturelle** : qui a comme origine le mouvement produit par les différences de densité entre les particules chaudes et celles qui sont froides dans un fluide situé dans un champ de pesanteur. En général le fluide chaud est moins dense et a tendance à s'élever dans le champ de pesanteur.
- 2.2.2 **la convection forcée** : pour laquelle le mouvement de fluide est causé par l'action des forces extérieures (pompes, ventilateurs). La convection forcée est en général accompagnée par de la convection libre.

Dans tous les fluides visqueux, il existe une couche de fluide limite adhérente à la paroi et le transfert de chaleur à travers cette couche se fait par conduction. S'exprime alors par l'équation fondamentale suivant :[42]

$$P = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad \text{(III.2)}$$

III.3. Modélisation de l'insolateur

III.3. 1. Méthode par tranches (Méthode pas à pas) [43]

La méthode consiste à découper l'insolateur en tranches fictives de longueur Δ_x dans le sens l'écoulement du fluide caloporteur et a' écrire les bilans des chaque tranche .il est commode pour cela d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité .la figure 6.1.2.1.schématise les transferts thermique qui interviennent dans l'isolateur décrit sur la figure 6.1.1.1et la figure 6.1.2.2 présente le schéma électrique relatif à une section dans la section d'indice j. l'application de la loi d'ohm ou réseau électrique conduit aux équations suivantes :

$$\frac{M_v C_{Pv} (T_{ve}(j) - T_{ve}^*(j))}{D_t \cdot S_{urF}} = P_v + h_{r.vc} (T_c - T_{ve}(j)) + h_{vv} (T_a - T_{ve}(j)) + h_{cv} (T_{vi}(j) - T_{ve}(j)) \quad (III.3)$$

$$\frac{M_v C_{Pv} (T_{vi}(j) - T_{vi}^*(j))}{D_t \cdot S_{urF}} = h_{cv} + (T_{ve}(j) - T_{vi}(j)) + h_{rvn} (T_n(j) - T_{vi}(j)) + h_{vvn} (T_n(j) - T_{vi}(j)) \quad (III.4)$$

$$\frac{M_n C_{Pn} (T_n(j) - T_n^*(j))}{D_t \cdot S_{urF}} = h_{rvn} + (T_{vi}(j) - T_n(j)) + h_{rvn} (T_{vi}(j) - T_n(j)) + h_{van} (T(j-1) - T_n(j) + h_{rni} + T_{ii}(j) - T_n(j) + P_n) \quad (III.5)$$

$$\frac{M_1 C_{Pi} (T_{ii}(j) - T_{ii}^*(j))}{D_t \cdot S_{urF}} = h_{rni} + (T_n(j) - T_{ii}(j)) + h_{van} (T(j-1) - T_{ii}(j)) + h_{ci} (T_{ie}(j) - T_{ii}(j)) \quad (III.6)$$

$$\frac{M_i C_{Pi} (T_{ie}(j) - T_{ie}^*(j))}{D_t \cdot S_{urF}} = h_{ci} + (T_{ii}(j) - T_{ie}(j)) + h_{eis} (T_{sd} - T_{ie}(j)) + h_{vv} (T_a - T_{ie}(j)) \quad (7)$$

$$T(j) = T(j-1) \frac{h_{van} - S_{urF} \cdot (T_n(j) + T_{ii}(j) - 2T(j-1))}{\dot{m} C_p} \quad (III.8)$$

Dans ces équation, D_t désigne le pas de temps surface de la section et l'astérisque (*), l'époque t. D_t . Lorsque le fluide caloporteur ne circule pas (pendant la nuit ou lorsque la puissance incidente est inférieure ou seuil de fonctionnement). L'équation (8) Doit être remplacée par :

$$T(j) = \frac{T_n(j) + T_{ii}(j)}{2} \quad (III.9)$$

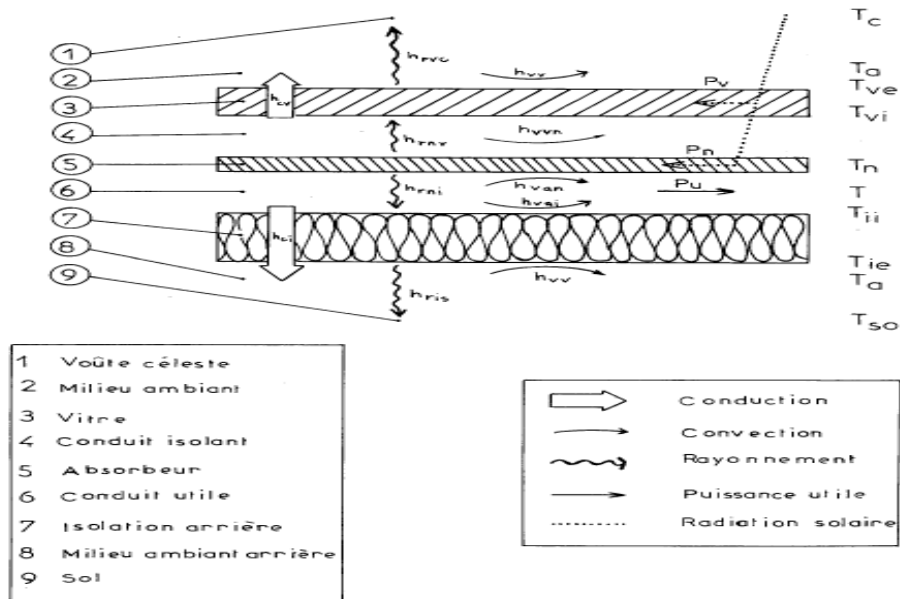


Figure III. 3. Représentation schématique des transferts thermiques dans l'isolateur

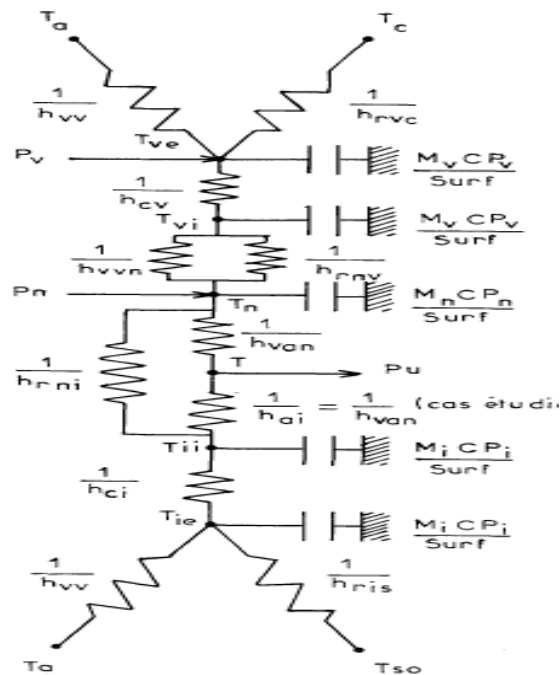


Figure III.4. Schéma électrique relatif à une section d'isolateur

III.3.2. Méthode globale [43]

On suppose que le régime est permanent et que les éléments de l'isolateur se trouvent chacun à une température moyenne constante. D'après l'expression il vient :

$$p_u = \frac{\dot{m} C_p}{A} (T_s - T_e) \quad (III.10)$$

Dans cette expression, T_e est supposée connue, mais il faut calculer T_s .

On résout pour cela l'équation de la chaleur dans le fluide caloporteur :

$$\rho C_p \left(\frac{dT}{dt} + \vec{v} \overrightarrow{\text{grad}} T \right) = \text{div}(\vec{q}) + \sigma_T \quad (III.11)$$

Où \vec{q} est le flux de conduction σ_T l'amplitude volumique de la source de chaleur d'origine solaire par unité de volume du fluide caloporteur de masse volumique ρ .

En régime permanent et en négligeant la conduction dans le fluide, il vient :

$$\rho C_p \vec{v} \overrightarrow{\text{grad}} T = \sigma_T \quad (III.12)$$

Où \vec{v} est la vitesse du fluide.

Si l'écoulement s'effectue suivant la coordonnée x , cette équation s'écrit :

$$\rho C_p V \frac{dT}{dx} = \sigma_T \quad (III.13)$$

III.4. Modélisation des coefficients d'échanges thermiques Capteur solaire à air plan simple

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et l'extérieur dans un capteur solaire couvert que nous appellerons capteur plan simple peuvent être schématisés comme indiquée sur la figure (2)[44]:

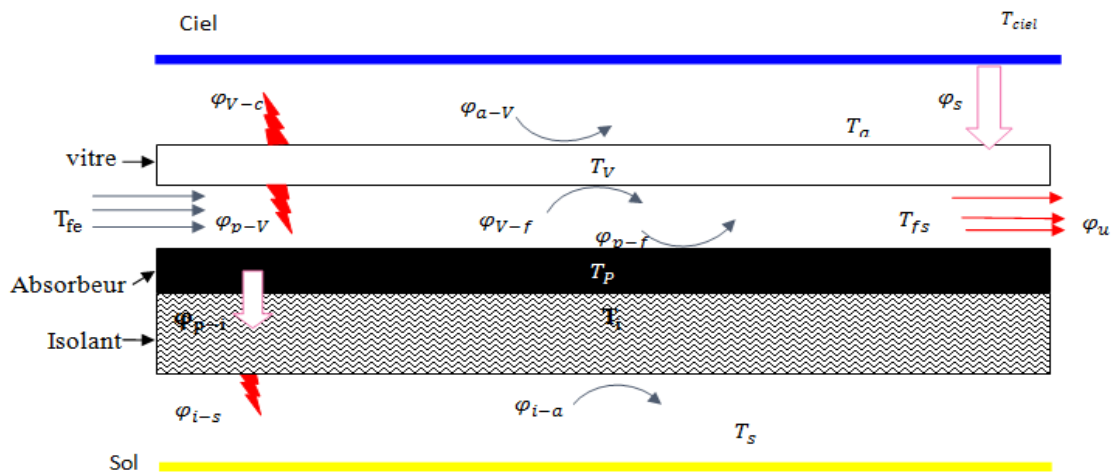


Figure III. 5: Différents échanges thermiques dans un capteur à air.[45]

Pour déterminer les divers coefficients d'échange thermique h , on introduit les relations suivantes, qu'il s'agit d'un transfert par conduction, rayonnement ou convection [40]. Le schéma électrique équivalent des différents transferts thermiques est représenté sur la figure 3

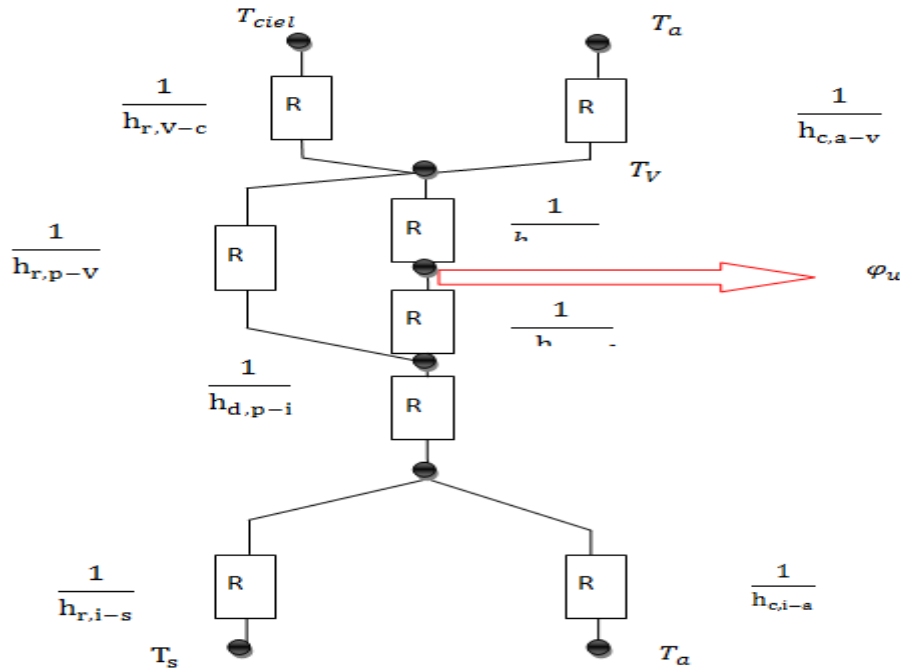


Figure III.6 : Schéma électrique des résistances dans un capteur solaire à air. [45]

III.5. Echanges thermiques par rayonnement

Pour le capteur solaire plan, l'échange thermique par rayonnement existe entre :

- la face extérieure de la couverture vitrée et le ciel .
- la face intérieure de la couverture vitrée et la face extérieure de l'absorbeur.
- la face intérieure de l'isolant et le sol. [46]

III.5.1 Echange thermique par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste

La vitre du capteur solaire échange l'énergie par rayonnement thermique avec le ciel. Le coefficient d'échange radiatif entre les deux s'écrit [45] :

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot \frac{(T_v + T_{ciel}) - (T_v^2 - T_{ciel}^2)(T_v - T_{ciel})}{(T_v - T_a)} \quad (III.14)$$

➤ Pour un capteur incliné avec un angle β , on utilise la relation suivante [10] :

$$h_{r,c-v} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (T_v + T_{ciel}) (T_v^2 + T_{ciel}^2) \quad (III.15)$$

La température équivalente du ciel est donnée par la relation de Swinbank [10] :

$$T_{ciel} = 0.0552 \cdot T_a^{3/2} \quad (III.16)$$

➤ Une autre relation utilisée par Sarhaddi [10] :

$$T_{ciel} = T_a + 6 \quad (III.17)$$

III.5.2. Echange thermique par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre

Pour l'échange radiatif entre la face intérieur du verre et la face extérieur de la couche de l'absorbeur, le coefficient d'échange est déminé par la relation suivante [48] :

$$T_{r,p-v} = \sigma \cdot \frac{(T_p + T_v) \cdot (T_p^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1} \quad (III.18)$$

III.5.3. Echange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol

La face arrière du capteur solaire échangée de l'énergie par rayonnement thermique avec le sol avec un coefficient d'échange radiatif donné par relation suivante [45] :

$$h_{r,i-s} = \sigma \varepsilon_i \cdot \frac{1}{2} (1 + \cos\beta) (T_i + T_s) (T_i^2 + T_s^2) \quad (III.19)$$

➤ La température du sol, est donnée par la relation suivante [10] :

$$T_s = T_a + 2 \quad (III.20)$$

III.5.3.1. Echange thermique par conduction

Cet échange s'effectue à travers les corps solides à cause d'un gradient de température, il existe au niveau de plusieurs éléments du capteur :

- Au niveau de la couche de verre.
- Au niveau de la plaque absorbante.
- Au niveau de l'isolant.

Le coefficient d'échange thermique par conduction au niveau du composant i s'écrit :

$$h_{d,i} = \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (III.21)$$

III.5.3.2. Echanges thermiques par convection

- Ceux dus au vent, par rapport aux surfaces avant et arrière du capteur solaire plan.
- Ceux dus au contact entre le fluide caloporteur et le capteur.

III.5.3.2.1. Echange thermique par convection dû au vent

Le coefficient de transfert par convection dû au vent est décrit par relation de **Hottel** et **woertz** suivante [47] :

$$h_c = 5.67 + 3.86 \cdot U_v \quad (III.22)$$

Ou par la relation établie par **watmuffet** [48] :

$$h_c = 2.8 + 3 \cdot U_v \quad (III.23)$$

Pour un capteur solaire incliné avec un angle β , une autre relation est établie par **Stultz** et **Wen** définie par [47] :

$$h_c = 1.27((T_v - T_a) \cdot \cos\beta)^{\frac{1}{3}} + 2.658 \cdot U_v \quad (III.24)$$

C'est cette dernière relation qui intervient dans notre modèle numérique, car elle tient compte de l'effet de l'inclinaison du capteur.[48]

III.5.3.2.2. Echange thermique par convection dû au fluide caloporteur :

Au cours de la circulation du fluide caloporteur dans la conduite du capteur, ce dernier échange la chaleur par convection avec la couche du verre et de la plaque absorbante. Cet échange dépend de la géométrie des parois, de la vitesse de l'écoulement, des dimensions de la conduit.[47], Le coefficient d'échange thermique par convection est déterminé à l'aide de la relation suivante donnant le nombre de **Nusselt** :

$$N_u = D \frac{h_c}{\lambda_f} \quad \text{(III.25)}$$

➤ **Écoulement laminaire :**

$$R_e < 2100 \quad \text{(III.26)}$$

- $G_r < 100 \Rightarrow N_u = \frac{3.66 + 0.085 \cdot G_r}{(1 + 0.047 \cdot G_r^{\frac{2}{3}})}$
- $G_r > 100 \Rightarrow N_u = 0,116 \cdot G_r^{\frac{1}{3}} + 0,87 \cdot G_r \cdot (1 + 0,045 \cdot G_r^{\frac{1}{3}})$

➤ **Écoulement transitoire :**

$$2100 < R_e < 10^4 \quad \text{(III.27)}$$

$$N_u = 0,116 \cdot (R_e^{\frac{2}{3}} - 125) \cdot (1 + (\frac{D_H}{L})^{\frac{3}{2}} \cdot P_r^{\frac{1}{4}})$$

➤ **Écoulement turbulent :**

$$R_e > 10^4 \quad \text{(III.28)}$$

$$N_u = 0,018 \cdot R_e^{0,8} \cdot P_r^{0,4}$$

Avec :

$$R_e = \frac{\rho_f \cdot D_H}{\mu} \cdot V_f, \quad P_r = \frac{\mu_f}{\lambda_f} \cdot c_p, \quad G_r = \frac{R_e \cdot P_r \cdot D_H}{L} :$$

Sont respectivement le nombre **Reynolds**, nombre de **Prandlt** et le nombre de **Gratetz**.

III.6. Puissance absorbée «Pab»

La puissance incidente I_t reçue par un mètre carré de surface d'insolateur incliné d'un angle β peut être déterminée théoriquement, elle s'écrit [49]:

$$I_t = \phi_{b\beta} + \phi_{a\beta}$$

Où :

- $\phi_{b\beta}$: est la composante directe,

- $\phi_{d\beta}$: est la composante diffuse.

La puissance transmise à travers le vitrage est donc égale à $(\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)$ telles que τ est la transmittivité totale directionnelle et τ_d la transmittivité totale hémisphérique. L'absorbeur reçoit la fraction α_{ab} de cette puissance transmise et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_{ab})$. Si r_{vd} est la réflectivité hémisphérique du vitrage, celui-ci réfléchit vers l'absorbeur la fraction $(1 - \alpha_{ab}) \cdot r_{vd}$. Ce dernier absorbe à nouveau la fraction $\alpha_{ab} \cdot (1 - \alpha_{ab}) \cdot r_{vd}$ et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_{ab})^2 \cdot r_{vd}$. La fraction $(1 - \alpha_{ab})^2 \cdot r_{vd}^2$ est, à nouveau, réfléchi vers l'absorbeur et ainsi de suite. Après p réflexions sur le vitrage, la fraction réfléchi vers l'absorbeur est $(1 - \alpha_{ab})^p \cdot r_{vd}^p$ de sorte qu'après une infinité de réflexions, la puissance captée est [49], [50]:

$$\phi_{ab} = \sum_{p=0}^{\infty} (1 - \alpha_{ab})^p r_{vd}^p (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d) \quad (\text{III.29})$$

$$= \frac{\alpha_{ab} (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_{ab}) r_{vd}} \quad (\text{III.30})$$

Le rendement optique η_0 de l'isolateur défini par le quotient ϕ_{ab} / I_t , également appelé transmittivité-absorptivité effective de l'isolateur et noté $(\tau_v \alpha_{ab})$ vaut donc :

$$\eta_0 = \tau_v \alpha_{ab} = \frac{\alpha_{ab} (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)}{(1 - (1 - \alpha_{ab}) r_{vd}) (\phi_{b\beta} + \phi_{d\beta})} \quad (\text{III.31})$$

Pour la suite, on déterminera la puissance ϕ_{ab} par m² de surface de captation de l'isolateur en utilisant la formule suivante :

$$\phi_{ab} = (\tau_v \alpha_{ab}) I_t \quad (\text{III.32})$$

III.7. Calcule des coefficients des pertes

Le flux solaire reçu sur le module du capteur solaire plan ne se convertit pas totalement en énergie thermique utiles. Une partie de ce rayonnement est perdue sous forme de chaleur et rayonnement, au niveau des surface arrière du module.[47]

$$\phi_p = \phi_{p,av} + \phi_{p,ar} \quad (\text{III.33})$$

Avec :

$$\phi_{p,av} = S \cdot U_{av} (T_p - T_a)$$

$$\phi_{p,ar} = S \cdot U_{ar} (T_p - T_a)$$

U_{av} et U_{ar} sont les coefficients de perte thermique sur la surface avant et arrière du capteur respectivement, tel que :

$$U_{av} = \left[\frac{1}{h_{r,p-v}} + \frac{2}{h_{c,p-f}} + \frac{1}{h_{c,v-a} + h_{r,v-c}} \right]^{-1}$$

$$U_{ar} = \left[\frac{1}{h_{d,p-i}} + \frac{1}{h_{c,i-a} + h_{r,i-s}} \right]^{-1}$$

Avec :

$U_{av} + U_{ar}$: est le coefficient global de pertes thermiques.

➤ U_L : Puissance perdue sera donnée par :

$$\varphi_p = S.U_L(T_p - T_a) \quad \text{(III.33)}$$

III.8. Calcul du rendement de CSP :

Le rendement thermique de CSP représente le rapport de puissance utile à la puissance incidente :

$$\eta = \frac{Q_u}{I_g} = \frac{P_u}{AI_g}$$

Il peut être aussi donné en fonction du rapport de la différence de température ($T_{fe} - T_{amb}$) ou flux global incident I_g :

$$\eta = \frac{P_u}{AI_g}$$

chapitre IV

Résultat et discussions

IV.1. Introduction

L'optimisation d'un système énergétique solaire permet de déterminer les possibilités offertes à son utilisation pour substituer à un système énergétique utilisant une énergie classique. Aussi cela permet de juger que la source solaire est préférable à une autre source d'énergie pour telle ou telle application. En effet, une compréhension meilleure des mécanismes régissant les échanges thermiques permet de maîtriser tous les paramètres extrinsèques ou intrinsèques entrant dans le processus de transfert de chaleur et par la suite connaître sur quelle base on peut agir pour optimiser ses performances. Les applications de l'énergie thermique issue des capteurs solaires, dépendent essentiellement des températures de sortie du fluide caloporteur. Ceci se traduit par des abaques qui représentent le rendement du capteur en fonction de l'élévation de température. Dans ce sens la première phase de ce travail a été établie.

IV.2. Evaluation et calculs des performances du capteur solaire :

Une étape préliminaire permettant d'améliorer ces performances consiste à la compréhension des divers paramètres propres au capteur ou relatifs à son environnement. La chaîne énergétique faisant l'objet de cette étude (capteur solaire et séchoir) se présente sous de nombreuses variantes. L'idée principale de ces variantes consiste à jouer sur la géométrie de la veine d'écoulement de l'air dans le capteur solaire afin d'améliorer l'échange de chaleur entre l'air et l'absorbeur. Cette amélioration peut être réalisée essentiellement de deux façons, soit en augmentant la surface d'échange offerte au fluide caloporteur et cela consiste à ajouter des chicane sur la face inférieure de l'absorbeur, soit en provoquant la turbulence dans l'écoulement en plaçant des chicane de formes variées dans la veine d'air mobile.

IV.3. Les Mesures effectuées :

IV.3.1. Mesure du flux solaire :

Les mesures du flux solaire incident global incident sur la surface du capteur sont effectuées à l'aide d'un pyromètre LP_PYRA_10S (Figures 1): Température de fonctionnement : $-40/+80^{\circ}\text{C}$. Plage de mesure de $0 \text{ à } 2000 \pm 20\% \text{ W/m}^2$. Dim $\varnothing 165 \times 104 \text{ mm}$.



Figure IV.1: Pyrometer LP_PYRA_10S

IV.3.2. Mesure des paramètres climatiques :

Pour les mesures des paramètres climatiques on a utilisé les données de la station météorologique locale de l'aéroport d'Adrar : Station météo ADCONT Telemetry à transmission GPS (Figures 2), installé à l'aéroport international d'Adrar. Les caractéristiques de cette station sont résumées dans le tableau ci-dessous (tableau 1)



Figure IV.2 : Station météo à transmission GPS- ADRAR

Tableau 1 : Caractéristiques de la station météo.

Capteurs	Mesure	Résolution	Plage de mesure	Précision	Caractéristiques
Pluviomètre	Précipitation	0,2 mm		2 %	Pluviomètre à auget à évacuation automatique
Capteur Humectation	Humectation des feuilles		Mesure de résistance sur papier filtre		
Hygromètre	Humidité relative	0,1 %	0 à 100 %	2 %	Ces deux mesures se font par le même capteur relié à un câble résistant aux faibles températures. Capteur intégré dans un abri ventilé de façon naturelle permettant une protection des erreurs produites par les radiations solaires et précipitations
Thermomètre	Température	0,1°C	- 30 à + 100°C	0,4°C	

IV.3.3. Mesure du débit d'air

Ces mesures sont effectuées à la sortie du capteur à l'aide d'un anémomètre à hélice de type "Jules et Richard", dont le diamètre est de 10 cm.

IV.3.4. Mesure des températures

Les mesures des températures dans la veine d'écoulement sont effectuées à l'aide des sondes de types 'K' et 'J', référence : BS4932K. Les résultats ont été enregistrés à l'aide d'un système d'acquisition.

IV.4. Détermination expérimentale et calcul du rendement thermique du capteur solaire

Le rendement thermique instantané expérimental de l'insolateur étant le rapport entre la quantité de chaleur utile à l'échauffement du fluide et celle reçue par le système. Il peut être calculé par l'expression:

$$\eta_{\text{exp}} = \frac{C_p G (T_{\text{fs}} - T_{\text{fe}})}{3600 A I_g} \quad (\text{IV.1})$$

Où : G est le débit massique de l'air donné qui est évalué comme suit :

$$G = 3600 \cdot \rho_f \cdot v_c \cdot s_c \gg \text{en (kg/h)} \quad (\text{IV.2})$$

IV. 5. Détermination expérimentale et calcul du rayonnement solaire incident :

IV.5.1. Calcul du rayonnement solaire reçu :

Les études, faisant l'objet de l'influence du rayonnement direct et diffus sur les performances des capteurs plans, ont montré que la sous-estimation des rayonnements diffus est inacceptable quand leur pourcentage est au-delà de 15%. Ceci s'explique par le fait qu'un fort pourcentage de diffus correspond à un faible éclairement énergétique et par la suite le peu d'énergie disponible est reçue par un capteur de rendement faible.

Le rayonnement solaire incident I_g reçue sur un capteur solaire incliné d'un angle β s'écrit :

$$I_g = \Phi_{b\beta} + \Phi_{d\beta}$$

Où :

$\Phi_{b\beta}$ est la composante directe,

$\Phi_{d\beta}$ est la composante diffuse.

Une série des mesures a été effectuée en mai 2019 et juin 2019. Nous nous contentons de présenter quelques courbes types. La figure suivante (1) montre la variation en fonction du temps du rayonnement solaire global reçu par la surface plane du capteur solaire plan muni des chicanes ainsi que la puissance absorbée respectivement par l'absorbeur et la couverture supérieure transparente (vitre en verre).

Nous remarquons que la variation du rayonnement solaire pour les journées des calculs a un profil sinusoïdal marqué par un minimum au lever et au coucher du soleil et un maximum aux alentours du midi solaire. Cette période qui présente un intervalle assez long dépendant de la date et des conditions climatiques, détermine les possibilités de la faisabilité expérimentale des essais du séchage effectué. En effet nous avons choisi des journées dépourvues de fluctuations nuageuses.

Il est à remarquer qu'en général la puissance absorbée par l'absorbeur est toujours supérieure de celle de la vitre. La puissance de l'absorbeur influe directement sur celle de la vitre et celle reçue par le fluide caloporteur, ce qui va forcément augmenter sa température à la sortie du capteur.

A noter que, au départ (avant 6h30 du matin) la puissance de la vitre est supérieure à celle de l'absorbeur. Ceci s'explique par le fait que l'absorbeur n'est pas actif.

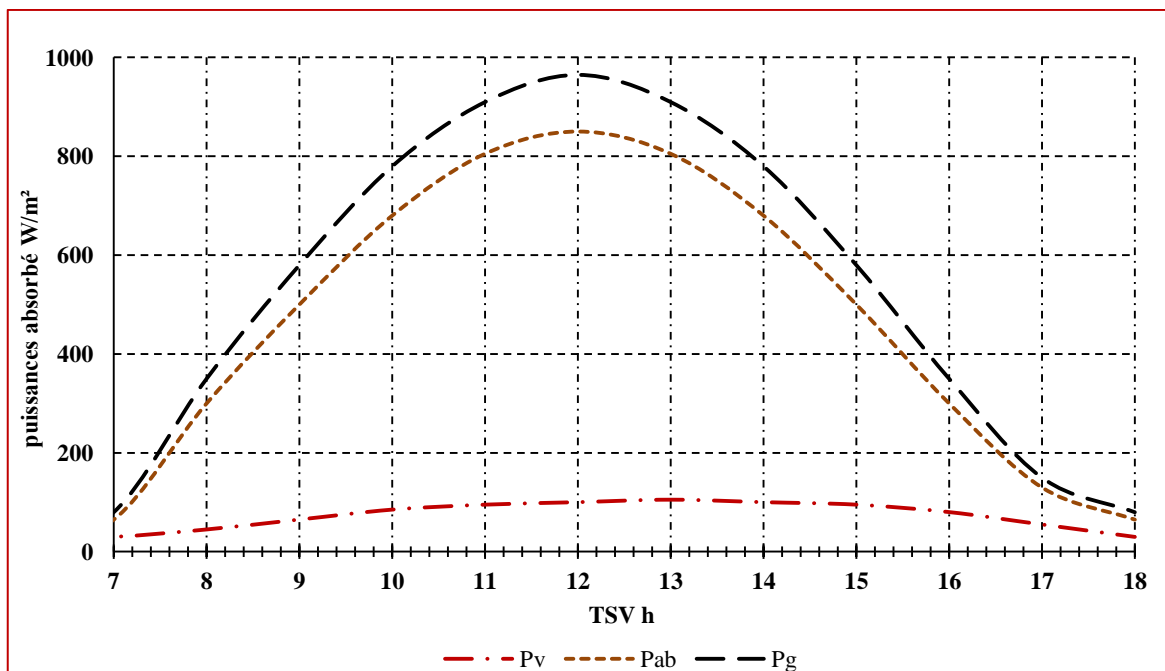


Figure IV.1. a Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées durant la journée de travail dans la zone de Touat-Adrar. Journée du 12/06/2019.

IV. 6. Variation de la température ambiante et celle du ciel :

Les courbes qui suivent montrent la variation de la température ambiante mesurée et celle simulée ainsi que celle du ciel. Il est à remarquer que les deux températures ont le même profil et que l'écart est faible entre les valeurs mesurées et celles simulées.

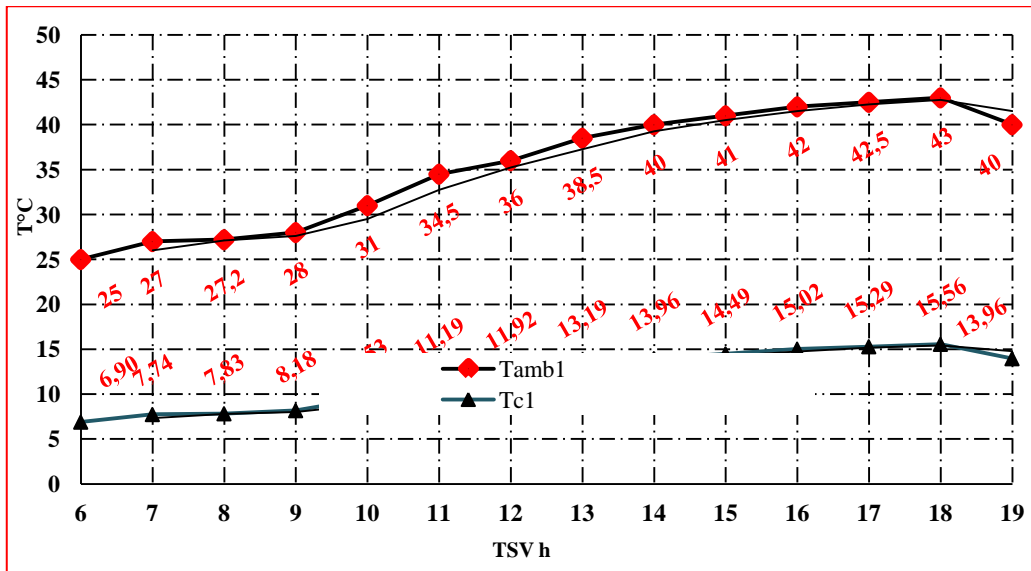


Figure IV. 2.a. Variation des températures de l'ambiance et du ciel en fonction TSV Journée du 12/06/2019,

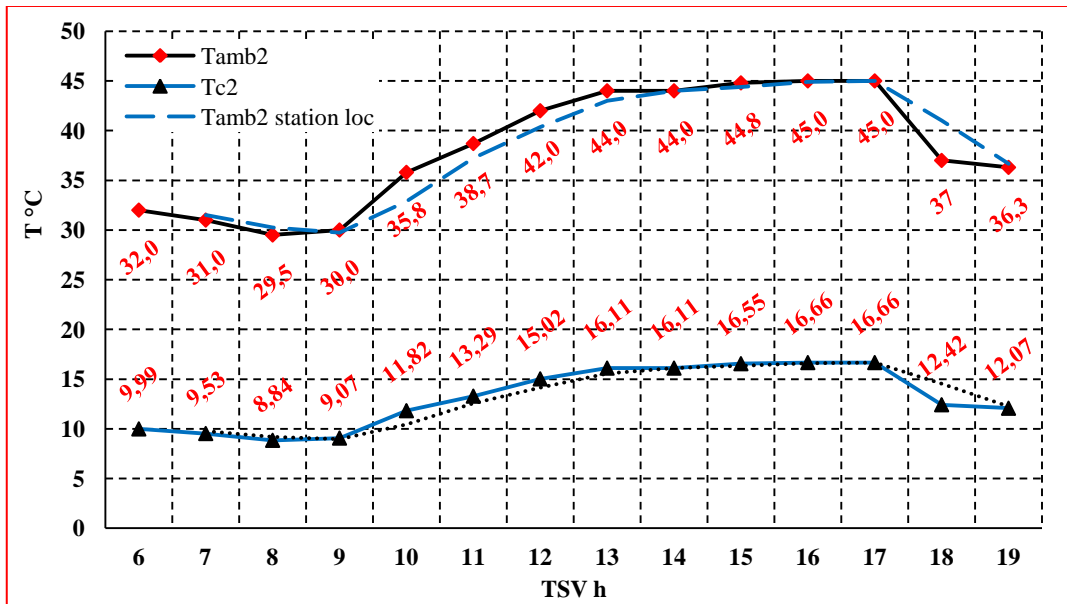


Figure IV.2.b. Variation des températures de l'ambiance et du ciel en fonction TSV Journée du 14/06/2019,

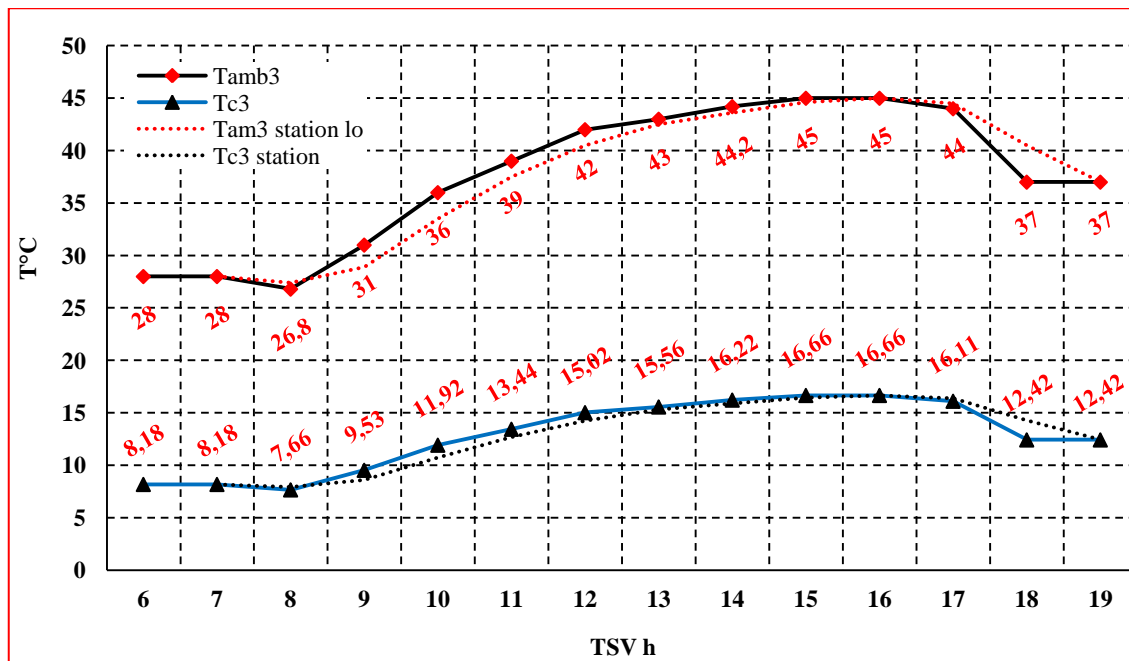


Figure IV.2.c. Variation des températures de l'ambiance et du ciel en fonction TSV Journée du 15/06/2019

IV.7. Variation de la température des différents éléments du capteur

Dans les figures qui suivent (Figure 3) on montre la variation des températures mesurées et simulées des différents constituants du capteur solaire ainsi que celle du fluide caloporteur à la sortie. IL est à remarquer que ces courbes sont serrées au début du fonctionnement du système. Ceci caractérise l'inertie thermique du système. Une fois l'équilibre thermique établi, les écarts apparaissent et sont plus au moins grands entre les valeurs simulées et celles mesurées.

Les valeurs expérimentales des températures du fluide caloporteur et celle de l'absorbeur présentent un écart assez important. Ceci détermine l'efficacité du type de matériaux utilisé ainsi que la qualité du transfert thermique existant.

Il est à remarquer que la température de la plaque interne d'aluminium est plus élevée que celle du fluide. Cette élévation est dû probablement à l'effet du rayonnement favorable plus au solide qu'au fluide. La valeur maximale de la température du fluide obtenue détermine la faisabilité du séchage du produit. Ces valeurs s'avèrent très intéressants et permettent le séchage par convection forcée de la tomate de variété allongée surtout pour la période s'étalant entre 11h et 14h.

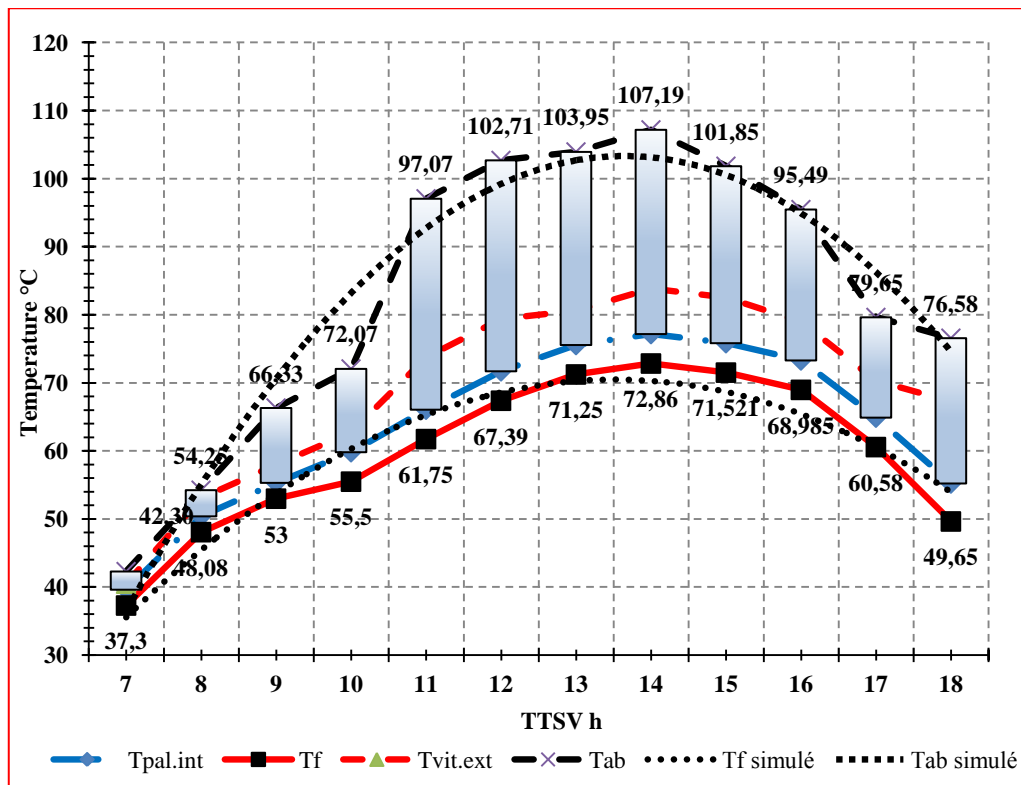


Figure IV 3. Variations des températures des composants du capteur (expérimentales et simulées)

IV.8. Variation de la puissance utile et la puissance absorbée

La figure (4), montre la variation de la puissance utile à l'échauffement du fluide caloporteur et celle absorbée par le corps noir pour la journée de travail du 01/08/2016 partiellement nuageuse. Ces deux quantités traduisent la quantité de chaleur absorbée relative à la conductance de l'absorbeur caractérisé par un coefficient d'absorption et celle utile à l'échauffement du fluide caloporteur influencée par divers paramètres. Ces deux quantités sont inférieures à la puissance incidente reçue la même journée.

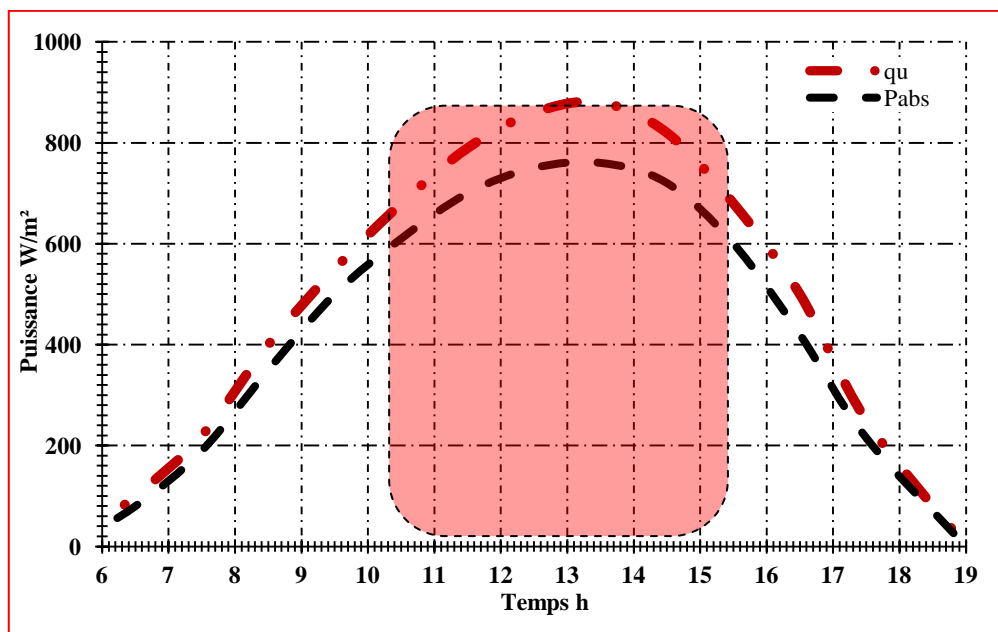


Figure IV. 4 : Variation de la puissance utile (q_u) et absorbée (P_{ab}) en fonction du TSV.

IV.9. Variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée.

Dans la figure (5), on présente la variation de la température du corps noir (absorbeur) qui augmente en fonction de la puissance absorbée.

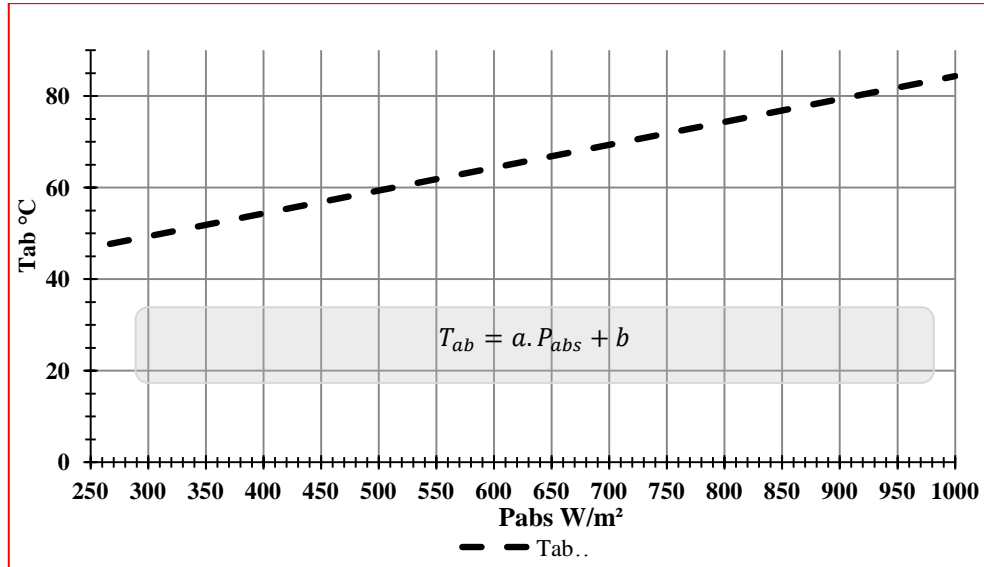


Figure IV.5 : Variation de la température de l'absorbeur en fonction de la puissance absorbée (simulée)

La variation de la température moyenne de la plaque absorbante suit une fonction linéaire en fonction de la puissance absorbée. En réalité elle n'est pas linéaire par contre dans le cas de la simulation on linéarise souvent les pertes ainsi que les coefficients d'échanges thermiques et on considère que le système énergétique est totalement isolé. Par contre en réalité le système n'est pas isolé surtout que les conditions externes changent instantanément.

IV.10. Evolution de la puissance utile (q_u) et de la puissance absorbée en fonction de la température de l'absorbeur (T_{ab})

Dans la figure 6 sont présentées les variations en fonction de la température de l'absorbeur les quantités de chaleur absorbées par la plaque et par le fluide caloporteur.

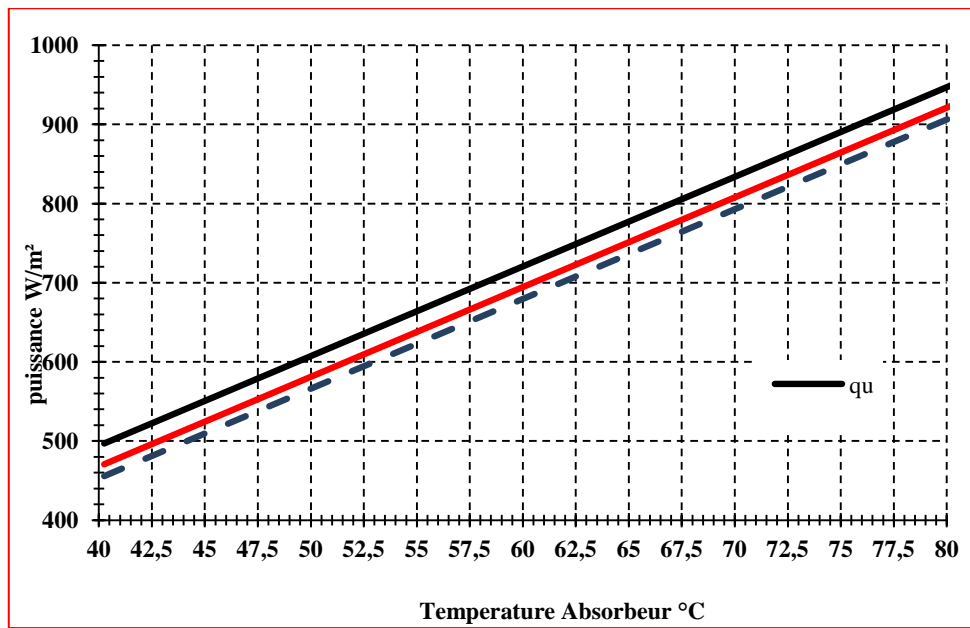


Figure .IV.6 : Variation de la puissance utile (q_u) avec la température de l'absorbeur (T_{ab}).

IV.11. Variation de la température théorique et expérimentale du fluide caloporteur en fonction de la température de l'absorbeur

Dans la figure (7) sont présentées les variations théorique (simulée) et expérimentale de la température du fluide caloporteur en fonction de celle de la plaque absorbante. On remarque tout d'abord que les valeurs sont proches et que ce paramètre augmente avec l'élévation de la température de la plaque.

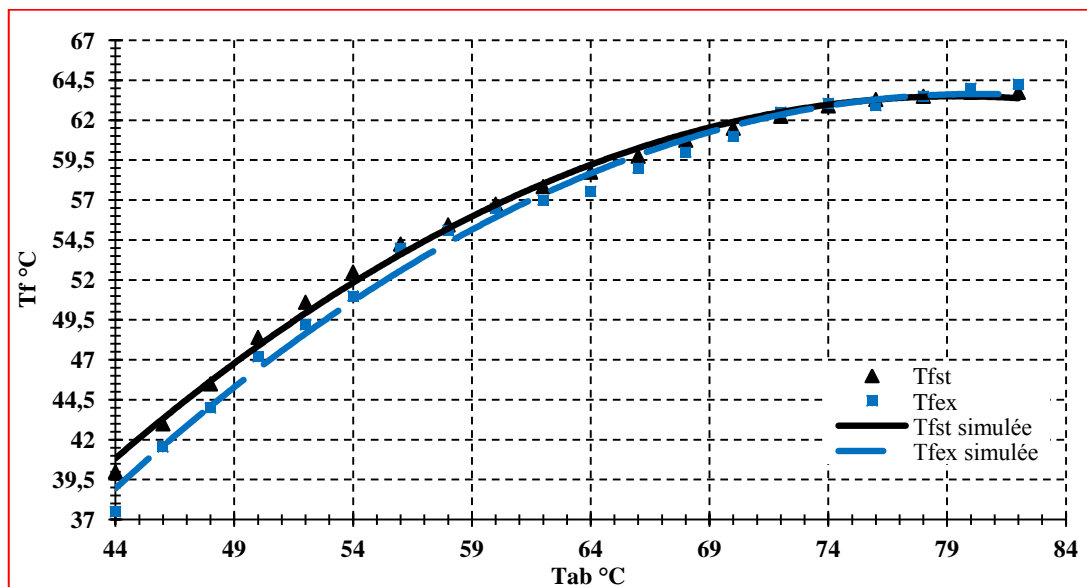


Figure IV.7 : Variation de la température de sortie du fluide (T_{fs}) avec la température de l'absorbeur (T_{ab})

IV.12..Rendement thermique de l'insolateur

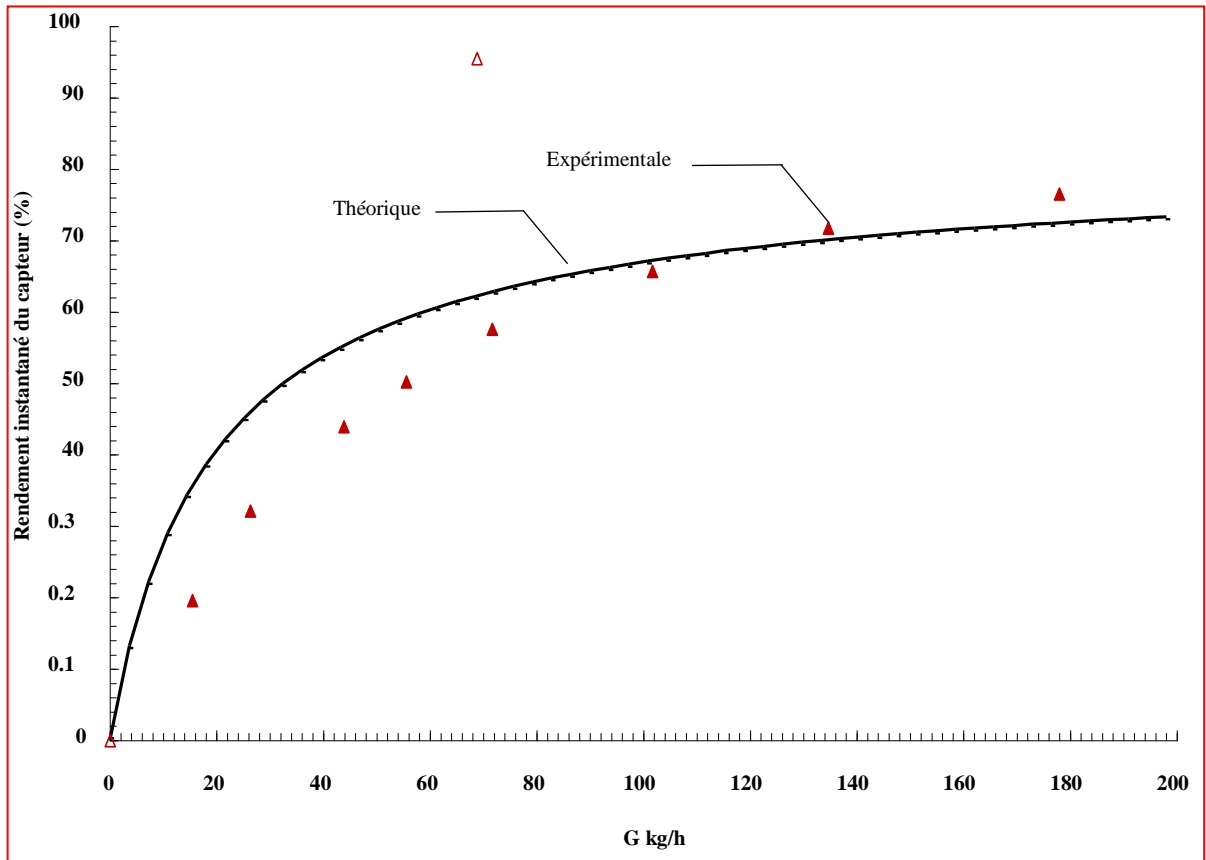


Figure IV.8 : Variations théorique et expérimentale du rendement de l'insolateur (13/06/2019)

Nous présentons sur la figure (8) la variation en fonction du débit du rendement théorique et expérimental du capteur solaire. On remarque que pour les grandes valeurs du débit, le rendement calculé à partir du modèle théorique est confondu avec celui calculé à partir des mesures expérimentales. En revanche, pour les faibles valeurs du débit le modèle théorique surestime le rendement. Ceci est dû probablement aux erreurs de mesure.

Dans la figure suivante (Figure 9), on présente en fonction du débit la variation théorique et expérimentale de la température du fluide caloporteur. On remarque que celles-ci diminuent quand le débit augmente. Les deux courbes (expérimentale et théorique) ont presque la même allure ce qui nous permet de dire que le modèle est très proche de la réalité. Aussi à constater que pour des valeurs petites du débit il y a un écart très important entre les valeurs simulées et celles mesurées expérimentalement. Celles simulées sont plus grandes que celles enregistrées expérimentalement, ensuite pour les valeurs très grandes du débit l'écart se réduit jusqu'à un certain débit où les valeurs de la température du fluide à la sortie mesurée expérimentalement deviennent plus grandes que celles simulées. Ce phénomène est dû à l'existence de pertes thermiques variables dans le cas expérimentale et que dans le cas de la simulation ils ont des valeurs plus précises. Aussi l'augmentation du débit ne permet pas au fluide caloporteur de se

chauffer car la durée du passage est insuffisante. Par contre dans le cas des petits débits d'air la température de sortie du fluide caloporteur prise expérimentalement est plus grande que celle simulée. Ce phénomène est causé par les hypothèses simplificatrices qu'on a considéré durant la modélisation des différents paramètres de fonctionnement du capteur tels que les pertes thermiques latérales et une partie des pertes thermiques en avant qu'on a négligé dans le but de la simplification des équations gouvernantes des différents échanges thermiques.

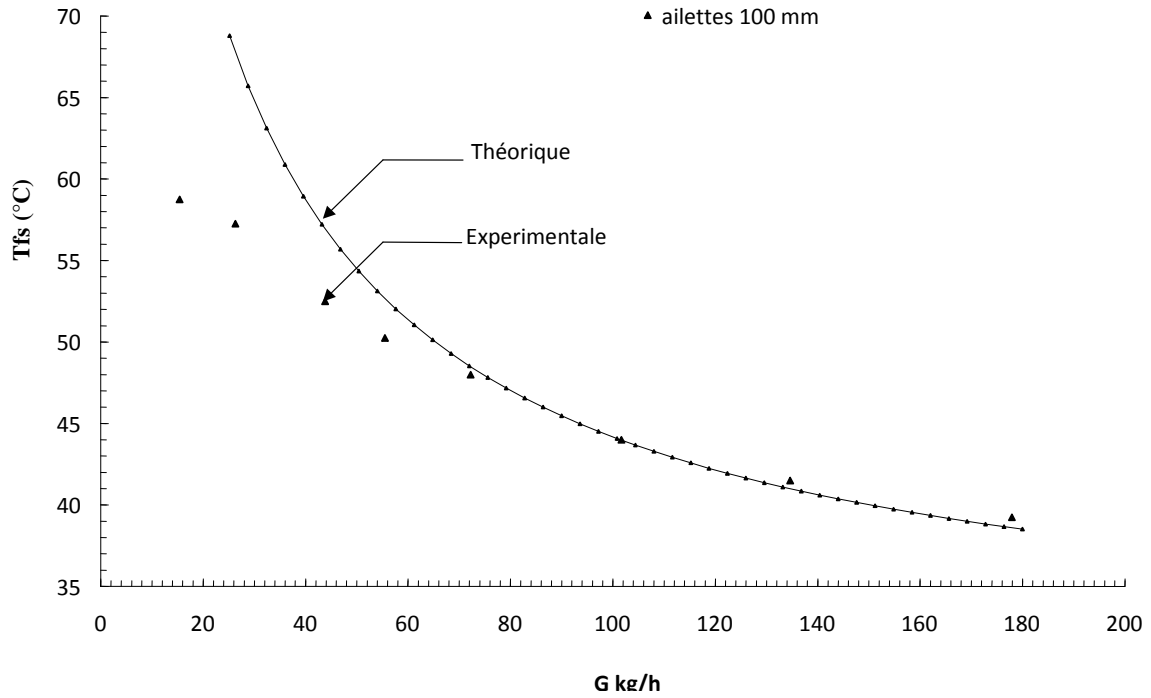


Figure IV.9. Influence des ailettes sur la température de sortie de fluide caloporteur, le 14/06/2019

IV.12. Influence de l'épaisseur de la vitre sur le rendement instantané

La puissance reçue au niveau du corps noir (absorbeur) traversant le vitrage est égale à $I_g \tau$, telle que τ est la transmittivité totale (directionnelle et hémisphérique). L'absorbeur capte la fraction α_{ab} de cette puissance transmise et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_{ab})$. Si r_{vd} est la réflectivité hémisphérique du vitrage, celui-ci réfléchit vers l'absorbeur la fraction $(1 - \alpha_{ab}) \cdot r_{vd}$. Ce dernier absorbe à nouveau la fraction $\alpha_{ab} \cdot (1 - \alpha_{ab}) \cdot r_{vd}$ et réfléchit vers le vitrage la fraction $(1 - \alpha_{ab})^2 \cdot r_{vd}$. La fraction $(1 - \alpha_{ab})^2 \cdot r_{vd}^2$ est, à nouveau, réfléchié vers l'absorbeur et ainsi de suite. Après p réflexions sur le vitrage, la fraction réfléchié vers l'absorbeur est $(1 - \alpha_{ab})^p \cdot r_{vd}^p$ de sorte qu'après une infinité de réflexions, la puissance captée est :

$$\Phi_{ab} = \sum_{p=0}^{\infty} (1 - \alpha_{ab})^p r_{vd}^p (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d) = \frac{\alpha_{ab} (\phi_{b\beta} \tau + \phi_{d\beta} \tau_d)}{1 - (1 - \alpha_{ab}) r_{vd}}$$

La nature des matériaux utilisés dans la conception du système solaire influent plus au moins sur son efficacité. Le vitrage simple ou multiple, en verre ou en plexi-glace joue un rôle essentiel sur les performances d'un tel système. On définit ainsi pour un capteur solaire le rendement optique η_0 défini par

$$\text{le rapport } \phi_{ab}/I_g, \text{ égale au produit } (\tau_v \alpha_{ab}) \text{ et donné par : } \eta_0 = \tau_v \alpha_{ab} = \frac{\alpha_{ab}(\phi_{b\beta}\tau + \phi_{d\beta}\tau_d)}{(1 - (1 - \alpha_{ab})r_{vd})(\phi_{b\beta} + \phi_{d\beta})}$$

Dans cette étude le vitrage considéré est en verre. Pour mieux montrer l'influence de l'épaisseur de ce dernier et par manque du produit pour différentes épaisseur on a étudié cette influence à travers la simulation des épaisseurs de 3 mm, 4 mm, 5 mm et 6 mm. Les courbes qui suivent (figure 10) montrent la variation du rendement en fonction de la puissance solaire reçue. On remarque que pour les petites puissances (moins de 425 W/m²) les rendements sont presque les mêmes. Ensuite une augmentation de la puissance reçue permet une distinction : le rendement est maximal pour une épaisseur de verre de 3 mm, ceci est dû probablement à la quantité de chaleur emmagasinée dans le vitrage. Les valeurs maximales calculées pour ces quatre épaisseurs sont respectivement 86,12%, 83,23%, 80,52 et 78,08 %. Au-delà de ces valeurs, le rendement reste constant.

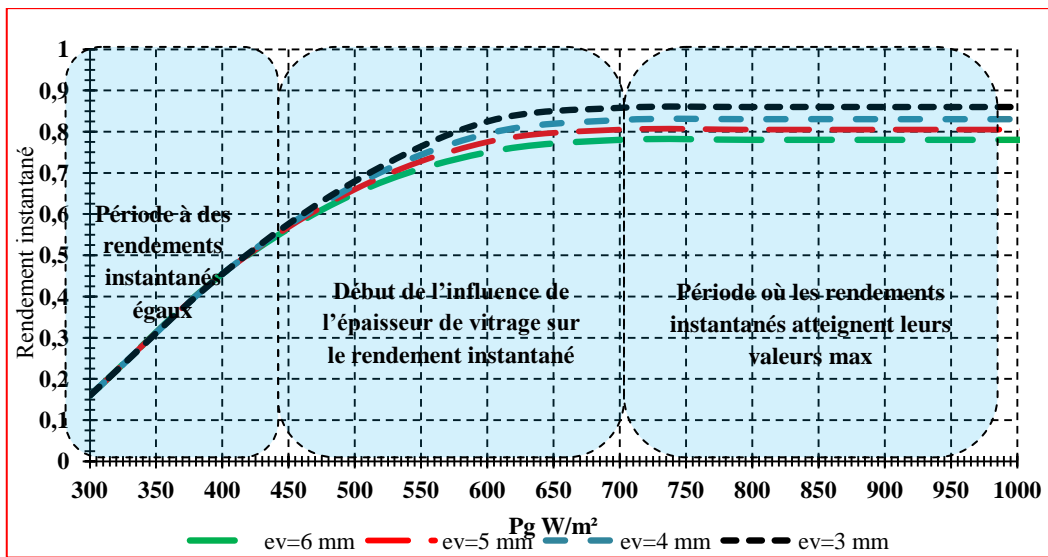


Figure IV.10. Variation du rendement simulé en fonction de l'épaisseur du vitrage

La couverture est l'élément par lequel se fait le maximum d'échange d'énergie. Elle doit être donc transparente pour laisser passer le rayonnement solaire qui se transforme en chaleur dans l'absorbeur. Ce dernier compte tenu des températures atteintes, émet des radiations dans le domaine de l'infrarouge, la couverture doit être opaque à ces radiations et doit donc les réfléchir vers l'absorbeur.

Les échanges convectifs entre l'absorbeur et la couverture varient avec la distance qui les sépare. Le coefficient de transmission du vitrage est un paramètre susceptible de varier en cours de fonctionnement, ceci est dû à un dépôt de poussière sur la face extérieure, ou même sur la face intérieure dans le cas où le fluide caloporteur est l'air du milieu ambiant comme c'est le cas dans cette étude.

IV.13. Influence de la température ambiante sur le rendement

La figure (11) montre l'influence, en fonction du rayonnement solaire incident, de la température ambiante sur le rendement du système. Des valeurs de température allant de 25°C jusqu'à 40°C sont considérées. On remarque qu'aux petites valeurs du rayonnement, le rendement augmente avec la température ambiante. Ensuite cette augmentation se voit moins pour des grandes valeurs du rayonnement incident. L'efficacité du système augmente avec l'élévation de la température du milieu environnant. Ceci est dû au fait que pour une température du milieu ambiant grande un écart moins entre cette dernière et celle du système, donc moins de pertes thermiques.

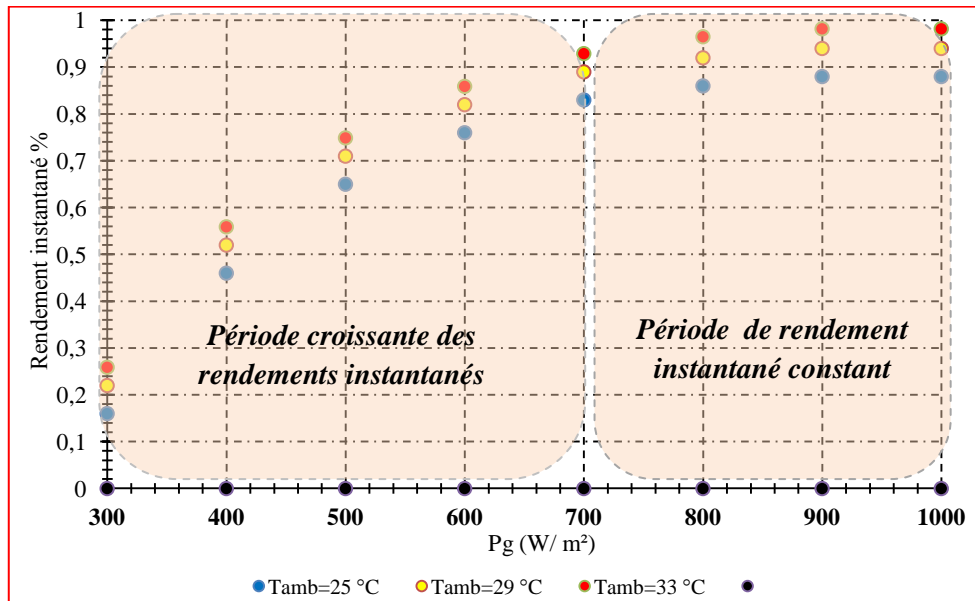


Figure IV.11. Evolution du rendement en fonction de la température ambiante

IV. 14. Influence du rayonnement solaire incident

La variation du rendement du capteur en fonction du temps au cours d'une journée du lever au coucher du soleil est donnée dans la figure (12). Il est à noter l'existence de trois phases : de 07h jusqu'à presque 10h30mn, pour laquelle le rendement augmente en fonction de du rayonnement solaire, ensuite il est pratiquement constant au cours de la deuxième phase qui s'étend jusqu'à 15h et à partir de cet instant le rendement commence à décroître jusqu'au coucher du soleil où le rayonnement solaire s'annule.

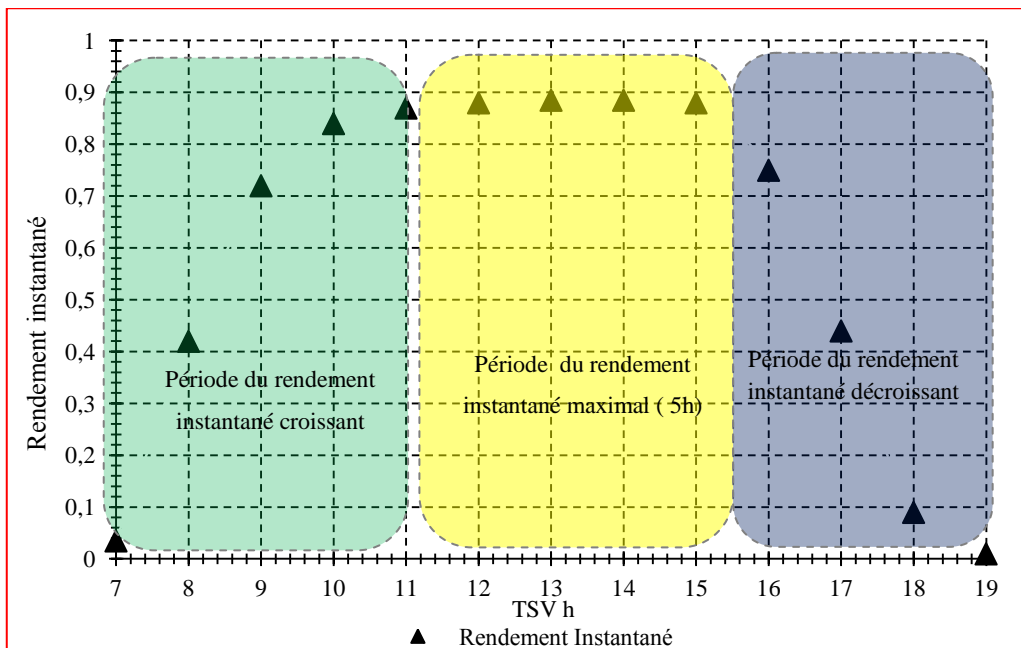


Figure IV.12. Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

Donc les performances du capteur augmentent en fonction du flux solaire global incident, celui-ci est constitué d'une composante directe et d'une composante diffuse dont le pourcentage est variable. Le rendement optique du capteur ($\tau \cdot \alpha$) sensible à l'angle d'incidence, diminue quand le pourcentage du rayonnement diffus augmente.

IV.15. Influence de la vitesse du vent

La chaîne énergétique solaire (capteur-armoire) est exposée directement aux conditions réelles climatiques extérieur. Le vent est un facteur qui affecte le fonctionnement de ce système. La figure (13) traduit cette influence. On a remarqué qu' au début de fonctionnement du système, c'est-à-dire pour des valeurs faibles du rayonnement solaire, les valeurs faibles de la vitesse du vent sont en faveur de l'efficacité alors que pour des valeurs supérieures, la vitesse du vent influe en défaveur du rendement. Ceci est en grande partie dû à un abaissement de la température du vitrage, ceci conduit à un écart plus ou moins important entre sa température et celle de l'absorbeur.

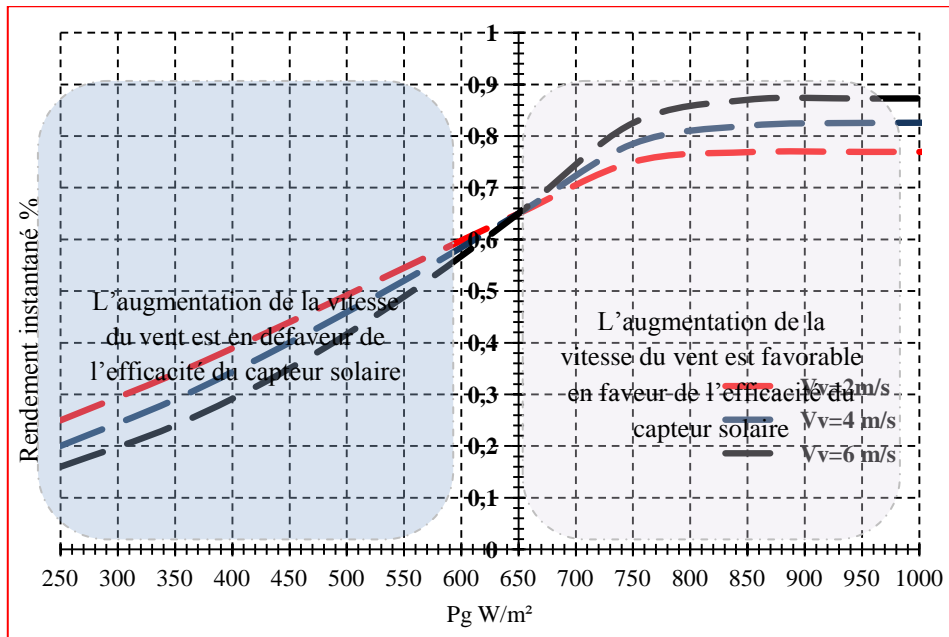


Figure IV.13. Evolution du rendement instantané en fonction de la vitesse du vent

IV.16. Influence de la nature du matériau de l'absorbeur sur le rendement :

La nature du matériau utilisé dans la conception des convertisseurs thermiques de l'énergie solaire a une grande influence sur son efficacité. La figure (14) traduit l'évolution de l'efficacité instantanée du capteur en fonction de la variation de la puissance solaire pour trois différents types de matériaux utilisés comme absorbeurs. On voit clairement que le rendement du capteur est plus important pour le cas d'un absorbeur en acier.

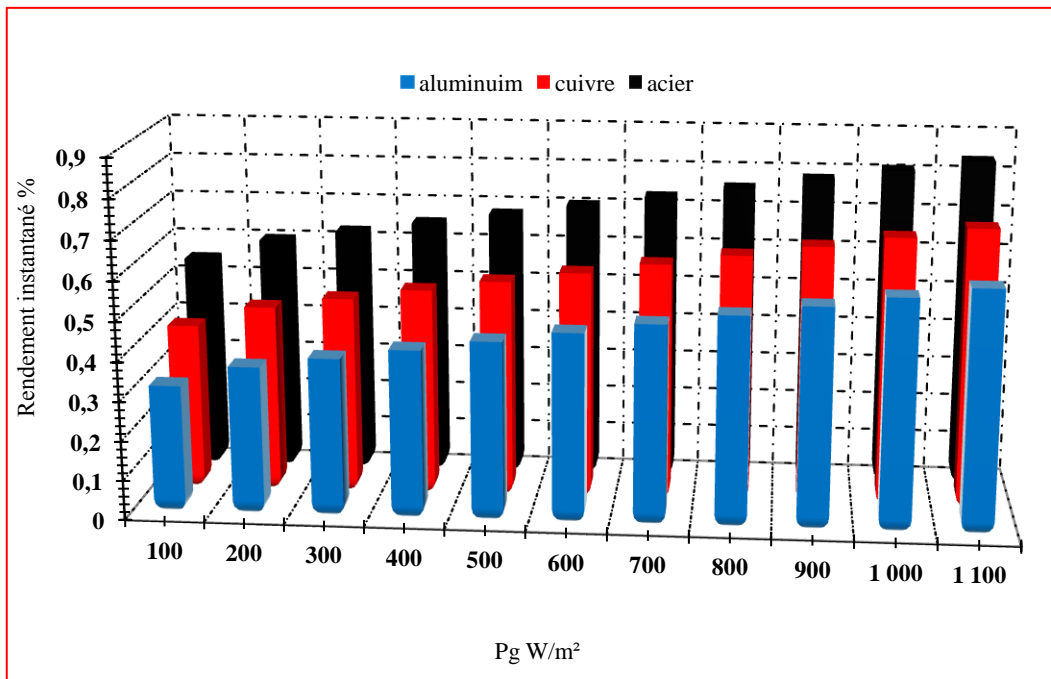


Figure IV.14. Variation du rendement instantané en fonction de la matière de l'absorbeur

IV.17. Influence de la sélectivité

Pour deux types d'absorbeur en acier, dont le premier est en acier doté d'une surface sélective en chrome noir avec un coefficient d'absorption $\alpha_{ab} = 0,95$ et d'un coefficient d'émission $\varepsilon = 0,09$ et le deuxième absorbeur est en acier poli non sélectif $\alpha_{ab} = 0,25$ et d'un coefficient d'émission $\varepsilon = 0,97$, on a tracé dans la figure 15 l'évolution du rendement en fonction du rayonnement solaire. On a remarqué que pour le même matériau d'absorbeur le rendement instantané est plus grand dans le cas d'un absorbeur doté d'une surface sélective. Cette différence est due à la couche sélective qui augmente l'absorption du matériau ce qui conduit à une grande quantité de chaleur absorbée et transférée au fluide caloporteur. Aussi cette surface sélective émet moins dans l'infrarouge, ce qui permet de diminuer les pertes par rayonnement.

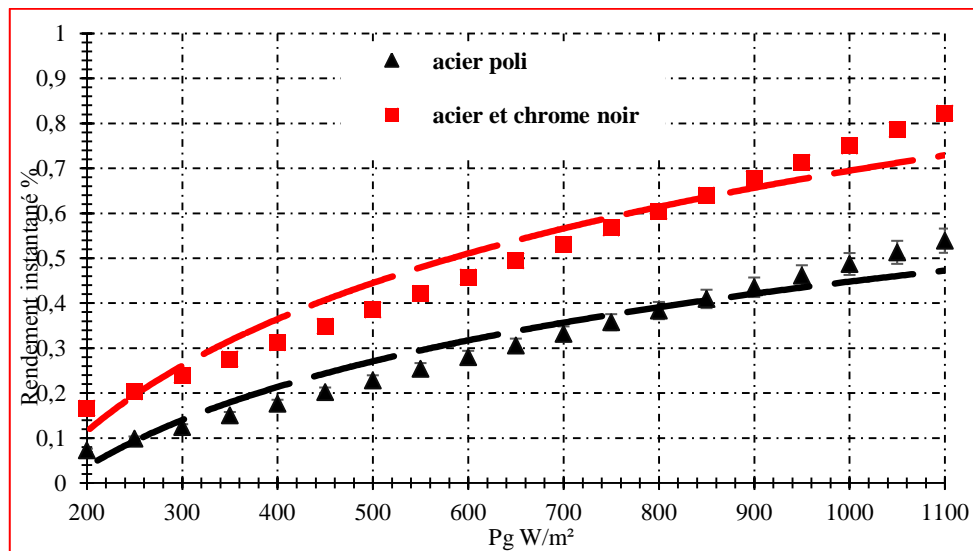


Figure IV15. Variation du rendement instantané en fonction de la sélectivité de l'absorbeur

IV. 18. Influence de la température moyenne de l'absorbeur

Parfois il est très intéressant de connaître l'influence de la température de l'absorbeur sur le rendement du capteur solaire. La figure (V. 16) montre la variation du rendement instantané en fonction de la température de la plaque absorbante. Il est à remarquer que l'élévation de la température de l'absorbeur permet une augmentation de l'efficacité du système. Cependant au-delà d'une certaine valeur, le rendement devient insensible à cette élévation. Au-delà de 85°C le rendement devient constant d'où la nécessité de penser à refroidir l'absorbeur en y ajoutant des ailettes sur sa surface en contact avec le fluide caloporteur.

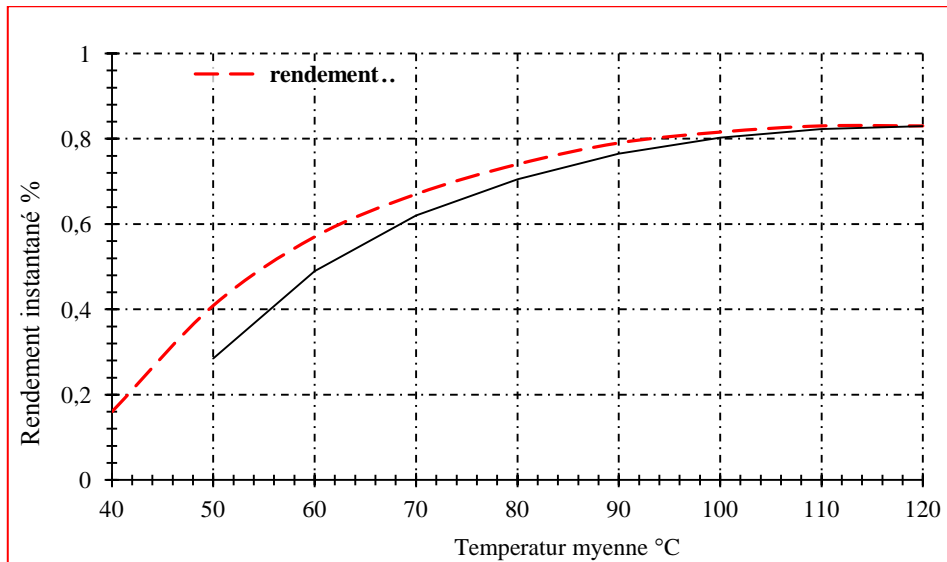


Figure IV.16. L'influence de la température de l'absorbeur sur rendement instantané du capteur

IV.19. Influence de l'écart de température entre l'absorbeur et le vitrage sur le rendement

La figure (17) traduit en fonction de cet écart la variation du rendement. On remarque que plus cet écart de température ($T_{ab}-T_v$) est grand plus le rendement est grand.

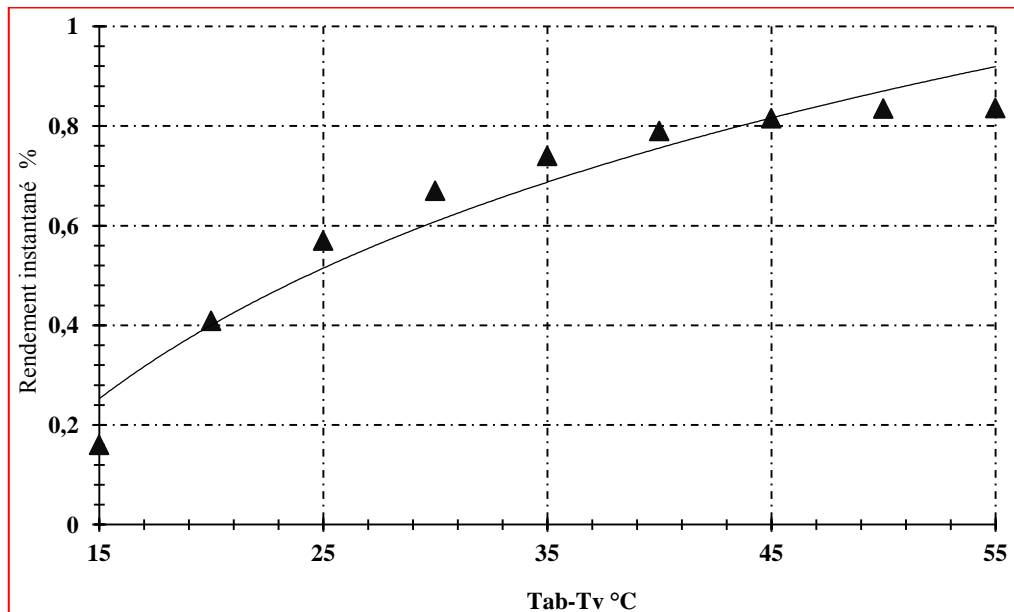


Figure IV.17. Effet de l'écart de température moyenne entre l'absorbeur et le vitrage sur rendement instantané du capteur

IV.20. Influence du débit d'air sur le rendement.

Le rendement du capteur augmente avec le débit comme le montrent les courbes de la figure (18), car une augmentation de ce dernier implique une augmentation de la vitesse d'air qui lèche l'absorbeur.

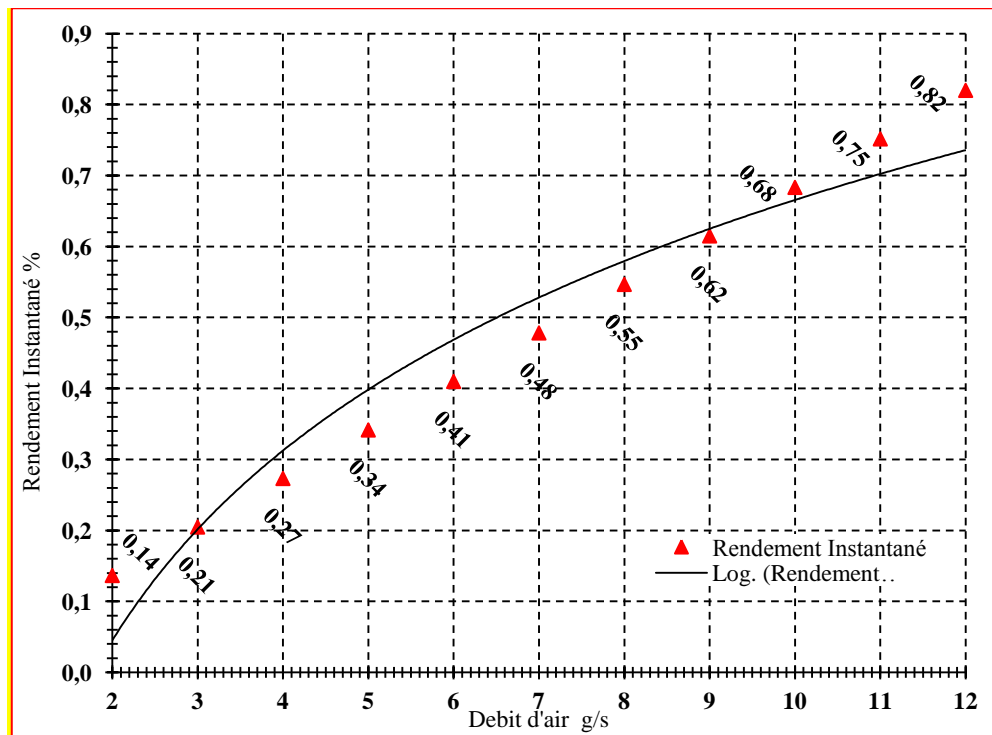


Figure IV.18. Variation du rendement instantané en fonction du débit d'air

IV.21. L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur

L'influence de la température de l'air à l'entrée du capteur sur le rendement instantané est présentée sur la figure (19).

On remarque que pour une température de sortie donnée, l'augmentation de la température d'entrée du fluide conduit à une diminution du rendement instantané. Il est souhaitable que la température d'entrée de l'air à l'entrée du capteur soit la plus faible possible afin de diminuer la température moyenne et que l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur étant fonction de l'écart de température entre la sortie et l'entrée du fluide.

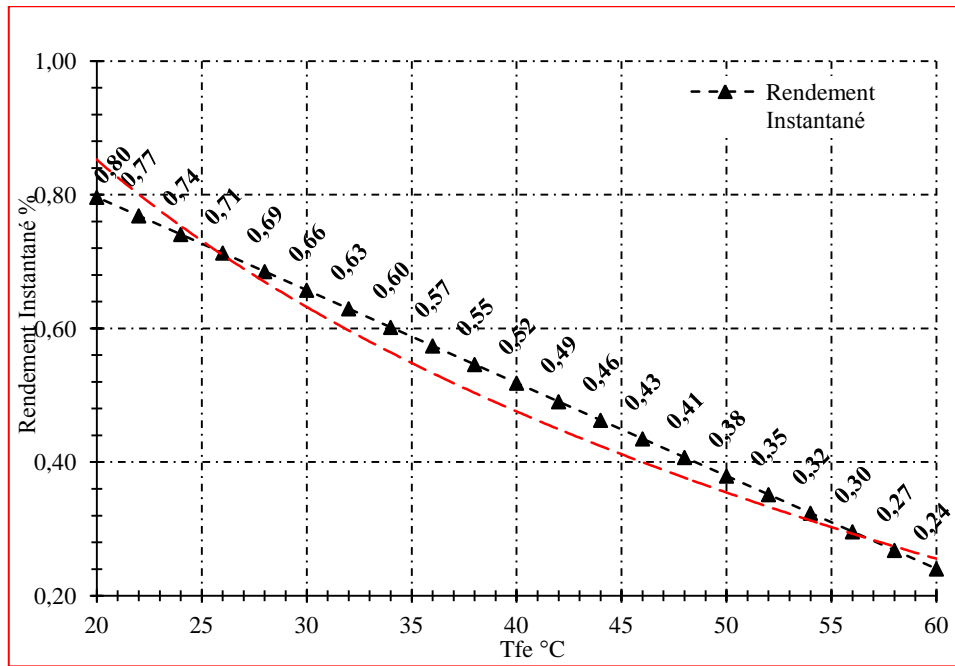


Figure IV. 19. Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur



Conclusion

Général

Conclusion générale

Nous avons conclu que de cette recherche ce qui suit:

- La température de sortie d'un CSP garni de chicanes est plus élevée que celui sans chicanes.
- Le rendement thermique du collecteur est important pour des valeurs importantes du débit du fluide caloporteur.
- Un gain d'énergie de 10% est enregistré dans le cas d'une couverture transparente d'épaisseur de 3 mm par rapport à 6 mm .
- *l'amélioration du rendement thermique d'un capteur solaire se base essentiellement sur la diminution des pertes thermiques.*
- *Les caractéristiques des matériaux utilisés pour le vitrage et pour l'absorbeur ont une grande influence sur les pertes thermiques ce qui influe sur le rendement du capteur.*
- *Le coefficient d'absorption et la conductivité thermique du matériau de l'absorbeur ont une influence proportionnelle à la quantité de chaleur transmise à l'air. Ce qui impose à l'acier d'être un bon matériau utilisé comme un absorbeur.*
- *La transmissivité a une influence indirecte et inversement proportionnelle à la quantité de chaleur transmise à l'air.*
- *Plus l'épaisseur du conduit isolant est grand plus la résistance thermique entre l'absorbeur et la vitre augmente. Ce qui influe positivement sur la température de sortie de l'air.*
- *On remarque que l'augmentation du débit ne permet pas au fluide de gagner une quantité de chaleur nécessaire pour élever sa température, mais elle nous permet d'obtenir un rendement considérable par rapport aux débits inférieurs, car la variation du débit calorifique est plus grande à celle de ΔT .*



Références

REFERENCES

[1]

[2] C. voyant, prédiction de séries temporelles de rayonnement solaire global et de production d'énergie photovoltaïque à partir de réseaux de neurones artificiels, thèse doctorat, université de Corse-Pascal Paoli, France, (2011).

[3] O.gergaud, modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, école normale supérieure de Cachan, France, (2002).

[4]

[5] J.M.Chassériaux, « *Conversion thermique du rayonnement solaire* », bordas Paris 1984

[6]: C, Fröhlich. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.

[7] PEUSER F.A., REMMERS K-H., SCHNAUSS M. : Installations solaires thermiques : conception et mise en oeuvre, Systèmes solaires, 2005, 400 p

[8] Y.jannot, thermique solaire, (2011).

[9] <http://nicolaselie.free.fr/tpe/html/mouvements.html>.

[10] TABET IsmailTHEME « Etude, Realisation et simulation d'un capteur Solaire » THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE 2016

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

[12] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).

[13]Ferdjani Ahmed Taha , systèmes thermiques et maîtrise d'énergie Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans , Mémoire Magister en, -ANNABA (2013)

[14]HADJ BELKACEMI Mohammed, Modélisation et Etude Expérimentation d'un Capteur Solaire non Vitré et Perforé, Mémoire de Master, Tlemcen,2011

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

[16] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).

- [17] ARBIA Aissa et CHAOUBI Ouafa . Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage. Mémoire MASTER
- [18] Yang, YT, Hwang CZ. (2003) "Calculation of turbulent flow and heat transfer in a porous-based channel", Int J. Heat Mass. Transfer; 46, pp. 771–80.
- [19] Hwang, R. R, Chow, Y. C., Peng, Y.F. (1999) "Numerical study of turbulent flow over-two dimensional surface-mounted ribs in a channel", International journal for Numerical Methods in Fluids. 37, pp. 767-785.
- [20] Yuan, Z.X. and Tao, W.Q. (1998), "Numerical prediction for laminar forced convection heat transfer in parallel-plate channels with streamwise-periodic rod disturbances", Int. J. Numerical Methods in Fluids, Vol. 28, pp. 1371-87.
- [21]
- [22]
- [23] Mr. Amraoui Mohammed Amine, *Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité, MEMOIRE DE MAGISTER ,2011-2012*
- [24] Patankar, S.V., Liu, C.H. and Sparrow, E.M. (1977), "Fully developed flow and heat transfer in ducts having streamwise -periodic variations of cross-sectional area", Journal of Heat Transfer, Vol. 99, pp. 180-6.
- [25] Ben Slama, R. (2007) "The air solar collectors : Comparative study, introduction of baffles to favor the heat transfer", Solar Energy 81, 139–149
- [26] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [27]
- [28] BENBOUZA CHAOUKI , *Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment-cas de l'Algérie, MEMOIRE de Magistère, UNIVERSITE CONSTANTINE12014*
- [29] : André Joffre. « énergie solaire thermique dans le bâtiment chauffe-eau solaires ». revue techniques de l'ingénieur BE 9164 .
- [30] : M.amjahdi, J.Lemale « Adopter le solaire –thermique et photovoltaïque ». DUNOD Paris 2011.
- [31] J, Bernard. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [32]Ferdjani Ahmed Taha , Développement d'un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans, Mémoire Magister, Université Mohamed Khider – Biskra 2013

[33]

[34] Kellar, K. M., Patankar, S. V., (1987) "Numerical prediction of flow and heat transfer in parallel plate channel with staggered fins", Journal of heat transfer. 109, pp. 25-30

[35] Bemer, C., Durst, F., McEligot, DM. (1984) "Numerical study of fluid flow and heat transfer in a parallel plate channel with baffles", Journal of Heat Transfer, pp. 106-743.

[36] J, Bonal; P, Rossetti. Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).

[37] A, H, Khedim. Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).

[38] S, El Mokretar; R, Miri; M, Belhamel. Etude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre, applications au séchage des produits agro-alimentaires, Revue des Energies Renouvelables, Vol 7, p 109-123. (2004)

[39] CHAOUBI Ouafa , Contribution à la simulation des transferts thermiques dans un capteur solaire plan pour application de séchage, Mémoire MASTER2015UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

[40] : Ben hamza Abderrahmane, « Simulation Numérique d'un capteur solaire plan utilisant des Matériaux à changement de phase », Université KASDI Merbah d' Ouargla, Belkhir ,Soutenu Publiquement , 31/05/2016,p. 5-21.

[41] : cours de transfert de chaleur Mr. Bousskia Taher

[42] : Boumediene Touati, « Etude théorique et expérimentale du séchage solaire des feuilles de la menthe verte (Mentha virida) »,Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen doctorat,11/2008.

[43] Les séchoirs solaires : théorie et pratique, Michel Dague net

[44] : Houhou Hatem , « Etude Théorique Et Expérimentale Du Séchage Solaire De Certains Produits Agro-alimentaires », Mémoire De Magister En Génie Mécanique , Université De Biskra, p 9-35-39.

[45] <https://www.google.com/search>.

[46] A. Boulemtafes , D. Semmar, « Conception et Réalisation d'un Séchoir Solaire Indirect »,Rev énergies renouvelables,(1999)97-100.

[47] Younsi sidi ali, « Etude bidimensionnelle d'un capteur solaire à tube sous vide avec un échangeur en épingle » , Mémoire de magister, Université Hassiba Benbouali Chleff, 2011, p. 14-18.

[48] Amraoui Mohammed Amine, « Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité »,mémoire de magister en génie mécanique, 2011/2012, p.45-46-64-70.

Résumé

Le présent travail est une contribution à l'étude théorique et expérimentale d'un type des capteurs solaire thermique pour des applications du séchage de la tomate produite dans la région d'Adrar. A travers cette étude nous avons déterminé les performances thermiques instantanées du système conçu. Il s'avère que l'efficacité de cet élément est très sensible aux variations des paramètres climatiques. Les résultats expérimentaux obtenus comparés à ceux issus des modèles existants s'avèrent concluants. Nous avons également déterminé expérimentalement en fonction de plusieurs paramètres de fonctionnement, aérothermiques de l'air et les dimensions des organes du CSP réalisé, l'évolution de la température de fluide caloporteur et le rendement instantané. Cette étude montre clairement l'efficacité des CSP et l'influence des types des matériaux ainsi que leurs épaisseurs

Mots clés : Solaire, capteur, plan, rendement.

Abstract

The present work is a contribution to the theoretical and experimental study of a type of solar thermal collectors for drying applications of tomato produced in the region of Adrar. Through this study we have determined the instantaneous thermal performance of the designed system. It turns out that the efficiency of this element is very sensitive to variations in climatic parameters. The experimental results obtained compared to those obtained from existing models determined also conclusive of several parameters of proven We have experimentally operating, aérothermal air and organ dimensions of the CSP achieved, the evolution of the heat transfer fluid temperature instantaneous yield . This study the

Key words Solar, sensor, plan yield

ملخص

دم العمل مساهمة في الدراسة النظرية والتجريبية لنوع المصيد الشمسي الحراري لتطبيق التجفيف منتج الطماطم في منطقة ادرار . خلال هذه الدراسة حددنا الاداء الحراري الفوري للنظام المصمم. اتضح لنا فعالية هذا العنصر و انه جد حساس للعوامل متغير في تجرية. النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها مقارنة مع تلك النماذج الموجودة . حددنا ايضا تجريبا وفقا العديد معاملتها التشغيلية , الحرارة هوائية و ابعاد جهاز مستقبل الشمسي مستوي مصنوع.التطور في درجة الحرار للسائل حراري و المردود الانية.توضح هذه الدراسة بوضوح الاداء مستقبل الشمسي المستوي و تطورات للنوع المواد مع سمكها

كلمات مفتاحية: الشمس، مستقبل، مستوي، مردودية.