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

Université d'Adrar Faculté des sciences et de la technologie Département des sciences de la matière



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN PHYSIQUE ENERGETIQUE

Théme

# Etude analytique et expérimentale des deux configurations d'un capteur plan destiné au chauffe-eau solaire : application au climat d'Adrar

Soutenu le :09 /06 /2015

Présenté par :

Membres de jury :

Président :

Mr: Boussaid Mohammed (Univ .d'ADRAR)

Examinateurs

Mr. Moungar Houcine (URERMS.ADRAR)

Mr: Mediani Ahmed (URERMS.ADRAR)

Membres de ju

Mr: Haida Abdelkarim

M<sup>eme</sup> : Zéghamri Leila

Encadré par :

# Dédicace

A la lumière de ma vie, mes très chers parents. A mon cher marie et ma chère petite Abir ,ils restent le diamant de mon cœur, tout le long de ma vie.

A mes chers sœurs et frères et leurs famílles. A tous mes amís.

Je dédie ce travail

ZEGHAMRI Leíla

# Dédicaces

je dédie les fruits de ce modeste travail : A mes chers parents A ma chère femme A tous mes frères et ma Sœur et leurs enfants A tous qui ceux mon aider de près ou de loin A tous mes amies.

Haída Abdelkarím.

## **Remerciements**

Avant tout, merci pour le grand DIEU qui nous avoir donné la volonté, le courage et la patience de mener le présent mémoire.

A travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre Promoteur Mr:

**MOUNGAR Houcine** Attaché de recherche à URERMS Adrar, pour sa direction de ce mémoire, ainsi que pour ses conseils précieux.

Nous remercions vivement Monsieur BOUSSAID Mohammed enseignant à l'université de Adrar, pour nous avoir fait l'honneur de présider ce jury.

Nous remercions aussi, Monsieur MEDIANI Ahmed Attaché de recherche à URERMS Adrar, d'avoir accepté de participer au jury de notre travail.

A touts les chercheurs et les travailleurs de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien d'Adrar. Une attention particulière à Monsieur ALLAOUI Mohammed , Mr. RAHMANI Abdellah , Mr. SAADI Zine , Mr. ATAOUAT Slimane, Mr. FANI Abderrahmen , Mr. KILAOUI Abdelkarim , ainssi que M<sup>eme</sup> LEBAANE Souad , M<sup>eme</sup> ROUMANI Khayra , M<sup>elle</sup> BEKRAOUI Amina et M<sup>elle</sup> ARAMA Fatima Zouhra.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin à la réalisation du présent travail.

Dédicace	i
Remerciement	iii
Sommaire	iv
Résumé	viii
Liste des tableaux	Х
Liste de figures	xi
Nomenclature	xiv
Introduction générale	01
Chapitre I :Etude bibliographique	
I-1. Introduction:	03
I-2. Energies renouvelables:	03
Description du soleil	03
I-3. Structure et composition de l'atmosphère	04
I-4. Mouvement de la Terre:	05
I-5. Mouvement apparent du Soleil	06
I-5.1. Hauteur angulaire du soleil (h):	07
I-5.2. Temps solaire vrais (TSV)	07
I-5.3. Temps universel Tu:	08
I-5.4. Azimut (a) :	08
I-5.5. Coefficient d'incidence	08
I-5.6. Direction des rayons solaires par rapport à un plan	09
I-5.7. Heures de lever et de coucher du soleil:	09
I-5.8. Durée d'insolation	09
I-6. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère	09
I-7. Le rayonnement solaire au sol :	10
I-7.1. Nature du rayonnement :	10
I-7.2. Eclairement ou Emittance énergétique	11
I-7.3. Absorption, Transmission, Réflexion	11
I-7.4. Corps noir, corps gris	11
I-7.5. Rayonnement du corps noir	12
I.7.6. Rayonnement du corps non noir	13
I.7.7. Emissivité ou facteur d'émissivité	13
I-8. Rayonnement solaire	13

I-9. Calcul des bilans radiatifs au sol	14
I-9.1. Notations	14
I-9.2. Eclairement direct <i>S</i> <sup>*</sup> :	15
I-9.3. Eclairement diffus $D^*$ :	16
I-9.4. Eclairement global G <sup>*</sup>	17
I-9.5. Energie solaire :	17
I-9.5.1. Caractères particuliers	17
I-9.5.2.L'effet de l'atmosphère.	17
I-9.5.3. Captation	19
I-10 .Convertisseurs photothermique de l'énergie solaire (Solaire thermique) :	20
I-10.1 Capteur solaire suivant leur forme	20
I-10.1 .2 Capteur solaire suivant le niveau de température	20
✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 20°à 50°C :	20
1. La cloche de jardinier :	21
2. Les capteurs à air :	21
3. Les distillateurs solaires :	21
4. Les capteurs à eau (sans vitrage) :	21
5. Tour solaire	22
✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 50 a 100°C :	22
1. Les capteurs plans avec couverture :	22
2. Capteur stockeur :	23
3. Étangs Solaires	23
✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 100 à 150°C :	24
1. Les capteurs à tube sous vide :	24
✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 150 à 250°C :	25
1. Capteurs mobiles autour d'un axe :	25
2. Capteurs fixes (a chaudière mobile) :	25
✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire de 250 et jusqu'à 3000°C:	25
1. Capteurs à concentration deux axes :	25
I-10.2 Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan	26
I-10.3. Les différents composants d'un capteur solaire plan:	26
I-10.3.Indications concernent les surfaces des capteurs	30

I-10.4 Les différents paramètres influent sur le rendement du capteur solaire plan	31
I-10.4 Quelques études réalisées sur les capteurs solaires plans	32
I-10.5 Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	34
Chapitre II: Etude Analytique	
II-1 Spécification d'un capteur solaire plan	35
II-1.1 Principe :	35
II-1.2 Hypothèses	35
II-1.3 Bilan thermique global	36
II-1.3.1 Expression du coefficient global des pertes	39
II-1.3.2 Calcul du rendement	42
II-1.3.2.1 Profil transversal de température	42
II-1.3.2.2 Rendement de l'ailette F:	45
II-1.3.2.3 Facteur d'efficacité de la plaque absorbante :	45
II-1.3.2.4 Profil de température dans le sens de l'écoulement du fluide	46
II-1.3.2.5 Calcul du rendement global	47
II-1.3.3: Température moyenne de l'absorbeur:	47
II-1.4 Mode de circulation du fluide caloporteur	48
II-1.5 Autres grandeurs caractéristiques	49
II-1.5.1 Rayonnement de seuil	49
II-1.5.2 Température limite	49
II-1.5.3 Inertie thermique :	50
II-1.5.4 Pertes de charge	50
II-1.6 Méthode du calcul des paramètres caractéristiques d'un capteur solaire plan	52
II-1.6.1 Vitesse de circulation du fluide	52
II-1.6.2 Le débit de fluide	52
II-1.6.3 Calcul des paramètres principaux	53
Cas du capteur en tube parallèle	53
Cas du capteur en tube serpentin	61
Chapitre III: Etude Expérimentale et discussion des résultats	
III-1. Introduction	65
III-2.Description du banc d'essai	65
III-2.1. Caractéristiques physiques du capteur solaire plan d'essais :	66

III-2.2: Montage de prototype:	66
III-2.3 Instrumentation	68
III-2.4. Enregistrement des données :	70
III-3. Mode opératoire :	71
III-4 : Les résultats expérimentaux	71
III-4.1 Premier cas : Capteur solaire plan en tube parallèle	71
III-4.1.1 La variation des températures et le rayonnement pour des	
journées différentes	71
✓ Pour l'inclinaison: 60°	71
✓ Pour l'inclinaison : 30°	72
III-4. 2 Deuxième cas : Capteur solaire plan en tube serpentin	74
III-4.2.1 La variation des températures et le rayonnement pour des	
journées différentes	74
✓ Pour l'inclinaison: 60°	74
✓ Pour l'inclinaison : 30°	75
III-4. 3 La comparaison entre les deux configurations	76
Conclusion générale	78
Annexe	
Les nombres adimensionnels	80
Références Bibliographiques	82

#### Résumé

L'objectif du présent travail consiste a étudié en régime permanant le rendement de la conversion thermique de l'énergie solaire des deux capteurs solaires plans à configuration différente l'un en tube serpentin et l'autre en tube parallèle utilisent dans les installations solaires à eau chaude sanitaire, ils sont réalisés au niveau de l'URER/MS-ADRAR pour mesurer les variations des températures de l'ambiante , la vitre , la plaque absorbante, les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur et le rayonnement solaire incident pour des positions et des journées précises.

Pour atteindre notre objectif on a montré la conversion de l'énergie solaire ainsi les caractéristiques d'un capteur solaire plan, les principaux paramètres physiques, thermique et de construction qui sont influés sur le rendement du capteur (inclinaison, débit du fluide, vitesse du vent...) la résolution analytique des équations a été effectuée moyennant certaines hypothèses simplificatrices de base, et on se basant sur le bilan thermique qui est établi sur les principales parties composants le système. Les différents testes expérimentaux sont effectués au site d'Adrar qui est caractérisé par une latitude 27.88° et une longitude 0.28° et sont présentés sous forme des courbes permettent la détermination du calcul des performances thermiques des capteurs à travers l'estimation du rendement et finalement, on a fait une étude comparative entre les deux configurations.

**Mots clés :** capteur solaire plan / solaire Thermique /chauffe -eau solaire / absorbeur / Eclairement solaire /performances thermiques / rendement thermique.

#### ملخصص

يهدف هذا العمل إلى دراسة مردودية تحويل طاقة الإشعاعات الشمسية إلى طاقة حرارية و ذلك في لاقطين شمسيين مستويين ذو الشكلين الهندسيين المختلفين للأنبوب الاسطواني: الأول ذو أنبوب متوازي و الآخر ذو أنبوب حلزوني و المستعملة في التجهيزات الشمسية لتسخين المياه الصحية. اللذان تم انجاز هما على مستوى وحدة البحث في الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي -ادر ار من اجل قياس درجة حرارة الوسط , الزجاج ,اللوح الماص, درجة حرارة مدخل و مخرج السائل و الإشعاع الشمسي الساقط لوضعيات و أيام معينة .

لبلوغ هدفنا, درسنا مبدأ تحويل الطاقة الشمسية و الخصائص الأساسية للاقط الشمسي المستوي, ثم بينا أهم المتغيرات الفيزيائية, الحرارية و البنيوية التي لها تأثير على المردودية العامة للاقط ( زاوية ميلان اللاقط, تدفق السائل, سرعة الرياح,....). الحل التحليلي للمعادلات تم إخضاعها لبعض الافتراضات المبسطة الأساسية على أساس التوازن الحراري الذي أساس التوازن و الحراري الذي أساس التوازن و الحراري الذي أساس التوازن و الحراري الحل التحليلي للمعادلات تم إخضاعها لبعض الافتراضات المبسطة الأساسية على أساس التوازن الحراري الذي أنشئ على الأجزاء الرئيسية التي يتألف منها النظام. يتم تنفيذ مختلف التجارب والاختبارات في منطقة أدرار التي تميز بخط العرض و الخراري الذي أنشئ على الأجزاء الرئيسية التي يتألف منها النظام. يتم تنفيذ مختلف التجارب والاختبارات في منطقة أدرار التي تتميز بخط العرض منها المردودية و خط طول 0.28 درجة و عرضت النتائج على شكل منحنيات تسمح بحساب الأداء الحراري من خلال تقدير المردودية وفي الأخير أجرينا دراسة مقارنة للشكلين الهندسيين.

الكلمات المفتاحية : اللاقط الشمسي المستوي/ الحرارة الشمسية / سخان الماء الشمسي / اللوح الماص / الإشعاع الشمسي / الأداء الحراري / المردود الحراري.

Tableau I.1: Notations utilisée pour des bilans énergétique solaire	15
Tableau I.2: Quelques caractéristiques optiques des verres	27
Tableau I.3: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur	28
Tableau I.4: Revêtements des surfa ces d'absorbeurs	29
Tableau I.5: Quelques propriétés des isolants	30
Tableau II.1: Données du capteur	53
Tableau II.2: Formules et propriétés de l'air	55
Tableau II.3: Formules et propriétés de l'eau	58
Tableau II.4: Résultats des calculs	63
Tableau III.1: Caractéristiques techniques du capteur	66
Tableau III.2: Les températures maximales des sorties de fluide dans les deux inclinaisons	73
Tableau III.3: Les températures maximales des sorties de fluide dans les deux inclinaisons.	76
Tableau III.4:L'écart de la température entre les valeurs des températures des sorties de	
fluide des deux capteurs	76

Figure I.1: description du soleil	04
Figure I.2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil	05
Figure I.3 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L	06
Figure I.4 : Repérage de la position du Soleil	06
Figure I.5 : Schéma représentatif de l'orientation d'un capteur solaire plan	08
Figure I.6 : Spectre du rayonnement atmosphérique	10
Figure I.7: Spectre des ondes électromagnétiques	10
Figure I.8 : Réception du rayonnement par un corps	11
Figure I.9 : Courbe d'émittance d'un corps noir à 100°C et à 5780 K	12
Figure I.10: Distribution spectrale de l'énergie solaire hors atmosphère	13
Figure I.11 : Distribution spectrale de l'énergie solaire au niveau du sol	14
Figure I.12: Transmission du rayonnement	15
Figure I.13 : Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère	18
Figure I.14 : Capteurs solaire concentrateurs	20
Figure I.15: La cloche du jardinier	20
Figure I.16 : Capteur plan à air	21
Figure I.17 : Distillateur solaire	21
Figure I.18 : Chauffage d´une piscine a l´aide d´un capteur sans vitrage	22
Figure I.19: .Tour solaire	22
Figure I.20: Capteur plan vitré	23
Figure I.21: Capteur stockeur	23
Figure I.22 : Etang solaire	24
Figure I.23: Capteur solaire à tube sous vide	24
Figure I.24 : Capteur cylidro-parabolique nord-sud mobile autour d'un axe	25
Figure I.25 : Capteur COSS (a chaudière mobile)	25
Figure I.26 : Capteur a concentration deux axes	26
Figure I.27 :Principe de fonctionnement	26
Figure I.28: Capteur plan	27
Figure I.29 : Le nombre de vitres	28
Figure I.30 : Absorbeur à ailettes	29

Figure I.31: Absorbeur à coussin	29
Figure I.32: Absorbeur « Roll bond »	29
Figure I.33: Indications des surfaces de capteur	31
Figure I.35: Formes géométriques des plaques absorbantes	33
Figure I.36: Différents échanges thermiques dans un capteur plan	34
Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan	35
Figure II.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire	36
Figure II.3: Schématisation du flux convectifs dans un capteur solaire plan	39
Figure II.4 : Coupe longitudinale d'un absorbeur	42
Figure II.5: Schéma en coupe de l'absorbeur	43
Figure II.6 : Schéma du bilan thermique d'un morceau d'ailette	43
Figure II.7 : Installation d'un capteur solaire avec pompe	48
Figure II.8: schéma représente le débit massique de fluide caloporteur	52
Figure II.9 : Convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre	55
Figure II.10: Organigramme de calcul du bilan énergétique	64
Figure III.1: Photo du prototype de deux capteur solaire plan réalisé à l'URER/MS	65
Figure III.2: Plaque absorbante	66
Figure III.3: Photos représentants des différents éléments du capteur plan en tube	
parallèle	67
Figure III.4.: Photos représentants des différents éléments du capteur plan en tube	
serpentin	67
Figure III.5: Schéma représentatif d'un thermocouple relié aux bornes d'une acquisition	
de données	68
Figure III.6: L'étalonnage des thermocouples	69
Figure III.7: Le pyranomètre	70
Figure III.8: La pompe de circulation	70
Figure III.9: L'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des	
paramètres mesurés	70
Figure III.10 : La variation le rayonnement pour 25/01/2015	71
Figure III.11 : La variation le rayonnement pour 20 à 24 /01/2015	71
Figure III.12 : La variation des températures pour Vitesse 1_25/01/2015	72
Figure III.13 : La variation des températures pour Vitesse 2 _ 21 à 24 /01/2015	72

Figure III.14 : La variation des températures pour Vitesse 3_20/01/2015	72
Figure III.15 : La variation des températures pour Vitesse 1_03/02/2015	72
Figure III.16 : La variation des températures pour Vitesse 2_04/02/2015	72
Figure III.17 : La variation des températures pour Vitesse 3_10/02/2015	73
Figure III.18 : La variation le rayonnement pour 10/02/2015	73
Figure III.19: Variation temporelle du rendement instantané	73
Figure III.20 : Evolution du rendement instantané $\eta$ en fonction de $\Delta T/G$	73
Figure III.21 : La variation le rayonnement pour 24/02/2015	74
Figure III.22 : La variation le rayonnement pour 25/02/2015	74
Figure III.23 : La variation le rayonnement pour 26/02/2015	74
Figure III.24 : La variation des températures pour Vitesse 1_24/02/2015	74
Figure III.25 : La variation des températures pour Vitesse 2_25/02/2015	74
Figure III.26 : La variation des températures pour Vitesse 3_26/02/2015	74
Figure III.27 : La variation le rayonnement pour 24/02/2015	75
Figure III.28 : La variation le rayonnement pour 20/02/2015	75
Figure III.29 : La variation le rayonnement pour 18/02/2015	75
Figure III.30 : La variation des températures pour Vitesse 1_24/02/2015	75
Figure III.31 : La variation des températures pour Vitesse 2_20/02/2015	75
Figure III.32 : La variation des températures pour Vitesse 3_18/02/2015	75
Figure III.33: Variation temporelle du rendement instantané	76
Figure III.34: Evolution du rendement instantané $\eta$ en fonction de $\Delta T/G$	76

Chapit	Chapitre I	
λ	Langueur d'onde (µm)	
$\lambda_{\mathrm{m}}$	Langueur d'onde correspond à l'émission maximale (µm)	
М	Emittance énergétique totale (w/m <sup>2</sup> )	
$M_{\lambda T}$	Emittance monochromatique d'un corps à la température T(w/m <sup>2</sup> )	
Ø <sub>λ</sub>	Flux d'énergie d'un rayon incident (w/m <sup>2</sup> )	
$ ho_{\lambda T}$	Coefficient de réflexion monochromatique d'un corps à la température T	
$\alpha_{\lambda T}$	Coefficient d'absorption monochromatique d'un corps à la température T	
$ au_{\lambda T}$	Coefficient de transmission monochromatique d'un corps à la température T	
$\rho_{T}$	Coefficient de réflexion total d'un corps à la température T	
$\alpha_{\rm T}$	Coefficient d'absorption total d'un corps à la température T	
$\tau_{\rm T}$	Coefficient de transmission total d'un corps à la température T	
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	
$\mathcal{E}_T$	Emissivité (d'un corps noirs)	
$\varepsilon_{\lambda T}$	Emissivité monochromatique d'un corps à la température T	
Е	Constante solaire (hors atmosphère) (w/m <sup>2</sup> )	
j	Le numéro d'ordre du jour de l'année (Jour)	
G	Irradiation solaire globale (w/m <sup>2</sup> durée)	
D	Irradiation solaire directe (w/m <sup>2</sup> durée)	
S	Irradiation solaire diffuse(w/m <sup>2</sup> durée)	
<i>G</i> *	Eclairement solaire global(w/m <sup>2</sup> )	
$D^*$	Eclairement solaire direct(w/m <sup>2</sup> )	
<i>S</i> *	Eclairement solaire diffus(w/m <sup>2</sup> )	
<i>I</i> *	Flux solaire reçu par une surface perpendiculaire au rayon solaire(w/m <sup>2</sup> )	
C <sub>i</sub>	Coefficient d'incidence	
θ	Angle d'orientation (sur un plan horizontal au sol) (deg)	
φ	Angle d'inclinaison du capteur (deg)	
Н	Hauteur solaire (deg)	
А	L'azimut (deg)	
δ	Déclinaison(deg)	
Lt	La latitude(deg)	
Long	La longitude(deg)	

$Tsv$ Temps solaire vrai (heure) $Tsm$ Temps solaire moyen (heure) $Tsm$ Temps solaire moyen (heure) $Tt$ Equation du temps (Ecart)(min) $Tu$ Temps universel $Tlf$ Temps légal fixe (heure) $Tsveen$ Temps de lever du soleil (heure) $Tsveen$ Temps de coucher du soleil (heure) $Dmsol$ Durée d'insolation (heure) $Pattan$ Pression atmosphérique (atm $Pattan$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de Linke $B$ Coefficient de trouble atmosphérique $T_T_a$ Température aubiante (°C) $T_s$ Facteur du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_s$ Funpérature du fluide à looptreur (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux suite transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_s$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_c$ Facteur d'absorption de la couverture pour le spectre solaire $\tau_c$ Facteur d'absorption de la couverture pour le spectre solaire $\tau_c$ Coefficient de presion constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $\mu_c$ Coefficient de pretion constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $\mu_c$ Coefficient de pretion constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²)	ω	Angle horaire(deg)	
$Tsm$ Temps solaire moyen (heure) $Ti$ Equation du temps (Ecart)(min) $Tu$ Temps universel $Tuf$ Temps légal fixe (heure) $T_{SVece}$ Temps de lever du soleil (heure) $T_{SVece}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{arm}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C)mMasse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble de Linke $T_{fe}$ Température aufluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_s$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de laplaque absorbante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $\rho_{c}$ Chalteur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $r_{cs}$ <th>Tsv</th> <td>Temps solaire vrai (heure)</td>	Tsv	Temps solaire vrai (heure)	
ETEquation du temps (Ecart)(min)TuTemps universel $Tlf$ Temps légal fixe (heure) $T_{SVLev}$ Temps de lever du soleil (heure) $T_{SVLev}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $R_{vs}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C)mMasse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble de LinkeTfreTempérature du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_{st}$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{es}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{es}$ Facteur d'absorption de la couverture pour le spectre solaire $\tau_{es}$ Facteur de transmission constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de prete par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{ma}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Tsm	Temps solaire moyen (heure)	
TuTemps universel $Tlf$ Temps légal fixe (heure) $T_{sytev}$ Temps de lever du soleil (heure) $T_{sytev}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{os}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphérique $T_{fg}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_s$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_s$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\tau_c$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (°C) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de rouble at la que capteur (W/m²) $q_st$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante (°C) $A$ Surface de la plaque absorbante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (M²) $A_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m²°K) $T_m$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	ET	Equation du temps (Ecart)(min)	
$Tlf$ Temps légal fixe (heure) $T_{SVLev}$ Temps de lever du soleil (heure) $T_{SVLev}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{atm}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble da l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide a la sortic de l'absorbeur (°C) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{rm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Tu	Temps universel	
$T_{SVLev}$ Temps de lever du soleil (heure) $T_{SVcoch}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{atm}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitre II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_f_s$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux sultie transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_st$ Flux socké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $m$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) °K) $T_{pm}$ Température du fluide caloporteur (C)	Tlf	Temps légal fixe (heure)	
$T_{Sveech}$ Temps de coucher du soleil (heure) $D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{atm}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphérique $Chapter H$ $T_fe$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_fs$ Facteur du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux sultie transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_s$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur du fluide a loronteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) °K) $T_{rm}$ Température du fluide caloporteur (Kg/sec)	T <sub>SVLev</sub>	Temps de lever du soleil (heure)	
$D_{insol}$ Durée d'insolation (heure) $P_{atm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{atm}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitreI $T_fa$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_fs$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_st$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission	T <sub>SVcoc</sub>	h Temps de coucher du soleil (heure)	
$P_{acm}$ Pression atmosphérique (atm $P_{vs}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapier II $T_fe$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_fs$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux suite transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_st$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{st}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{rm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	D <sub>insol</sub>	Durée d'insolation (heure)	
$P_{vs}$ Pression de vapeur saturante (atm) $T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitre II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température du a la paroi absorbante. (°C)	P <sub>atm</sub>	Pression atmosphérique (atm	
$T_a$ Température ambiante (°C) $m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitre IITempérature du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\pi_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $m$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$P_{vs}$	Pression de vapeur saturante (atm)	
$m$ Masse d'air optique relative $E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitre II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_y$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $r_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $m$ Débit massique du fluide caloporteur (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	T <sub>a</sub>	Température ambiante (°C)	
$E_R$ Epaisseur optique de Rayleigh $T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapitre II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_{st}$ Flux socké dans le capteur (W/m²) $q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	т	Masse d'air optique relative	
$T_L$ Facteur de trouble de LinkeBCoefficient de trouble atmosphériqueChapiter II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur d'absorption de la couverture pour le spectre solairemDébit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$E_R$	Epaisseur optique de Rayleigh	
BCoefficient de trouble atmosphériqueChapire II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaireminDébit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$T_L$	Facteur de trouble de Linke	
Chapitre II $T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{es}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $m$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	В	Coefficient de trouble atmosphérique	
$T_{fe}$ Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C) $T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solairemDébit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Chapi	Chapitre II	
$T_{fs}$ Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C) $Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $q_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solairemDébit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	T <sub>fe</sub>	Température du fluide à l'entrée de l'absorbeur (°C)	
$Q_s$ Flux solaire absorbé (W/m²) $Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $Q_{st}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\dot{m}$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$T_{fs}$	Température du fluide à la sortie de l'absorbeur (°C)	
$Q_u$ Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m²) $Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $\alpha_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $m$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Q <sub>s</sub>	Flux solaire absorbé (W/m <sup>2</sup> )	
$Q_p$ Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m²) $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $\alpha_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\dot{\pi}_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\dot{m}$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$Q_u$	Flux utile transmis au fluide caloporteur (W/m <sup>2</sup> )	
$Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur (W/m²) $\alpha_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\dot{m}$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$Q_p$	Flux perdu vers le milieu extérieur (W/m <sup>2</sup> )	
$\alpha_{ps}$ Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire $\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire $\dot{m}$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Q <sub>st</sub>	Flux stocké dans le capteur (W/m <sup>2</sup> )	
$\tau_{cs}$ Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solairemDébit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$\alpha_{ps}$	Facteur d'absorption de la plaque absorbante pour le spectre solaire	
$\dot{m}$ Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec) $C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C) $A$ Surface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	$ au_{cs}$	Facteur de transmission de la couverture pour le spectre solaire	
$C_p$ Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	ṁ	Débit massique du fluide caloporteur (Kg/sec)	
ASurface de la plaque absorbante (m²) $P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Cp	Chaleur spécifique à pression constante (KJ/Kg. °C)	
$P_c$ Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m²) $h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	Α	Surface de la plaque absorbante (m <sup>2</sup> )	
$h_c$ Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m² °K) $T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	P <sub>c</sub>	Déperditions thermique du capteur par convection et conduction (W/m <sup>2</sup> )	
$T_{pm}$ Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	h <sub>c</sub>	Coefficient de perte par conduction/convection du capteur (W/m <sup>2</sup> °K)	
r ·	T <sub>pm</sub>	Température moyenne de la paroi absorbante. (°C)	

$\varepsilon_p$	Emissivité globale hémisphérique de l'absorbeur. (W/m <sup>2</sup> °K)
U	Coefficient global de perte du capteur (W/m <sup>2</sup> °K)
η	Rendement global
$\eta_{en}$	Rendement énergétique (thermique)
$\eta_R$	Rendement optique (radiatif) (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{pAR}$	Pertes thermiques par l'avant ou le haut (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{pAV}$	Pertes thermiques par l'arrière ou le bas (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{pc}^{VC}$	Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{pc}^R$	Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{ca}^V$	Flux échangé par convection entre la couverture et l'air du milieu extérieur (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{ca}^R$	Flux échangé par rayonnement entre la couverture et le milieu extérieur (W/m <sup>2</sup> )
$h_{pc}^{VC}$	Coefficient de transfert de chaleur par convection et conduction paroi /couverture(W/m <sup>2°</sup> C)
$h_{pc}^R$	Coefficient de transfert de chaleur par rayonnement entre paroi et couverture (W/m <sup>2</sup> °C)
$h_{ca}^V$	Coefficient de transfert de chaleur par convection entre couverture et ambiant ( $W/m^{2\circ}C$ )
$\alpha_{pi}$	Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR
$\alpha_{ci}$	Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR
<i>h</i> <sub>vent</sub>	Coefficient de convection ( $W/m^{2\circ}C$ )
<i>u</i> <sub>vent</sub>	Vitesse du vent (m/Sec)
$h_{ca}^R$	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la couverture et l'ambiant (W/m <sup>2</sup> °C)
e <sub>i</sub>	Epaisseur de l'isolant (m)
$\lambda_i$	Conductivité thermique de l'isolant (W/m°C)
h <sub>pAV</sub>	Coefficient global de perte vers l'avant (W/m <sup>2°</sup> C)
h <sub>pAR</sub>	Coefficient global de perte vers l'arrière (W/m <sup>2°</sup> C)
l	Distance entre deux tubes de l'absorbeur. (m)
D <sub>i</sub>	Diamètre intérieur du tube (m)
D <sub>e</sub>	Diamètre extérieur du tube (m)
$T_t$	Température de la surface du tube (Points d'assemblage avec l'ailette) (°C)
ω	Période
F	Rendement de l'ailette
$Q_{pltb}$	Flux transféré de l'ailette au tube (W/m <sup>2</sup> )
$Q_{sltb}$	Puissance utile pour tube (W/m <sup>2</sup> °C)

Facteur d'efficacité de l'absorbeur
Nombre des tubes de l'absorbeur (Tube)
Langueur tube égale langueur capteur (m)
Température moyenne du fluide dans l'absorbeur (°C)
Facteur de conductance de l'absorbeur
Densité du fluide caloporteur (kg/m)
Vitesse du fluide dans les tubes de l'absorbeur (m/Sec)
Nombre de Reynolds
La vitesse du fluide dans les tubes (m/sec)
Débit du fluide dans un tube (kg/sec)
Energie qui correspond au rayonnement de seuil (W/m <sup>2</sup> )
Température limite (°C)
Temps nécessaire à la mise en température (inertie du capteur) (Sec)
Pertes de charge totale (Pa)
Pertes de charge linéaire (Pa)
Pertes de charge singulière (Pa)
Nombre de Nusselt
Nombre de Prendtel
Nombre de Grachauff
Nombre de Rayleigh.
Nombres de Reynolds
Conductivité thermique de l'air (W/m°C)
Viscosité dynamique (kg/sec.m <sup>2</sup> )
Température moyenne du fluide (°C)
Coefficient de convection fluide paroi du tube de l'absorbeur (W/m <sup>2</sup> °C)
Température moyenne de la paroi absorbante (initial imposé) (°C)
Température moyenne de la couverture(°C)

# Introduction générale

#### Introduction générale

Les sources d'énergie sont les matières premières ou les phénomènes naturels employés pour produire de l'énergie. On distingue les énergies fossiles et les énergies renouvelables. Les réserves d'énergies fossiles comme le pétrole et le gaz sont difficilement accessibles (fond des océans, par exemple) et mal réparties à la surface de notre planète, et les problèmes de pollution qui sont causés par l'utilisation de ces sources d'énergie conduisent à trouver d'autres sources d'énergie. L'utilisation actuelle de l'énergie nucléaire exige une technologie développée et peut être dangereuse. Donc les risques réels d'épuisement des sources d'énergies fossiles à terme nous font considérer de plus en plus les sources d'énergies renouvelables.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contrechoc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

Donc, les énergies renouvelables seront à la future les énergies alternatives de l'énergie du pétrole, et le développement préalable de l'exploitation de ce genre des énergies aura un effet appréciable pour les consommations des énergies qui sont en plus croissances.

Le soleil est classé comme une source d'énergie très importante. Cette énergie peut être exploitée dans plusieurs domaines tels que, le séchage des produits agricoles et du bois, distillation de l'eau de mer, climatisation des locaux, production de l'eau chaude, production de l'électricité, la réfrigération solaires,......etc.

Toutes ces applications ne peuvent être réalisés qu'avec des dispositifs qui nous permettons de concentrer le rayonnement solaire qui arrive sur terre, tels que, les panneaux photovoltaïques, les capteurs solaires thermiques plans ou concentrateurs, les distillateurs solaires...etc.

Dans notre cas, nous somme intéressés par le capteur thermique plan, qui est un système qui peut intercepter le rayonnement solaire pour le transformer en énergie calorifique utilisable directement ou après stockage.

L'application la plus simple et la plus immédiate de l'énergie solaire, est la production d'eau chaude à usage domestique. C'est aussi l'une des plus anciennes, puisque plusieurs systèmes de chauffe-eau solaires ont été conçus depuis les débuts du vingtième siècle jusqu'à nos jours à travers le monde, plus performants les uns que les autres.

Un système de chauffage solaire se compose généralement de trois parties, la captation, le stockage, et la distribution. La captation est la partie principale de la conversion solaire. Elle est constituée par le capteur solaire. C'est ce dernier qui est convertit l'énergie solaire en chaleur qu'il transmet au fluide caloporteur contenu dans son absorbeur. Donc, vu le rôle très important que joue le capteur solaire dans le processus de la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, plusieurs travaux ont portés sur cette étude du capteur solaire plan et ayant surtout pour but l'amélioration de son rendement instantané qui est la performance la plus significative. Le rendement instantané du capteur solaire plan varie avec la géométrie du capteur, ses paramètres internes et les paramètres externes comme l'ensoleillement, la température ambiante ......etc.

Le prototype des deux capteurs solaires plans a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS) à Adrar, il consiste à faire une étude comparative expérimentale permet d'évaluer des performances entre les deux capteurs.

Ce travail est constitué de trois chapitres, précédés d'une introduction générale. Dans le premier chapitre de notre étude nous présentons des généralités sur le gisement solaire et une étude bibliographique sur les capteurs solaires de manière générale puis de façon détaillée nous présentons le prototype construit à l'URER/MS. Dans le deuxième chapitre, Une étude analytique du capteur solaire plan, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur, les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système en régimes permanent.

Dans le troisième chapitre, nous exposons l'étude expérimentale de ce prototype avec la description du banc d'essai expérimental, les différents instruments utilisés, les résultats expérimentaux obtenus et leurs interprétations.

Finalement, ces trois chapitres sont complétés par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I: Etude bibliographique**

#### **I-1. Introduction:**

Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en ressources fossiles et fissiles non renouvelables qui sont accumulées dans l'écorce terrestre au cours desères géologiques, du fait des processus biologiques ou physicochimiques.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergie utilisée par l'homme dans ce chapitre, nous étudions brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçu au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude. [1]

#### **I-2.Energies renouvelables:**

Les sources des énergies renouvelables les plus connus actuellement sont :

**1).Énergie hydraulique**: L'énergie hydraulique vient d'un potentiel énergétique lié à l'exploitation de la chute d'un cours d'eau ou d'un barrage pour la transformer en énergie électrique à l'aide de turbines hydrauliques.[3]

**2).Énergie L'éolienne** (Energie du vent): Une éolienne est un moteur actionné par le vent. Un aérogénérateur est un générateur de courant électrique utilisant l'énergie du vent.

**3).Énergie La biomasse :** Produite par combustion, ou a partie des transformations énergétiques basés sur un processus vivant et par extension.[3]

**4).Énergie Géothermie** : C'est l'énergie extraite à partir des eaux chaudes, de la vapeur ou de la chaleur présente dans certaines parties de la terre à fort degré géothermique. [3]

**5)** L'énergie des mers ou énergie marine : C'est une énergie renouvelable très peu exploitée jusqu'ici. Elle désigne l'énergie produite par les vagues et les marées, ainsi que l'énergie thermique de l'océan chauffé par les rayons du soleil. [3]

6) L'énergie solaire: Ce terme désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. Cette technologie est transformée l'énergie solaire en une forme électrique ou thermique que nous pouvons utiliser directement.[3]

#### \* Description du soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène.

Son diamètre est de 1 391 000 km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de  $2.10^{27}$ tonnes. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564.10<sup>6</sup> tonnes d'hydrogène en 560.10<sup>6</sup>tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie (E = m c<sup>2</sup>), ce qui représente une énergie totale de 36.10<sup>22</sup>kW. La Terre étant à une distance de 150.10<sup>6</sup> km du Soleil, elle reçoit une énergie de 1,8.10<sup>17</sup> W. La valeur du flux de

rayonnement solaire E reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 kmd'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne  $E_0$  est appelée la constante solaire, elle vaut  $E_0 = 1353$  W.m<sup>-2</sup> . [2.6.9]

En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par :  $E = E_0 + (1 + 0.033 * \cos(0.948 * j))$  [ $w/m^2$ ] (I. 1) Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci dessous :



Figure I.1: description du soleil[5]

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

♦ Le noyau contient 40% de la masse de soleil, c'est là ou se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \times 10^4$  Km.

✤ Une pression de 109 atm. [6],[7]

La zone radiative où la chaleur produite se propage une diffusion radiative.

✤ La zone de la convection connue ou la chaleur produite se propage par correction turbulent.

✤ La photosphère est une couche de gaz constitue la surface visible de soleil, et où se forment la plus part des raies spectrales depuis l'ultra-violet jusqu'à l'infrarouge. Les gaz qui la constituent sont fortement ionisée et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement totale principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit.

## \* I-3. Structure et composition de l'atmosphère :

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont:

✤ La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.

- ♦ La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- **♦** CO<sub>2</sub>(0,03%)
- Vapeur d'eau
- Ozone  $O_3$  située entre 10 et 30 km d'altitude.
- ✤ Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...[4]

#### I-4. Mouvement de la Terre:

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé **l'écliptique**.L'excentricité de cette ellipse est faible, ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de  $\pm 1,7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 10 6 km .La terre tourne également sur elle – même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé **équateur** . L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l**'écliptique**, en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison, de l'ordre de 23°27'.[9]



Figure I.2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil[9]

➤ Au solstice d'hiver (21decembre) : les rayons solaires frappent la terre avec un angle de déclinaison de -23°27', c'est la valeur minimum de la déclinaison.

- Aux équinoxes de printemps :(21 mars) et d'automne (22septembre) : le rayon solaire est dans le plan de l'équateur et la déclinaison vaut alors 0°, cette position traduit l'égalité des jours et des nuits.
- Au solstice d'été (23 juin) : la position de la terre est opposée à celle du 21 décembre et le soleil frappe l'hémisphère Nord avec l'angle maximum de déclinaison de 23°27'. [10]

On appelle La déclinaison du soleil ( $\delta$ ) : C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie autour del'année entre (-23°27')et (+23°27') ; donc elle est

maximale au solstice d'été (21juin)et minimale au solstice d'hiver (21 décembre).elle est nulle aux équinoxes (21 mars et21 septembre), Donné par la relative suivant le au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

 $\delta = 23,45 \, \sin(0,980(284+j)) \tag{I.2}$ 

Où j est le numéro du jour de l'année.

#### I-5. Mouvement apparent du Soleil

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure I .3

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à (L -d). La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre. [10]



Figure I.3 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L

Le repérage du Soleil s'effectue par l'intermédiaire de deux angles :

- L'azimut a : c'est l'angle que fait la direction de la projection du Soleil sur le plan horizontal avec la direction Sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest.
- La hauteur h du Soleil : c'est l'angle que fait la direction du Soleil avec sa projection sur un plan horizontal. Ces deux angles sont représentés sur la figure I.4



Figure I.4 : Repérage de la position du Soleil.

Ces deux angles sont fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour de l'année)
- o L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du Soleil dans le ciel et l'heure TS donne ma position instantanée sur cette trajectoire. On définit le jour comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même.

Un jour a été divisé en 24h et on a défini **l'heure solaire TS** en fixant TS = 12h lorsque la hauteur du Soleil est maximale (le Soleil est à son « zénith »). [10]

#### I-5.1. Hauteur angulaire du soleil (h):

C'est l'angle formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil. Cette hauteur durant le jour peut varier de 0 (soleil à l'horizon) à 90 (soleil au zénith). On définit aussi l'angle zénithal noté ( $\theta z$ ) qui est l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu.  $\theta z = 90^{\circ} - h$ 

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

$$h = Arc\sin[\cos(L) . \cos(\delta) . \cos(\omega) + \sin(L) . \sin(\delta)]$$
(I.3)

h : la hauteur du soleil,  $\delta$  : La déclinaison,  $\omega$  : L'angle horaire et L: Latitude d'un lieu. [10] On définit également l'**angle horaire** par :

$$\omega = 15. (Tsv - 12) \tag{I.4}$$

à la rotation de la terre autour de son axe par  $15^{\circ}$  par heure $(15^{\circ}/h)$  :

- ✓ négative le matin.
- ✓ Positive l'après-midi.
- ✓  $\omega = 0$  quand le soleil est au zénith, perpendiculaire au méridien local (où se trouve l'observateur).[11]

#### I-5.2. Temps solaire vrais (TSV)

C'est un temps basé sur le mouvement apparent du soleil dans le ciel. On considère l'heure à laquelle le soleil traverse le méridien local, la relation qui lie le temps solaire au temps:

$$Tsv = Tu + 4. (L_{st} - L_{ong}) + ET$$
(I.5)

Où :

Tsv: temps solaire vrai

Tu: temps universel standard (mn)

Lst : méridien standard du lieu (°)

Long : longitude du lieu (°)

ET : correction de l'équation du temps, donnée par la relation suivante :

 $ET = 229,2(0,000075 + 0,001868.\cos(\beta) - 0,032077.\sin(\beta) - 0,014615\cos(2\beta) - 0,04089\sin(2\beta)$ [min] (I.6)  $\beta = \frac{360.(n-1)}{364}$ avec:  $1 \le j \le 36$ 

j; nombre de jours à partir du premier janvier.[4,6,10]

#### I-5.3. Temps universel Tu:

Le temps universel c'est le temps de Greenwich (GMT : Greenwich Mean Time). On utilise l'expression du temps légale fixe Tlf par décret par chaque pays, donnée : On a pour notre pays -1heure. C'est-à-dire : Tu = Tlf - 1 [heure] (I.7)

### I-5.4. Azimut (a) :

L'azimut solaire est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal sud (dans l'hémisphère nord) le point cardinal nord (dans l'hémisphérique sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. L'angle est mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation.[12]

$$\sin a = \frac{\cos \delta . \sin \omega}{\cos h} \tag{I.8}$$

#### I-5.5. Coefficient d'incidence

C'est un angle formé par le rayonnement solaire avec la perpendiculaire d'une surface. Ce coefficient est défini d'une part par la hauteur du soleil (*h*) son azimut et d'autre par part l'orientation( $\theta$ ) et l'inclinaison ( $\varphi$ ) du plan récepteur. Voir schéma suivant :



*Figure I.5 : Schéma représentatif de l'orientation d'un capteur solaire plan.[12]* 

(I.9)

Le coefficient d'incidence est obtenu avec la formule suivante :

$$C_i = \sin(\varphi)\cos(h)\cos(\theta - a) + \cos(\varphi)\sin(h)$$

 $\theta$  : Angle d'orientation

- $\varphi$  : Angle d'inclinaison
- h : Hauteur solaire
- *a* : Azimut solaire. [12]

#### I-5.6. Direction des rayons solaires par rapport à un plan

Considérons un plan quelconque caractérisé par deux angles  $\theta$  et h : [14]

 $\theta = 0$ , le plan est orienté vers le Sud.

- $\theta = \pi$ , le plan est orienté vers le Nord.
- $\theta = -\pi/2$ , le plan est orienté vers l'Est.
- $\theta = \pi/2$ , le plan est orienté vers l'Ouest.
- h = 0, le plan est horizontal.
- h =  $\pi/2$ , le plan est vertical.

#### I-5.7. Heures de lever et de coucher du soleil:

Le module  $\omega$  de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant sin(h) = 0 dans la formule (I.3), ce qui conduit à :  $\cos(\omega) = -tan(L) \cdot tan(\delta)$ 

A partir de la latitude et de la déclinaison, il est possible de connaitre l'heure solaire vraie du lever et du coucher de soleil :

$$T_{SVLev} = 12 - \frac{\cos(\omega)}{15} = \frac{arc[-tan(L).tan(\delta)]}{15}$$
 (I.10)

L'angle horaire au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever,

$$T_{SVcoch} = 12 + \frac{\cos(\omega)}{15} = \frac{arc[-tan(L).tan(\delta)]}{15}$$
 (I.11)

#### I-5.8. Durée d'insolation.

La durée d'insolation représente la durée maximale de la journée : [9]

$$D_{insol} = \frac{2}{15} arc[-tan(L).tan(\delta)]$$
(I.12)

$$D_{insol} = T_{SVcoch} - T_{SVLev}$$

#### I-6. Rayonnement du ciel et de l'atmosphère

Les gaz non transparents de l'atmosphère ( $CO_2$ ,  $O_3$ ,  $H_2O$ ) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes : [9]

- $\blacktriangleright$  vers 14,7  $\propto$ m pour le CO<sub>2</sub>
- Entre 5 et 7  $\propto$ m et entre 14 et 20  $\propto$ m pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6 $\propto$ m pour O<sub>3</sub>

Ainsi que la montre la figure I.6, il s'agit d'un rayonnement émis dans les grandes longueurs d'onde (>  $3\mu m$ ) contrairement au rayonnement solaire émis dans des longueurs d'ondes inférieures à  $3 \mu m$ .[9]



Figure I.6 : Spectre du rayonnement atmosphérique [9]

La densité de flux $\Phi_{ciel}$  rayonnée par le ciel et l'atmosphère vers la Terre peut être calculée

par: 
$$\Phi_{\text{ciel}} = \sigma. T_{\text{ciel}}^4 = \sigma. \varepsilon_a T_a^4$$
 (I.13)

Où  $T_{ciel}$  et  $\epsilon_a$  sont donnés par l'une des corrélations suivantes :

$$T_{ciel} = T_a - 12$$
 (I.14)

$$\varepsilon_a = 1 - 0.261 \exp[-7.77.10^{-4} (T_a - 273)^2]$$
(I.15)

$$\varepsilon_a = 0,787 + 0,764 \ln\left[\frac{T_{ra}}{273}\right]$$
 (I.16)

Où  $T_{ra}$ : Température de rosée de l'air en K

 $T_a$ : Température de l'air en

#### I-7. Le rayonnement solaire au sol :

#### I-7.1. Nature du rayonnement :

Tous les corps quelque soit leurs état : solide, liquide ou gazeux, émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière, il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde. [12]



Figure I.7: Spectre des ondes électromagnétiques. [12]

L'énergie émise par un corps de température  $T_0$ est :

- Maximale pour une certaine longueur d'onde  $\lambda_m$  variable avec  $T_0$  .

- Emise que sur un intervalle  $[\lambda_1, \lambda_2]$  de longueur d'onde caractérisant le rayonnement thermique.

#### I-7.2. Eclairement ou Emittance énergétique

L'émittance énergétique, ou encore éclairement M d'une surface est le flux énergétique rayonné par unité de surface dans toutes les directions du 1/2 espace extérieur à la source et dépend des propriétés physico-chimiques de la surface émettrice.

#### I-7.3. Absorption, Transmission, Réflexion

Quand un rayon incident d'énergie $\phi_{\lambda}$  frappe un corps à la température T, une partie  $\phi_{\lambda}\rho_{\lambda T}$  de l'énergie incidente est réfléchi par la surface S, une autre partie  $\phi_{\lambda}\alpha_{\lambda T}$  est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste $\phi_{\lambda}\tau_{\lambda T}$  est transmis et continue son chemin.[12]



Figure I.8 : Réception du rayonnement par un corps

On a évidemment :

$$\phi_{\lambda} = \phi_{\lambda} \rho_{\lambda T} + \phi_{\lambda} \alpha_{\lambda T} + \phi_{\lambda} \tau_{\lambda T} \tag{I.17}$$

$$D'o\dot{u} : \rho_{\lambda T} + \alpha_{\lambda T} + \tau_{\lambda T} = 1$$
 (I.18)

Si l'on considère l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde, on obtient les pouvoirs réfléchissants $\rho_T$ , absorbant $\alpha_T$  et filtrant  $\tau_T$  totaux.

$$\rho_{\rm T} + \alpha_{\rm T} + \tau_{\rm T} = 1 \tag{I.19}$$

#### I-7.4. Corps noir, corps gris

Le corps noir absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident.

Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température. Il est défini par :  $\alpha_T = 1$  Le corps gris est un corps dont le pouvoir absorbant  $\alpha_{\lambda T}$  est indépendant de la longueur d'onde du rayonnement qu'il reçoit. Il est défini par:  $\alpha_{\lambda T} = \alpha_T$  [12]

#### I-7.5. Rayonnement du corps noir

La loi de Planck de l'émittance monochromatique permet de tracer les courbes isothermes représentant les variations de en fonction de la longueur d'onde pour diverses températures :

$$M_{\lambda T} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \qquad [W/m^3] \qquad (I.20)$$

Avec :

 $\begin{array}{l} C_1 {=} 3,742.10^{-16} \ \ w/m^2 \\ C_2 {=} 1,4385.10^{-2} m.k \end{array}$ 

La longueur d'onde  $\lambda_m$  pour la quelle l'émission est maximale varie avec la température (T en k) de la source :

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} \qquad [\mu m] \tag{I.21}$$

$$M_{\lambda_{M^T}} = 0.41 \left(\frac{T}{10}\right)^3$$
 [W/m<sup>3</sup>] (I.22)

L'intégration de cette formule pour toutes les longueurs d'ondes donne l'émittance total du corps noir qui n'est pas fonction que de la température

$$M = \sigma T^4 \qquad [W/m^2] \tag{I.23}$$

Avec $\sigma$  = 5,675.10<sup>-8</sup>W/m<sup>2</sup>. k<sup>4</sup>: constante de **Stefan-Boltzmann** 



Figure I.9 : Courbe d'émittance d'un corps noir à 100°C et à 5780 K

Pour le soleil (T $\approx$ 5780 k), 90 % de l'énergie est émise entre 0.31 et 2.5  $\mu$ m , le maximum étant situé dans le spectre visible. Par contre, un corps noir à 375 K (100 °C) a son

émission maximale vers  $\lambda = 8$ μm dans l'IR. [12]

#### I.7.6. Rayonnement du corps non noir

L'émittance d'un corps non noir placés dans les mêmes conditions de température que le corps noir, sera donnée par la formule :

$$M = \varepsilon_T \sigma T^4 \qquad \qquad [W/m^3] \tag{I.24}$$

Avec  $\varepsilon_T$ : Facteur d'émission (émissivité)

#### I.7.7. Emissivité ou facteur d'émissivité

On définit les propriétés émissives des corps réels par rapport aux celles du corps noir dans les mêmes conditions de température et de longueur d'onde.

$$\varepsilon_{\lambda T} = \frac{M_{\lambda T}}{M_{0\lambda T}} et \varepsilon_T = \frac{M_T}{M_{0T}}$$
(I.25)

D'après la loi de Kirchhoff :

## $\alpha_{\lambda T} = \varepsilon_{\lambda T} \tag{I.26}$

### I-8. Rayonnement solaire

L'analyse du rayonnement qui nous parvient du soleil montre que tout se passe comme si ce dernier comportait comme un corps noir placé à la température comprise entre 5800 et 6000 K. Nous pouvons donc considérer le soleil comme un corps noir placé dans ces conditions, et lui applique la loi que nous venons de rappeler :

Emittance :  $M = \sigma T^4 = 5,675.10^{-8}(5885)^4 \cong 68.10^6 W/m^3$ 

le rayonnement émis est maximum au voisinage de :

$$\lambda_m = \frac{2897}{T} = \frac{2897}{5885} \cong 0.5 \mu m$$

On notera que 98% l'énergie rayonnée est pratiquement inclus dans la bonde de longueur d'onde  $0,25 < \lambda < 4\mu m$ .

On trouve dans la figure suivante la répartition spectrale de l'énergie solaire reçue au voisinage de la terre et hors atmosphère.



Figure I.10: Distribution spectrale de l'énergie solaire hors atmosphère.[9]

Mais au cours de la traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire subira un certain nombre d'altérations :

- Des réflexions sur les premières couches atmosphériques.
- Diffusion moléculaire provoquée par les molécules gazeuses.
- Absorption gazeuse.
- Diffusion par les aérosols.

On trouvera sur la figure ci-dessous la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon la longueur d'onde.[9]



Figure I.11 : Distribution spectrale de l'énergie solaire au niveau du sol[9]

#### I-9. Calcul des bilans radiatifs au sol

#### I-9.1. Notations

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le soleil est une étoile en activité qui produit de l'hélium à partir de la fusion de l'hydrogène le constituant. L'énergie provenant du soleil sous forme de rayonnement d'onde de nature électromagnétique, ainsi libérée, est projetée sous forme de rayonnement de chaleur et de lumière dans toutes les directions. A notre échelle, du point de vue de la terre, perpendiculairement à sa surface, nous recevons un rayonnement de l'ordre de 1000 W/m<sup>2</sup> par ciel clair, l'atmosphère ne transmet pas au sol la totalité du rayonnement solaire qu'elle reçoit :

- Le rayonnement direct est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modification
- Le rayonnement diffus est la part du rayonnement solaire diffusé par les particules solides

ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

- L'albédo est la fraction du rayonnement solaire renvoyé par la surface du sol.
- Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et diffus.



Les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface plan d'orientation et inclinaison quelconque ( $\theta, \varphi$ ) sont données dans le tableau suivant :[9] *Tableau I.1: Notations utilisée pour des bilans énergétique solaire* 

Irradiation solaire	Directe	S	
Energie reçu pendent une certaine durée	Diffuse	D	G = D + S
W.m <sup>-2</sup> durée <sup>-1</sup> ou KWh.m <sup>-2</sup> durée <sup>-1</sup>	Globale	G	
Eclairement solaire	Direct	<i>S</i> *	
Flux instantané	Diffus	$D^*$	$G^* = D^* + S^*$
W.m-2	Global	$G^*$	

## I-9.2. Eclairement direct :

L'éclairement solaire sur un plan récepteur d'orientation  $(\theta, \varphi)$  et donné par la relation

suivante :  $S^* = I^* C_i$  (I.27)

Ou :

 $I^*$ : Flux reçu sur une surface perpendiculaire au rayonnement solaire.

 $C_i$ : Coefficient d'orientation ou d'inclinaison du capteur solaire.[15]

$$I^* = E_{sol}exp(-E_R.m.T_L) \tag{I.28}$$

Avec :

 $\circ$  E<sub>sol</sub> : représente la constante solaire pou une journée j .

 $\circ$   $E_R$  : épaisseur optique de Rayleigh

$$E_R = \frac{1}{0,9m+9,4} \tag{I.29}$$

m:la masse d'air optique relative

$$m = \frac{P_{atm}}{101325\sin(h) + 15198,75(3,885+h)^{-1,253}}$$
(I.30)

*P<sub>atm</sub>*: Pression atmosphérique suivant l'altitude :

$$P_{atm} = 101325(1 - 2,26.10^{-5}z)^{5,26}$$
(I.31)

z: L'altitude en mètres.

• 
$$T_L$$
: le facteur de trouble de Linke:

$$T_L = 2,4 + 14,6B + 0,4(1+2B)InP_v$$
(I.32)

 $P_{v}$ :Pression partielle de vapeur d'eau

$$P_{v} = H_{R}P_{vs}$$
 [Pa] (I.33)

 $P_{vs}$ : la pression de vapeur saturante est :

$$P_{vs} = 2,165(1,098 + \frac{T_a}{100})^{8,02}$$
 [Mmhg] (I.34)

 $T_a$  : est la température ambiante de l'air en °C

Soit 
$$H_R$$
 moyen = 50%

Ou :

B est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend une valeur de :

B = 0.02 pour un lieu situé en montagne.

B = 0.05 pour un lieu rurale.

B = 0.10 pour un lieu urbain.

B = 0.20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

#### I-9.3. Eclairement diffus $D^*$ :

Le rayonnement solaire diffus arrive sur le plan récepteur après avoir été réfléchi par les nuages, les poussières, les aérosols et le sol. On suppose que le rayonnement solaire diffus n'a pas de direction prédominante (donc isotrope) de ce fait, l'orientation du plan récepteur n'a pas d'importance, seule son inclinaison $\alpha$ en. Ainsi sur un plan récepteur d'inclinaison  $\varphi$ ,  $D^*$ est égal à :

$$D^* = 125(\sin h)^{0,4} \left(\frac{1+\cos(\varphi)}{2}\right) + 211,86.\,(\sinh)^{1,22} \left(\frac{1-\cos(\varphi)}{2}\right) \tag{I.35}$$

#### **Remarque :**

On appelle albédo la fraction du rayonnement solaire renvoyé par une surface (ici le sol), ce coefficient d'albédo a été intégré dans la formule ci-dessus avec une valeur moyenne
de 0,22. Ce coefficient est fonction de la nature du sol, de sa température et de sa capacité à réfléchir le rayonnement solaire.

#### I-9.4. Eclairement global G<sup>\*</sup>

Le rayonnement global est le rayonnement maximal qu'il est possible d'avoir sur un plan récepteur donné. La somme des deux rayonnements directs et diffus donne le rayonnement global : [12]

$$G^* = S^* + D^* \tag{I.36}$$

### I-9.5. Energie solaire :

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X. Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à  $3,7 \times 10^{26}$  j/s.[1]

**I-9.5.1. Caractères particuliers** : L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes:

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m<sup>2</sup> à midi par ciel bleu sur toute la planète.

- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m<sup>2</sup>) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.

- Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 104 fois l'énergie que l'humanité consomme.

- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.

L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.

- Elle est propre.[13]

#### I-9.5.2.L'effet de l'atmosphère :

Partons de l'énergie solaire émise et reçue au sommet de l'atmosphère et regarde comment elle se transforme:



Figure I.13 : Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère . Figure tirée du livre « océans et atmosphère »)

# a-Émissions solaire :

Sur le diagramme, tout est dimensionné par rapport à la valeur 100 qui correspond au rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère, soit environ 1360  $W/m^2$ .Ce rayonnement est absorbé dans l'atmosphère et au sol, ou réfléchi vers l'espace.

L'énergie absorbée directement par l'atmosphère et correspondante au chauffage direct de l'atmosphère par l'énergie solaire se situe sur la partie gauche du diagramme. Elle correspond à environ 20 % de l'énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère. Ce chauffage direct de l'atmosphère par les rayons solaires n'est pas la première source de chaleur dans le système atmosphérique Nous verrons que le chauffage de l'atmosphère est essentiellement un chauffage indirect. 50% de l'énergie solaire est absorbée au sol essentiellement (l'atmosphère est transparente pour le rayonnement solaire). -Une certaine partie du rayonnement est perdue pour le système climatique, elle est réfléchie directement vers l'espace selon trois processus essentiels :

• Un processus de réflexion par l'air c'est la diffusion moléculaire, responsable du bleu du ciel. On estime ce phénomène à 6 % du rayonnement solaire incident. Cela constitue la seule contribution des gaz principaux (N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) à l'énergétique de la planète.

• 20 % de l'énergie solaire reçue est réfléchie par les nuages.

• La réflexion par les surfaces : 4% de l'énergie incidente est réfléchie par les surfaces. Ces surfaces sont très différenciées, on trouve d'énormes oppositions entre des zones désertiques (albédo 30 %), des forêts ou l'albédo est égal à 10 % ou des océans dont les surfaces réfléchissent jusqu'à 80 %.

#### <u>Chapitre I</u>

#### b.Émissionsterrestres

Sur la partie droite de la figure précédente, on voit la manière dont ce chauffage est équilibré par les émissions terrestres. La principale composante est l'émission de rayons infrarouges vers l'espace. Seule une toute petite partie de cette émission se fait directement vers l'espace (6 % sur lediagramme).

La plus grande partie du rayonnement infrarouge est en fait absorbée dans l'atmosphère par des gaz à effet de serre (molécules suffisamment compliquées pour être excitées et ayant au moins trois atomes, H<sub>2</sub>O, CO <sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> ou plus...). Ces molécules absorbent le rayonnement issu de la Terre et elles le réémettent en deux parties : une partie vers le sol et une partie vers l'espace, plus petite, que celle que l'on obtiendrait par une émission directe du sol. C'est ce que l'on appelle « L'EFFET DESERRE ».

Il est important de voir que ce ne sont pas les seuls termes d'échanges entre la surface terrestre et l'atmosphère.

#### c. Deux autres termes existent :

• Le flux de chaleur sensible qui est un flux de conduction thermique entre le sol et l'atmosphère. L'air se réchauffe près du sol et il monte dans l'atmosphère.

• Le flux de chaleur latente qui correspond à un processus plus compliqué de refroidissement au niveau des océans ou de la végétation continentale par évaporation de l'eau : cette chaleur est regagnée par l'atmosphère lors de la condensation de l'eau dans les nuages.

I-9.5.3. Captation : Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie:

✓ L'énergie solaire thermique : Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser : En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire. En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

✓ L'énergie solaire thermodynamique : L'énergie solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques. Trois types principaux de centrales sont utilisés:

- Les centrales à capteurs cylindre-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.
- Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre des températures de 1000°C ou plus.
- Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

✓ L'énergie solaire photovoltaïque : Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreuses.[8]

# I-10 Convertisseurs photo thermique de l'énergie solaire (Solaire thermique) :

Les convertisseurs thermique sont des capteurs solaires conçu pour convertir l'énergie des rayonnements solaire capter par une surface que l'appelle surface absorbante en énergie calorifique. On peut diviser les convertisseurs photo thermique suivant : .[12]

- Leur forme de construction
- Le niveau de température

I-10.1 Capteur solaire suivant leur forme : On trouve deux filières de capteurs solaires :

- Les capteurs plans :Le rayon solaire frappe directement sur une surface plane qui constitue l'élément de base (Absorbeur) du capteur.
- Les capteurs concentrateurs : Des surfaces planes ou de forme parabolique réfléchis les rayons solaires vers un foyer qui constitue l'absorbeur.[12]



Figure I.14 : Capteurs solaire concentrateurs. [12]

# I-10.1 .2 Capteur solaire suivant le niveau de température

# ✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 20°à 50°C :

# 1. La cloche de jardinier :

Le principe de fonctionnement se base sur le phénomène de l'effet de serre. Une surface transparente vitrée ou en plastique (pour permettre le passage des rayons incidents) piège l'énergie thermique remise sous forme des rayons infrarouges.[12]



Figure I.15: La cloche du jardinier

# <u>Chapitre I</u>

#### 2. Les capteurs à air :



Figure I.16 : Capteur plan à air

Sous un vitrage une plaque noire exposée aux rayons solaires s'échauffe d'autant plus qu'un isolant arrête les pertes arrière de chaleur. A cause de la différence de température entre l'ambiant et l'intérieur du capteur l'air circule entre le verre et la tôle noire (Absorbeur) et s échauffe..[12]. Usage : - Le séchage agricole.

#### 3. Les distillateurs solaires :

L'eau à distiller se trouve dans un bac a fond noir (Absorbeur). Au-dessus on dispose un vitrage (Couverture) incliné .l'eau se condense sur la face inferieure du vitrage. On recueille le condensat dans une rigole placée latéralement. Le rendement moyen est de 4 à 5 litres d'eau distillée par m<sup>2</sup> et par jour.[12]



#### 4. Les capteurs à eau (sans vitrage) :

Ces capteurs sont composés d'un simple absorbeur constitué d'un réseau de tubes accolés soit en plastique soit en caoutchouc de couleur noire. L'eau à chauffer circule dans les tubes. La température pouvant être atteinte (sans vent) environ 45°C. Le rendement est de l'ordre de 30%.

• Usage : Préchauffage des eaux sanitaire . Chauffage des piscines.[12]



Figure I.18 : Chauffage d'une piscine a l'aide d'un capteur sans vitrage.

Il est à remarquer qu'a ce niveau thermique le stockage de l'eau chaude est très efficace.

#### 5. Tour solaire

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes.



Figure I.19: Tour solaire.

• Usage : pour produire de l'électricité.

# ✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 50 a 100°C :

#### 1. Les capteurs plans avec couverture :

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 d'une.

Pour des niveaux de températures de 35° a 90°c, il est nécessaire d'utiliser des capteurs avec vitrage. L'absorbeur est dans ce cas, métallique (en cuivre ou en aluminium), dans un caisson isolé en face arrière, et vitré en face avant.

La fonction du vitrage est de piéger le rayonnement en créant un effet de serre. Ce type de capteur est utilisé généralement pour la production d'ECS (eau chaude sanitaire). Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré. Figure (I-20).



Figure I-20: Capteur plan vitré.[14]

Usage : 1) Les chauffe-eau solaire : Utilisé pour l'eau chaude sanitaire. Les maisons solaires

# 2. Capteur stockeur :

Une enceinte joue le rôle entouré d'une couche d'isolation thermique enveloppe a l'intérieur en trouve les panneaux solaires (l'absorbeur) d'une disposition verticale ou horizontale émergé dans fluide pour stoker la chaleur.[12]



Figure I.21: Capteur stockeur. [12]

Les rayons solaires traversent la vitre pour chauffer le milieu de stockage ainsi que l'absorbeur.

# 3. Étangs Solaires

Un Étang solaire est un capteur solaire de grande dimension avec stockage de chaleur intégré. Dans un étang normal, l'eau chauffée par le soleil devient plus légère et monte à la surface où la chaleur se dégage dans l'air ambiant. Ainsi, l'eau de l'étang reste à la température moyenne de l'air.[12]



Figure I.22 : Etang solaire.[12]

Dans un « étang solaire » la thermo-circulation de l'eau est empêchée par le sel dissous au fond du bassin. En effet, l'eau salée chauffée par le soleil est trop lourde pour monter à la surface avec l'augmentation de la température.

Un étang solaire est un bassin d'eau salée, naturel ou artificiel, composé de trois zones :

- Zone A : La partie haute est peu salée, l'eau réagit comme dans un étang normal et la température reste proche de l'air ambiant.

- Zone B : La partie basse est très salée, exposée au rayonnement solaire, elle peut devenir très chaude (60 à 100°C).

- Zone C : La partie intermédiaire, où la salinité augmente avec la profondeur et crée un gradient de densité qui empêche la thermo-circulation. Cette zone réagit comme une isolation thermique transparente, elle est traversée par le rayonnement solaire qui est absorbé et piégé par l'eau très salée en partie basse.[12]

# ✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 100 à 150°C :

#### 1. Les capteurs à tube sous vide :

Le corps noir est constitué par exemple d'une tôle recouverte par un revêtement sélectif et sur la quelle on a soudé un tube où circule le fluide à chauffer voir la figure suivante. L'ensemble est placé dans un tube en verre sous vide, évitant ainsi les pertes thermiques par convection et par conduction.



Figure I.23: Capteur solaire à tube sous vide.[12]

On distingue trois types de tubes sous vides :

- Tubes sous vides à flux direct.
- Tubes sous vides à caloduc.
- Tubes sous vides type « Sydney».
- ✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire 150 à 250°C :

#### .1. Capteurs mobiles autour d'un axe :

La surface réfléchissante est cylindro-parabolique. L'ensemble tourne avec le soleil autour d'un axe nord-sud. Les rayons sont concentrés sur un tube ou un foyer de la parabole.



Figure I.24 : Capteur cylidro - parabolique nord-sud mobile autour d'un axe.[12]

# 2. Capteurs fixe (a chaudière mobile) :

Dans ce capteur, la surface réfléchissante est composée de lames de verre colées sur support béton Est-ouest. Les rayons se concentrent sur un cercle que suit la chaudière. Ces deux types de capteurs donnent des températures de 250°C avec un rendement d'environ 50%



Figure I.25 : Capteur COSS (a chaudière mobile).[12]

# ✓ Niveau de température atteinte par le capteur solaire de 250 et jusqu'à 3000°C :

# 1. Capteurs a concentration deux axes :

Un paraboloïde axé sur le soleil concentre les rayons à son foyer où l'on peut donc placer une chaudière.[12]



*Figure I.26 : Capteur a concentration deux axes.[12]* 

#### I-10.2 Mode de fonctionnement d'un capteur solaire plan

Le capteur plan effectue la transformation de l'énergie solaire incidente arrivant sur celui -ci en énergie thermique à basse température. Cette transformation est assurée par un processus appelé l'effet de serre. Les rayons du soleil émis en majorité dans la gamme des longueurs d'onde visible (~0.5  $\mu$ m), traversent la couverture transparente du capteur et tombent sur l'absorbeur. Celui -ci étant noir, il absorbe la majeure partie de la lumière reçue et par conséquent il se chauffe. Du fait de sa température, il réémet vers l'avant dans la gamme infrarouge (~9 $\mu$ m). Le verre est parfaitement opaque à l'infrarouge.[4]



Figure I.27 : Principe de fonctionnement

# I-10.3.Les différents composants d'un capteur solaire plan:

Chaque capteur plan est constitué :

- D'une couverture transparente
- D'un absorbeur avec circuit échangeur et revêtement de surface
- L'échangeur de chaleur (tubes des conduits parallèle où serpentin)
- D'une isolation thermique sur les côtés et à l'arrière de l'absorbeur
- D'un cadre et d'un coffre.

Nous allons étudier chaque élément en particulier, en donnant les indications nécessaires pour réaliser ou choisir un bon capteur.[10]



Figure I.28: Capteur plan

#### ✤ Couverture transparente

Du fait de sa résistance aux chocs, aux contraintes mécaniques (grêle, neige) et aux chocs thermiques (brusque refroidissement en cas d'orage), le verre sécurisé est principalement utilisé comme couverture transparente.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchie du rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- Le coefficient de transmission (τ).
- l'émissivité (ε).

Le coefficient de transmission  $(\tau)$  est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage). Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau I.3[4]

Tableau I.2: Quelques	caractéristiques	optiques	de verre
-----------------------	------------------	----------	----------

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8%	9%	83%

Le vitrage n'absorbe que faiblement le rayonnement solaire d'où il transmet donc un maximum d'énergie vers l'absorbeur.

# Le nombre de vitrage :

Pour renforcer l'isolation du verre, un double voire triple vitrage peut être envisagé. Ainsi,un vitrage isolant composé de deux feuilles de verre flotté, séparées par une lame d'air, une des deux feuilles de verre étant recouverte sur sa face interne d'une mince couche de métal noble incolore et transparent déposée sous vide, empêche la chaleur de s'échapper à

#### <u>Chapitre I</u>

l'extérieur, en la réfléchissant vers l'intérieur sans toutefois arrêter la chaleur et le rayonnement du soleil.[4]



Figure I.29 : Le nombre de vitres. [4]

#### Absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il converti le rayonnement solaire capté en énergie calorifique.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Un bon coefficient d'absorption.
- Une bonne conductivité thermique.
- Une bonne résistance à la corrosion.

Le choix du matériau et le mode de construction a une grande influence sur la qualité du capteur, les absorbeurs son généralement en cuivre, en acier ou en aluminium. [4].

Tableau I.3 Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur

Matière	Conductivité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	240	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome. Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au tableau I.5

# <u>Chapitre I</u>

Revêtement	Absorption	Emission
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Inox (sélectif)	0,95	0,05

Tableau I.4 Revêtements des surfaces d'absorbeur

# Absorbeur à ailettes

Il est constitué d'un tube, généralement en cuivre, sur lequel sont fixées des ailettes en cuivre, acier ou aluminium. Le liquide caloporteur circule dans les tubes . [4]



Figure I.30 : Absorbeur à ailettes. [4]

# Absorbeur à coussin

Il est constitué de deux tôles en acier ou en acier inoxydable, soudées l'une à l'autre suivant un dessin bien précis, (figure I.31). [4].



Figure I.31: Absorbeur à coussin.[4]

# Absorbeur «Rollbond »

Il est constitué, tout comme l'absorbeur à cous sin de deux tôles, en aluminium assemblées selon le système «Rollbond», (figure I.33)[4]



Figure I.32: Absorbeur « Roll bond » [4]

# \* Isolation arrière

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan.

L'isolation doit généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 5 à 10 cm. Les matières isolantes utilisées sont soient des laines minérales, soient des matières synthétiques (de laine de verre, mousse s expansives de polyuréthanne ou polystyrène). Elle doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- La masse volumique.
- La température maximale d'utilisation en régime permanent.
- La résistance au feu. aux rongeurs et à la putréfaction.
- La sensibilité à l'humidité et son coût.

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau I.6

Isolant	Conductivité thermique à 500w/m. °C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85

# Tableau I.5 Quelques propriétés des isolants. [4]

# \* Coffre ou la cadre

Le coffre du capteur renferme les différents actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques, il réalisé soit en fine feuille de métal (acier galvanisé, aluminium, inox) avec protection par revêtement stable aux intempéries et doit permettre d'assurer sa fixation sur la couverture tout en lui permettre de sa déplacer librement.[17]

# I-10.3.Indications concernant les surfaces des capteurs

Les feuilles techniques des capteurs solaires indiquent trois types de surfaces de capteur. La surface brute (longueur x largeur) constitue le critère de base pour la demande de subventions dans un grand nombre de programmes d'aides.

La surface d'ouverture est la surface du capteur qui reçoit le rayonnement est représente le critère de dimensionnement de l'installation et la demande de subventions en France. La surface d'absorbeur désigne la surface présentant un revêtement sélectif et qui peut recevoir le rayonnement selon l'emplacement et la conception du capteur.

Elle ne se prête guère aux comparatifs de capteurs solaires.



Figure I.33: Indications des surfaces de capteur

# I-10.4 Les différents paramètres influent sur le rendement du capteur solaire plan

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres. On distingue:

# a. Les paramètres externes

- **L**es paramètres d'ensoleillement:
- ✓ Eclairement énergétique dû au rayonnement global.
- ✓ Position du soleil et durée d'insolation.
- ✓ L'heure de la journée et la saison.
- ✓ La position géographique du lieu considéré (latitude).
  - Température ambiante.
  - Vitesse du vent.

# b. Les paramètres internes

- **L**es paramètres de position :
- ✓ Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- ✓ Capteur fixe ou suiveur du soleil.
  - 4 Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

- ✓ L'absorbeur :
  - Les propriétés thermo physiques et optiques.
  - Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
  - Introduction des rugosités artificielles et de la surface sélective.
  - Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
  - Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
  - Configuration du réseau de circulation du fluide caloporteur.

- Température de l'absorbeur.
- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.
- ✓ La surface sélective :
  - Propriétés optiques.
- ✓ Couverture transparente :
  - Propriétés optiques et thermo-physiques.
  - Epaisseur.
  - Le nombre de vitrage et la forme.
- ✓ L'isolant
  - Propriétés thermo-physiques et optiques.
  - Epaisseur.
- ✓ Fluide caloporteur
  - Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
  - Température d'entrée.
  - Propriétés thermo physiques.

# c. Paramètres de fonctionnement

- Température d'entrée du fluide caloporteur dans le capteur : T<sub>fe</sub>
- ↓ Débit de fluide caloporteur : m<sub>f</sub>
- **4** Température des différentes parties du capteur
- **4** Facteur de concentration (dans le cas des concentrations).

# I-10.4 Quelques études réalisées sur les capteurs solaires plans

 $\checkmark$  **N.Bellel** et al ont étudié théoriquement un capteur solaire plan à eau simple pour comparer deux configurations du réseau du fluide caloporteur, il s'agit d'un réseau en forme d'un serpentin et un autre en série.

Les auteurs ont validé les résultats obtenus théoriquement par un travail expérimental, et ont trouvé un écart de 10% estimé satisfaisant.

Après une étude comparative entre les deux configurations, les auteurs ont déduit que le capteur muni d'un réseau en serpentin est plus performant que celui muni d'un réseau de tubes en série. [18]

✓ De même Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau (2007) ont montré que la forme serpentin est la plus efficace, puisque elle offre la plus grande surface d'échange et réduit les zones mortes, le diamètre des tubes le plus efficace est de l'ordre de 6.35 mm

✓ H.Abdi et Al ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'étudier l'effet de la forme géométrique du passage du fluide sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau-plaque absorbante.

Les auteurs ont utilisé deux configurations de la plaque absorbante (figure I.34) l'une concave et l'autre convexe. Les dimensions du passage du fluide sont choisies de façon à avoir le même diamètre hydraulique par les deux configurations. [19]



Figure I.34: Formes géométriques des plaques absorbantes

Ce travail a permis de conclure que le rendement du capteur dépend en plus des paramètres habituels (conditions extérieures, caractéristiques thermiques), des formes géométriques des plaques absorbantes. Le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement.[20]

#### ✓ Optimisation de l'angle d'inclinaison

La maximisation des performances du système solaire peut être accomplie par une conception, une construction, une installation et une orientation propre. L'orientation d'un capteur solaire est décrite par l'azimut et l'angle d'inclinaison. [20]

#### ✓ Comparaison entre un capteur simple et à double vitrage

Beaucoup de recherches réalisées dans ce sens ont conduit à :

- le capteur solaire à double vitrage qui est permet de diminuer les pertes vers l'avant.

- le rendement d'un capteur à double vitrage est supérieur à celui d'un capteur à simple vitrage.

- une augmentation du nombre de vitre a pour conséquence une diminution du coefficient de transmission et une augmentation du coefficient de réflexion, où cette augmentation a un autre effet négatif sur le rendement à travers l'augmentation de l'inertie thermique du capteur. [20]

# ✓ Etude de l'espace entre l'absorbeur et le vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire

- Le cuivre, ayant une épaisseur optimale de 2 mm est le matériau choisi comme absorbeur, ceci pour obtenir une bonne efficacité.

- Plus on diminue l'espace entre l'absorbeur et la vitre plus le rendement augmente, par contre si l'espace diminue, le dimensionnement de l'espace devient difficile, 3 cm est l'espace minimum entre la vitre et l'absorbeur. [20]

#### I-10.5 Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure I.36.). Les rayons du soleil passent d'abord par une plaque de verre transparente. Sous ce verre, un absorbeur noir (plaque de métal recouverte d'une fine couche de chrome) absorbe 80 à 90% des rayons lumineux.

L'absorbeur transforme ces rayons lumineux en chaleur, grâce au transfert thermique par rayonnement. En s'échauffant, l'absorbeur émet des infrarouges. Ces infrarouges sont bloqués entre la plaque de métal et la plaque de verre, c'est le principe de l'effet de serre. Ainsi, l'air entre les deux plaques s'échauffe et améliore le rendement.

Par conduction, l'énergie thermique ou chaleur de l'absorbeur est transmise à un circuit d'eau (c'est le liquide caloporteur). Celle-ci s'échauffe et est ensuite acheminée vers un ballon d'eau chaude à l'aide d'une pompe, ou bien par la simple gravité. Les chauffe-eau solaires utilisent des liquides caloporteurs mélangeant eau et antigel dans diverses proportions, selon le type de chauffe-eau solaire pour lequel ils sont adaptés.

L'eau est très peu visqueuse (contrairement à l'antigel), elle permet donc de limiter l'effort du calculateur. Quant à l'antigel, sa température de congélation est très basse (à la différence de l'eau), il permet donc d'éviter l'éclatement ou la tension dans les tuyaux.

Dans l'accumulateur, le liquide caloporteur chaud parcourt un circuit et transfère sa chaleur à l'eau domestique. Ce fluide est chargé de transporter la chaleur entre plusieurs sources de température. Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire.



Figure I.35: Différents échanges thermiques dans un capteur plan

# **Chapitre II: Etude analytique**

#### II-1 Spécification d'un capteur solaire plan

Nous ferons dans ce chapitre l'hypothèse que la couverture transparente utilisée dans le capteur solaire est opaque au rayonnement infrarouge IR ( $\lambda > 3\mu m$ ) et n'absorbe pas le rayonnement solaire. [9]

### **II-1.1 Principe :**

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de convertir ou transformer l'énergie du rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie thermique (calorifique) utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure suivante :[9]



Figure II.1 : Schéma de principe d'un capteur solaire plan[12]

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 ( $T_{fs} - T_{fe}$ ) à la traversée du capteur.

# II-1.2 Hypothèses

Dans l'étude on se base sur les hypothèses suintantes :

- Régime de d'écoulement de fluide est établit.
- Le régime des échanges thermiques au système est considéré permanant.
- Le glycol est choisi comme un fluide caloporteur.
- La surface absorbante est noire mat pour augmenter l'absorption.
- Les pertes latérales sont considérés négligeables par rapport à les pertes arrière.
- La plaque absorbante et le tube sont considérés comme ailette.
- La couverture est opaque au rayonnement thermique.

#### II-1.3 Bilan thermique global

Pour obtenir le bilan thermique on a choisi un volume de contrôle VC qui entour tous le capteur et on définie les entrées/sorties au travers les frontières limités par ce volume VC voir schéma suivant. [12]



Figure II.2: Schéma représentatif du bilan thermique d'un capteur solaire.

Le bilan thermique s'écrivant simplement pondant un intervalle de temps dt sous la forme suivante :

$$Q_u + Q_p - Q_s + Q_{st} = 0 \tag{II.1}$$

Ou on écrivant que l'énergie reçu se répartie en :

$$Q_s = Q_u + Q_p + Q_{st} \tag{II.2}$$

Avec:  $Q_s$  Flux solaire absorbé.

 $Q_u$  Flux utile transmis au fluide caloporteur.

 $Q_p$  Flux perdu Vers le milieu extérieur.

 $Q_{st}$ Flux stocké dans le capteur.

Il représente l'énergie reçu par mètre carré de l'absorbeur:

-  $\alpha_{ps}G^*$ Produit du facteur d'absorption de la paroi absorbante pour le spectre solaire par la puissance incident  $G^*$ 

Dans le cas d'un capteur solaire avec couverture transparente de coefficient de transmission au rayonnement solaire  $\tau_{cs}$  le flux absorbé s'écrit :

$$Q_s = \tau_{cs} \alpha_{ns} G^* \qquad [w/m^2] \tag{II.3}$$

Pour un capteur sans couverture transparente  $\tau_{cs} = 1$  le flux solaire  $Q_s$  s'écrit :

$$Q_s = \alpha_{ps} G^* \tag{II.4}$$

On trouve aussi une autre relation plus simple de la puissance absorbée  $Q_s$  ou la puissance incidente dépond de l'angle d'incidence du rayon solaire et l'angle d'inclinaison de la surface absorbante (capteur solaire), elle englobe aussi la puissance des rayonnements solaires directs et celle émit par l'environnement on l'appelle éclairement solaire global  $G^*$  son expression est [21]

$$Q_s = \tau_{cs} \alpha_{ps} G^* \qquad [w/m^2] \tag{II.5}$$

Où :

 $\tau_{cs}$ : Coefficient de transmission de la couverture transparente par rapport au rayonnement.

 $\alpha_{ps}$ : Coefficient d'absorption de la paroi absorbante par rapport au rayonnement solaire.

 $G^*$ : Puissance incident (W.m<sup>-2</sup>).

#### a. Flux utile $Q_u$ :

C'est l'énergie absorbé par convection et conduction sous forme de chaleur par le fluide caloporteur.

$$Q_u = \frac{\mathrm{in}C_p}{A} \left( T_{fs} - T_{fe} \right) \qquad [w/m^2] \tag{II.6}$$

Où :

m : Débit massique du fluide caloporteur kg/s.

 $C_p$ : Chaleur spécifique à pression constante  $C_p = 4186 \ j/kg^{\circ}C$ .

*A* : La surface de la plaque absorbante.

- $T_{fs}$ : Température du fluide à la sortie du capteur.
- $T_{fe}$ : Température du fluide à l'entrée du capteur.

# b. Flux perdu $Q_p$ :

Les déperditions thermiques du capteur vers l'ambiant par :

• Conduction/convection entre le capteur et l'air du milieu extérieur exprimé par

$$P_c = h_c \left( T_{pm} - T_a \right) \tag{II.7}$$

Où :

 $h_c$ : Coefficient de perte par conduction/convection du capteur w/m<sup>2</sup>°C.

 $T_{pm}$ : Température moyenne de la paroi absorbante.

- $T_a$ : Température de l'air extérieur.
- Rayonnement du capteur (absorbeur, couverture) vers l'ambiant on peut l'exprimé par  $\varepsilon_p \sigma T^4$ 
  - $\varepsilon_p$ : Représente l'émissivité globale hémisphérique de l'absorbeur.
  - T : Température d'équilibre thermique de l'absorbeur  $T = T_{pm}$

Alors le flux perdu s'écrit :

$$Q_p = \varepsilon_p \sigma T_{pm}^4 + P_c \qquad [w/m^2] \tag{II.8}$$

$$Q_p = \varepsilon_p \sigma T^4 + h_c (T_{pm} - T_a) \qquad [w/m^2] \qquad (II.9)$$

D'une façon générale on peut exprimer les trois modes de transfert de chaleur conduction, convection et rayonnement par un coefficient global U ce qui nous permis une représentation plus simple de la relation du flux perdu :

$$Q_p = U(T_{pm} - T_a) \qquad [w/m^2] \qquad (II.10)$$

Où:

*U*: Coefficient global de perte du capteur w/m<sup>2</sup>°C.

 $T_{pm}$ : Température moyenne de la paroi absorbante.

 $T_a$  : Température de l'ai extérieur.

Dans notre cas capteur plan, la température moyenne  $T_{pm}$  peut en première approximation être calculée par:[21]

$$T_{pm} = \frac{3T_{fs} + T_{fe}}{4} + \Delta T \qquad [°C] \qquad (II.11)$$

Pour tenir compte de la non-linéarité de l'évolution de la température du fluide dans le capteur et de l'écart de température  $\Delta T$  existant entre le fluide et la paroi absorbante.

#### c. Flux stocké

Le flux stocké ou l'accroissement d'énergie dans le capteur s'écrit

$$Q_{st} = M_e C_{eau} \frac{\partial T}{\partial t} \qquad [w/m^2] \qquad (II.12)$$

Où:

 $M_e$ : Masse en eau du capteur définie par  $\sum m_i c_i = M_e C_{eau}$ 

*i* : Représentant les différents éléments constitutifs du capteur.

*T* : Température moyenne du capteur.

t: Temps.

Puisque le régime de fonctionnement du capteur a étudié est permanant voir hypothèses cidessus, donc le flux stocké s'annule est n'apparais pas dans l'expression du bilan thermique

$$Q_s = Q_u + Q_p \qquad [w/m^2] \tag{II.13}$$

#### d. Rendement d'un capteur solaire

Les rendements d'un capteur solaire sont d'finie par rapport au flux solaire incident de la manière suivante :

Le rendement global : 
$$\eta = \frac{Q_u}{G^*}$$
 (II.14)

Le rendement interne (thermique) : 
$$\eta_{en} = \frac{Q_u}{Q_s}$$
(II.15)  
Le rendement optique (radiatif): $\eta_R = \frac{Q_s}{G^*}$  (II.16)

#### II-1.3.1 Expression du coefficient global des pertes

Les échanges thermiques convectifs entre la paroi absorbante et le milieu extérieur dans un capteur solaire plan peuvent êtres schématisées comme indiqué sur la figure



Figure II.3: Schématisation du flux convectifs dans un capteur solaire plan. [9]

Il est plus correct de calculer ou analyser les déperditions thermiques lorsqu'on les sépare en deux parties (Avant et Arrière) : [9]

-Pertes thermiques par l'avant ou le haut $Q_{pAV}$ .

- Pertes thermiques par l'arrière ou le bas  $Q_{pAR}$ 

$$Q_p = Q_{pAR} + Q_{pAV} \tag{II.17}$$

# 1. Pertes thermiques vers l'avant $Q_{pAV}$

Les pertes thermiques vers l'avant peuvent s'écrit :

$$Q_{pAV} = Q_{pc}^{VC} + Q_{pc}^{R} = Q_{ca}^{V} + Q_{ca}^{R} - Q_{sc}$$
(II.18)

Où :

 $Q_{pc}^{VC}$ : Flux échangé par convection-conduction entre la paroi absorbante et la couverture.

 $Q_{pc}^{R}$ : Flux échangé par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture.

 $Q_{ca}^V$ : Flux échangé par convection entre la couverture et l'air du milieu extérieur.

 $Q_{ca}^{R}$ : Flux échangé par rayonnement entre la couverture et milieu extérieur.

 $Q_{sc}$ : Flux solaire absorbé par la couverture et le milieu extérieur.

Chacun de ces flux peut s'exprimer de la manière suivante:[9]

# a) Les pertes thermiques $Q_{pc}^{VC}$

$$Q_{pc}^{VC} = h_{pc}^{VC} (T_{pm} - T_{mc}) \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
(II.19)  
Où :

 $h_{pc}^{VC}$ : Représente le coefficient de transfert de chaleur entre deux surfaces parallèles délimitant un espace clos contenant de l'air

 $T_{mc}$ : Température moyenne de la couverture transparente. [9]

# b) Les pertes thermiques $Q_{pc}^{R}$

Cette quantité peut être calculée en considérant la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles infinies (la distance les séparant est faible devant leur largeur et leur longueur) grises et opaques (voir hypothèses ci-dessus), ces hypothèses permettent d'écrire:

$$Q_{pc}^{R} = \sigma \frac{T_{pm}^{4} - T_{mc}^{4}}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} (\text{II}.20)$$

Que l'on peut aussi écrire : $Q_{pc}^{R} = h_{pc}^{R} (T_{pm} - T_{mc})$  [ $w/m^{2} \circ C$ ] (II.21) Avec :

 $h_{pc}^{R}$ : Représente le coefficient d'échange par rayonnement entre la paroi absorbante et la couverture:

$$h_{pc}^{R} = \sigma \frac{\left(T_{pm}^{2} + T_{mc}^{2}\right)\left(T_{pm} + T_{mc}\right)}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1} \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
(II.22)

Où :

 $\alpha_{pi}$ : Coefficient d'absorption de la plaque par rapport au rayonnement IR.

 $\alpha_{ci}$ : Coefficient d'absorption de la couverture par rapport au rayonnement IR.

 $\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzman évaluée à 5,6.10^{-8} \ W/m^2 .  $K^4$  . [9]

# c) Les pertes thermiques $Q_{ca}^V$

Cette quantité dépond principalement de la vitesse du vent peut se calculer par :

$$Q_{ca}^{V} = h_{ca}^{V} (T_{mc} - T_{a})$$
 [w/m<sup>2</sup>°C] (II.23)

Le coefficient de convection  $h_{ca}^V$  étant calculable par la corrélation suivante où  $u_{vent}$  est la vitesse moyenne du vent :[9]

$$h_{ca}^{V} = h_{vent} = 5.7 + 3.8 \, u_{vent} \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
 (II.24)

# d) Les pertes thermiques $Q_{ca}^{R}$

Ces pertes peut se calculer par :[9]

$$Q_{ca}^{R} = \sigma \alpha_{ci} (T_{mc}^{4} - \varepsilon_a T_a^{4}) = \sigma \alpha_{ci} (T_{mc}^{4} - T_{ciel}^{4}) \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
(II.25)

 $\varepsilon_a$ : Emissivité de l'atmosphère calculable par la relation:

$$\varepsilon_a = 1 - 0.261 \exp[-7.77.10^{-4}(T_a - 273)^2]$$
(II.26)

 $T_{ciel}$ : Température équivalente du ciel:  $T_{ciel} = T_a - 12$ 

 $T_{mc}$ : Température moyenne de la couverture.

Que l'on mettre sous la forme :

$$Q_{ca}^{R} = h_{ca}^{R} (T_{mc} - T_{a}) \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
Avec :
$$(II.27)$$

 $h_{ca}^{R}$ : Représente le coefficient d'échange par rayonnement entre la couverture et milieu extérieur:

$$h_{ca}^{R} = \frac{\sigma \alpha_{ci} (T_{mc}^{4} - \varepsilon_{a} T_{a}^{4})}{T_{mc} - T_{a}} \qquad [w/m^{2} \circ C] \qquad (II.28)$$

# e) Les pertes thermiques **Q**<sub>sc</sub>:[9]

$$Q_{sc} = \alpha_{cs} G^* \tag{II.29}$$

Le flux perdu vers le haut par la plaque absorbante peut alors s'écrire :

$$Q_{pAV} = \left(h_{pc}^{VC} + h_{pc}^{R}\right)\left(T_{pm} - T_{mc}\right) = \left(h_{ca}^{V} + h_{ca}^{R}\right)\left(T_{mc} - T_{a}\right) - \alpha_{cs}G^{*}$$
(II.30)

Dans le cas où  $\alpha_{cs} \approx 0$  (cas du verre), on obtient l'expression simplifiée suivante :

$$Q_{pAV} = \left(h_{pc}^{VC} + h_{pc}^{R}\right) \left(T_{pm} - T_{mc}\right) = (h_{vent} + h_{ca}^{R})(T_{mc} - T_{a}) \qquad [w/m^{2}] \quad (\text{II.31})$$

Après cette démarche le flux thermique perdu vers le haut par la plaque absorbante peut alors s'écrire :

$$Q_{pAV} = \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{1}{h_{pc}^{VC} + h_{pc}^R} + \frac{1}{h_{vent} + h_{ca}^R}} \qquad [w/m^2]$$
(II. 32)

$$Q_{pAV} = h_{pAV} (T_{pm} - T_a)$$
 [w/m<sup>2</sup>] (II.33)

$$h_{pAV} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{1}{h_{pc}^{VC} + h_{pc}^{R}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{ca}^{R}}}} \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
(II. 34)

# 2. Pertes thermiques vers l'arrière $Q_{pAR}$

Les pertes thermiques vers l'arrière peuvent s'écrire :[9]

$$Q_{pAR} = \frac{T_{pm} - T_a}{\frac{e_i}{\lambda_i A} + \frac{1}{h_{vent}}}$$
 [w/m<sup>2</sup>] (II.35)

Où : A: Surface de l'absorbeur (capteur).

 $e_i$ : Epaisseur de l'isolant.

 $\lambda_i$ : Conductivité thermique de l'isolant [ $w/m^{2\circ}C$ ]

Que l'on peut aussi écrire :

$$Q_{pAR} = h_{pAR} \left( T_{pm} - T_a \right) \qquad [w/m^2] \qquad (II.36)$$

Avec  $h_{pAR}$  coefficient d'échange de chaleur vers l'arrière:

$$h_{pAR} = \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i A} + \frac{1}{h_{vent}}} \qquad [w/m^2 \circ C] \qquad (II.37)$$

# 3. Pertes thermiques totales $Q_p$ :

On obtient finalement les pertes totales du capteur vers le milieu extérieur :[9]

$$Q_p = U(T_{pm} - T_a)$$
,  $Q_p = Q_{pAV} + Q_{pAR}$  (II.38)

$$Q_{p} = \frac{T_{pm} - T_{a}}{\frac{1}{h_{pc}^{VC} + h_{pc}^{R}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{ca}^{R}}} + \frac{T_{pm} - T_{a}}{\frac{e_{i}}{\lambda_{i}A} + \frac{1}{h_{vent}}}$$
(II. 39)

Et l'expression du coefficient global de perte U s'écrire :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{pc}^{VC} + h_{pc}^{R}} + \frac{1}{h_{vent} + h_{ca}^{R}}} + \frac{1}{\frac{e_{i}}{\lambda_{i}A} + \frac{1}{h_{vent}}} \qquad [w/m^{2} \circ C]$$
(II. 40)

#### II-1.3.2 Calcul du rendement

Nous allons développer le calcul du rendement d'un capteur solaire plan d'ont l'absorbeur est formé par deux collecteurs parallèles, un pour l'entrée du fluide caloporteur (coté froide) et l'autre pour la sortie (coté chaude). [12]



*Figure II.4 : Coupe longitudinale d'un absorbeur. [12]* 

Des tubes parallèles de mêmes dimensions assemblées verticalement aux collecteurs d'entrée et sortie. Entre ces tubes on trouve les ailettes, ce son des plaques choisi de même matière et même épaisseur que les tubes assemblés sur les deux cotés de chaque ailette.

**II-1.3.2.1 Profil transversal de température :** Nous allons dans un premier temps déterminé le profil de température de la paroi absorbante dans la direction 0y perpendiculaire à la direction 0x de l'écoulement du fluide voir figure II.5



Figure II.5: Schéma en coupe de l'absorbeur.

Nous allons détailler de plus à l'aide d'un schéma le bilan thermique du morceau de plaque de longueur unité compris entrey et y + dy figure ci-dessus

Alors le bilan s'écrit : [9]

$$Q_s + (q_{cond})_y = (q_{cond})_{y+dy} + (q_{conv})_{AV} + (q_{conv})_{AR}$$
(II.41)

- $Q_p = (q_{conv})_{AV} + (q_{conv})_{AR} = U(T_{pm} T_a) dy$  Représente les pertes totales vers le milieu extérieur
- $(q_{cond})_y = -\lambda_p e_p \left(\frac{\partial T_{pm}}{\partial y}\right)_y$  la quantité de chaleur qui traverse le morceau au point par conduction du milieu de l'ailette (x = 0) vers le tube.



Figure II.6 : Schéma du bilan thermique d'un morceau d'ailette.

•  $(q_{cond})_{y+dy} = -\lambda_p e_p \left(\frac{\partial T_{pm}}{\partial y}\right)_{y+dy}$  La quantité de chaleur qui sort du morceau au point

y + dy par conduction et se dirige vers le tube.

Donc :

$$Q_s - \lambda_p e_p \left(\frac{\partial T_{pm}}{\partial y}\right)_y = -\lambda_p e_p \left(\frac{\partial T_{pm}}{\partial y}\right)_{y+dy} + U(T_{pm} - T_a) dy$$
(II.42)

Avec :

 $Q_s$ :Flux solaire absorbé par la plaque (morceau).

 $\lambda_p e_p$  : Epaisseur et conductivité thermique de la paroi absorbante.

U : Coefficient global de perte de la paroi absorbante.

Après développement de **TAYLOR** au voisinage de zéro  $(q_{cond})_{y+dy}$  et on néglige les termes d'ordres supérieur à deux on obtient:[9]

$$Q_{s} = -\lambda_{p} e_{p} \frac{\partial^{2} T_{pm}}{\partial y^{2}} + U(T_{pm} - T_{a})$$

$$\frac{\partial^{2} T_{pm}}{\partial y^{2}} = \frac{U}{\lambda_{p} e_{p}} \left(T_{pm} - T_{a} - \frac{Q_{s}}{U}\right)$$
(II. 43)

On peut poser :

$$\begin{cases} \bar{T}_p = T_{pm} - T_a - \frac{Q_s}{U} \\ \omega^2 = \frac{U}{\lambda_p e_p} \end{cases}$$
(II.44)

= 0

On obtient :

$$\frac{\partial^2 \bar{T}_P}{\partial y^2} - \omega^2 \bar{T}_P = 0 \tag{II.45}$$

Cette équation différentielle a la solution suivante :

$$\overline{T}_{P}(y) = C_{1} \sinh(\omega y) + C_{2} \cosh(\omega y)$$
(II.46)

On utilise les conditions aux limites pour calculer  $C_1$  et  $C_2$ :

- En 
$$y = 0$$
;  $\left(\frac{\partial T_p}{\partial y}\right)_{y=0} = 0$  Par raison de symétrie, on en déduit :  $C_1$   
- En  $y = \frac{l-D_e}{2}$ ;  $\overline{T}_p = T_t$  On déduit :  $C_2 = \frac{T_t - T_a - \frac{Q_s}{U}}{\cosh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right]}$ 

D'où :

$$\frac{T_{pm}(y) - T_a - \frac{Q_s}{U}}{T_t - T_a - \frac{Q_s}{U}} = \frac{\cosh(\omega y)}{\cosh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right]}$$
(II. 47)

Le flux transféré par unité de longueur selon *ox* à la base de la plaque en  $y = \frac{l-D_e}{2}$ vers un tube  $Q_{pltb}$  s'écrit :

$$Q_{pltb} = -\lambda_p e_p \left(\frac{\partial T_{pm}}{\partial y}\right)_{y=\frac{l-D_e}{2}}$$

$$Q_{pltb} = -\frac{T_t - T_a - \frac{Q_s}{U}}{\cosh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right]} \omega \lambda_p e_p \sinh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right] = \frac{1}{\omega} \left(T_t - T_a - \frac{Q_s}{U}\right) \tanh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right] \quad (\text{II.48})$$

La plaque comprise entre y = 0 *et*  $y = \frac{l-D_e}{2}$  joue un rôle d'ailette de chauffage par rapport au tube.

#### II-1.3.2.2 Rendement de l'ailette F:

Si toute cette ailette à la température uniforme $T_t$ , le flux transféré de l'ailette au tube attient son maximum et il s'écrirait : [9]

$$\left(Q_{pltb}\right)_{max} = \left[Q_s - U(T_t - T_a)\right] \left(\frac{l - D_e}{2}\right) \tag{II.49}$$

Le rendement de l'ailette est définie par :

$$F = \frac{Q_{pltb}}{\left(Q_{pltb}\right)_{max}} = \frac{tanh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right]}{\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)} \tag{II.50}$$

#### II-1.3.2.3 Facteur d'efficacité de la plaque absorbante :

Le tube gagne également un flux solaire  $Q_{sltb}$  capté directement sur sa largeur apparente $D_e$  supposée à la température uniforme  $T_t$ :[9]

$$Q_{sltb} = D_e [Q_s - U(T_t - T_a)]$$
(II.51)

Le flux utile total gagné par un tube par unité de longueur selon l'axe *ox* de l'écoulement du fluide s'écrit finalement en considérant que chaque tube reçoit le flux de deux ailettes de longueur  $\frac{l-D_e}{2}$ .

$$Q_{u1tb} = [Q_s - U(T_t - T_a)][D_e + F(l - D_e)]$$
(II.52)

Ce flux utile gagné par le tube est transmis au fluide à travers la résistance de conduction  $\left(\frac{e_t}{\lambda_t \pi D_i}\right)$  du tube d'épaisseur  $e_t$  et la résistance de convection entre la paroi interne du tube et le fluide $\left(\frac{1}{h_t \pi D_i}\right)$ , soit :

$$Q_{u1tb} = \frac{T_t - T_f}{\frac{e_t}{\lambda_t \pi D_i} + \frac{1}{h_t \pi D_i}}$$
(II. 53)

On peut éliminer la température  $T_t$  en égalant les deux expressions de  $Q_{u1tb}$  et l'on obtient finalement l'expression du flux utile gagné par chaque tube par unité de longueur dans la direction *ox* de l'écoulement du fluide caloporteur :[9]

$$Q_{u1tb} = \frac{[Q_s - U(T_t - T_a)][D_e + F(l - D_e)]}{1 + U\left[\frac{e_t}{\lambda_t \pi D_i} + \frac{1}{h_t \pi D_i}\right][D_e + F(l - D_e)]}$$
[w/m] (II.54)

Que l'on écrit sous la forme simplifiée :

$$Q_{u1tb} = lF' [Q_s - U(T_f - T_a)]$$
(II.55)

Avec :

$$F' = \frac{\frac{1}{U}}{l\left[\frac{1}{[(l-D_e)F+D_e]U} + \frac{e_t}{\lambda_t \pi D_i} + \frac{1}{h_t \pi D_i}\right]}$$
(II. 56)

F'Apparaît comme le rapport de la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'extérieur $\left(\frac{1}{u}\right)$  sur la résistance thermique au transfert entre le fluide et l'extérieur

$$l\left[\frac{1}{\left[(l-D_e)F+D_e\right]U}+\frac{e_t}{\lambda_t\pi D_i}+\frac{1}{h_t\pi D_i}\right]$$

. F'Est donc un nombre inferieur ou égal à l'unité appelé facteur d'efficacité de la plaque absorbante.

#### II-1.3.2.4 Profil de température dans le sens de l'écoulement du fluide

Considérons un tube de longueur *L* parmi les *n* tubes du capteur, le fluide entré dans le tube à la température  $T_{fe}$  et en ressort à la température  $T_{fs}$ .

D'après ce qui précède, chaque tube gagne un flux utile  $Q_{u1tb}$  par unité de longueur dans le sens *ox* de l'écoulement du fluide.

Effectuons un bilan thermique sur la portion de fluide contenue dans un tube entre les distances  $x \ et \ x + dx$  à partir de l'entrée du tube:[9]

$$\frac{\dot{m}}{n}C_p\frac{\partial T_f}{\partial x} = Q_{u1tb}\,dx\tag{II.57}$$

$$O\dot{u}:$$

 $\dot{m}_f$ : Débit total du fluide dans l'absorbeur constitué de tubes en parallèle [kg/s].

 $C_p$ : Capacité calorifique du fluide.

On en déduit :

$$\frac{\dot{m}_f}{n}C_p\frac{\partial T_f}{\partial x} = lF'[Q_s - U(T_f - T_a)]dx$$
(II.58)

Par intégration par rapport à 0 entre x, on obtient le profil de température longitudinale du fluide:

$$\frac{T_f(x) - T_a - \frac{Q_s}{U}}{T_{fe} - T_a - \frac{Q_s}{U}} = exp\left(-\frac{nlF'U}{\dot{m}_f C_p}\right)$$
(II. 59)

Et par intégration entre x = 0 et x = L, on obtient l'expression suivante de la température de sortie $T_{fs}$  du fluide dans laquelle  $A = l. L_{tub}$  est la surface de l'absorbeur ( $L_{tub}$  = longueur tube = longueur capteur):

Etude Analytique

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{Q_s}{U}}{T_{fe} - T_a - \frac{Q_s}{U}} = exp\left(-\frac{nAF'U}{\dot{m}_f C_p}\right)$$
(II. 60)

On peut également calculer la température moyenne du fluide dans l'absorbeur par :

$$T_{fmoy} = \frac{1}{L_{tub}} \int_0^{L_{tub}} T_f(x) dx \tag{II.61}$$

Qui conduit à l'expression suivante :

$$T_{fmoy} = T_a + \frac{Q_s}{U} + \left(T_{fe} - T_a - \frac{Q_s}{U}\right) \frac{\dot{m}_f C_p}{nAF' U} \left[1 - exp\left(-\frac{nAF' U}{\dot{m}_f C_p}\right)\right]$$
(II. 62)

#### II-1.3.2.5 Calcul du rendement global

Le flux utile gagné sur la surface totale  $A = l.L_{tub}$  de l'absorbeur peut se calculer par :[9]

$$Q_u = n \int_0^{L_{tub}} dQ_{u1tb} dx \tag{II.63}$$

Avec :

$$Q_{u1tb} = lF' [Q_s - U(T_f - T_a)] \quad et \quad \frac{T_f(x) - T_a - \frac{Q_s}{U}}{T_{fe} - T_a - \frac{Q_s}{U}} = exp\left(-\frac{nlF'U}{\dot{m}_f C_p}\right)$$
(II.64)

Le calcul de cette intégrale conduit à :

$$Q_u = AF_R \left[ Q_s - U \left( T_{fe} - T_a \right) \right] \qquad [w]$$
(II.65)

$$Q_u = F_R \left[ Q_s - U \left( T_{fe} - T_a \right) \right] \qquad [w/m^2] \tag{II.66}$$

Où  $F_R$  est le facteur de conductance l'absorbeur défini par : [22]

$$F_R = \frac{\dot{m}_f C_p}{AU} \left[ 1 - exp\left(\frac{nAF'U}{\dot{m}_f C_p}\right) \right]$$
(II. 67)

Le rendement global du capteur tel que défini par la relation  $\eta = \frac{Q_u}{G^*A}$ s'écrit finalement :

$$\eta = F_R \left[ \eta_R - \frac{U(T_{fe} - T_a)}{G^*} \right]$$
(II. 68)

Où  $\eta_R$  : est le rendement optique défini par la relation:  $\eta_R = \frac{Q_s}{G^*}$ 

**Remarque :** On trouve une autre expression du rendement en fonction  $T_{pm}$  et au lieu de $T_{fe}$  et  $F_R$  :

$$\eta = F' \left[ \eta_R - \frac{U(T_{pm} - T_a)}{G^*} \right]$$
(II. 69)

#### II-1.3.3 Température moyenne de l'absorbeur:

Par définition du coefficient global de pertes, on a :

$$Q_u = Q_s - U(T_{pm} - T_a)$$
 [w/m<sup>2</sup>] (II.70)

On en déduit :

$$T_{pm} = T_a + \frac{Q_u - Q_s}{U} \qquad [^\circ C] \tag{II.71}$$

Où: 
$$Q_u = F_R \left[ Q_s - U (T_{fe} - T_a) \right]$$
 [w/m<sup>2</sup>] (II.72)

#### II-1.4. Mode de circulation du fluide caloporteur

La circulation du fluide caloporteur peut assurer par deux manières :

- **Circulation naturelle (Thermosiphon) :** La température de l'absorbeur qu'est la plus élevée dans l'installation du capteur provoque la circulation du fluide par différence de densité.
- **Circulation forcée (avec pompe) :** Une pompe installée dans le circuit du capteur assure la circulation du fluide. [12]



*Figure II.7 : Installation d'un capteur solaire avec pompe* 

La pompe est entrainée par un moteur électrique placé avant le capteur assure la circulation du fluide caloporteur dans un circuit « hydraulique » fermé qui ce compose généralement d'une pompe, capteur, échangeur de chaleur dans un réservoir et la tuyauterie pour fermer le circuit.

Supposons que le débit total  $\dot{m}_f$  à l'entrée du capteur (collecteur) connu, donc on peut calculer:

a) Le débit dans un tube : [12]

$$\dot{m}_{ftube} = \frac{\dot{m}_f}{n} = \frac{\pi D_i^2}{4} \rho u_{ftube} \tag{II.73}$$

 $\rho$ : Densité du fluide caloporteur (kg/m<sup>3</sup>)

**b**) La vitesse dans un tube:

$$u_{ftube} = \frac{4\dot{m}_f}{\pi n\rho D_i^2} \tag{II.74}$$

#### II-1.5 Autres grandeurs caractéristiques

#### II-1.5.1 Rayonnement de seuil

Nous avons établi précédemment les expressions :

$$Q_u = \frac{\dot{m}C_p}{A} (T_{fs} - T_{fe}) = F_R \left[ Q_s - U (T_{fe} - T_a) \right]$$
 [w/m<sup>2</sup>] (II.75)

Pour une valeur de  $T_{fe}$  donnée (par exemple la température en début de la journée de l'eau issue d'un ballon de stockage redescendue à 45°C pendant la limite), il apparaît que l'éclairement solaire  $G^*$ atteignant un capteur doit supérieur à une certaine valeur appelée **rayonnement de seuil** que nous noterons  $G_s^*$  pour que le flux utile soit positif. [9] Cette valeur  $G_s^*$  est donnée par:

$$G_s^* = \frac{U(T_{fe} - T_a)}{\tau_{cs}\alpha_{ps}} \left[ w/m^2 \right]$$
(II.76)

Cette valeur est importante en pratique car des valeurs de l'éclairement solaire inferieur a  $G_s^*$ , le flux utile est nul.il ne faut donc pas prendre en compte les valeurs $G^* < G_s^*$ . On cherchera à obtenir un rayonnement de seuil le plus faible possible.

#### II-1.5.2 Température limite

Si, pour un éclairement solaire  $G^*$ donné le débit du fluide caloporteur s'annule, la température moyenne  $T_{pm}$  de la paroi absorbante va augmenter jusqu'à atteindre une valeur d'équilibre appelée température limite  $T_{pl}$  solution de l'équation du bilan thermique global de l'absorbeur :

$$Q_u = 0$$
 ;  $T_{fe} = T_{pl}$   
 $Q_s - U(T_{pl} - T_a) = 0$ 

D'où :

$$T_{pl} = T_a + \frac{Q_s}{U} [^\circ C] \tag{II.77}$$

Il faut considérer le comportement des matériaux utilisés à la température limite de fonctionnement correspondant à l'éclairement solaire maximum  $G^* \cong 1000 W/m^2$  pour éviter tout risque de dégradation du capteur.

Supposons qu'on a un capteur solaire d'ont le coefficient global de perte thermique  $U = 6.2 W/m^{2} C$ (isolation jugé bonne), et la température ambiante peut atteindre  $T_a = 50^{\circ}C$  (zone chaude). Alors la température limite sera : $T_{pl} = 211.3^{\circ}C$ 

Donc il faut éviter de choisir les matériaux de construction qui changent leur comportement géométrique, métallurgique et optique au voisinage de cette température 211.3°C par exemple il est mieux utiliser une couverture transparente en verre que on plastique...etc.

#### **II-1.5.3 Inertie thermique :**

Avant d'atteindre un régime soum permanent (bien que l'éclairement solaire varie de façon continue, on pourra le considérer constant sur une période d'une heure par exemple), le capteur passe par une phase de régime variable qui l'amène de la température ambiante  $T_a$  (à laquelle il se trouve en début de journée) à sa température de fonctionnement  $T_{fs}$ .[9]

Le bilan global de la phase de mise en température d'une durée  $t_m$  peut être mis sous la forme

$$Q_{s}A = U(T_{pm} - T_{a})A + \frac{\dot{m}C_{p}(T_{fs} - T_{fe})}{t_{m}}$$
 [W] (II.78)

Où :

 $Q_sA$ : Flux solaire moyen absorbé lors de la phase de mise en température  $t_m$ .

 $T_{pm}$ : Température moyenne de l'absorbeur lors de la phase de mise en température $t_m$ .

 $t_m$ : Temps nécessaire à la mise en température $t_m$ .

La durée de la phase de mise en température s'écrit donc :

$$t_{m} = \frac{\dot{m}C_{p}(T_{fs}-T_{fe})}{\left[Q_{s}-U(T_{pm}-T_{a})A\right]}$$
[sec] (II.79)

#### **II-1.5.4** Pertes de charge

Les frottements du fluide caloporteur dans les conduites entrainent des pertes de charge qui sont principalement fonction de la vitesse d'écoulement du fluide.

La connaissance des pertes de charge totale permet d'assurer un écoulement suffisant du fluide en convection naturelle (thermosiphon) ou de calculer la puissance de la pompe de circulation.

Les pertes de charge totale  $\Delta P_{Tot}$  se divisent en deux parties distinctes :[9]

$$\Delta P_{Tot} = \Delta P_L + \Delta P_S \qquad [Pa] \tag{II.80}$$
Avec :

-  $\Delta P_L$  Pertes de charge Linéaire (exprime les pertes d'énergie cinétique par frottement entre fluide et paroi).

-  $\Delta P_S$  Pertes de charge singulière (exprime les pertes d'énergie cinétique par choc entre fluide et paroi de la conduite ou les organes placées dans la conduite).

Les pertes de charge en ligne régulières (Linéaire) dans une conduite à parois lisses sont données par :

$$\Delta P_L = nf \frac{L}{D_i} \rho_f \frac{u_f^2}{2} [Pa] \tag{II.81}$$

Avec :

- 
$$f = \frac{64}{R_e}$$
 si  $R_e < 2000$  écoulement laminaire.  
-  $f = \frac{0.3164}{R_e^{0.25}}$  si  $R_e > 2000$  écoulement turbulent

Les pertes de charge en ligne non régulière (Singulière) dans une conduite ou au travers un organe tell que Coude 90°, Vanne, Pompe,...etc. Sont données par :

$$\Delta P_S = K_s \rho_f \frac{u_f^2}{2} \qquad [Pa] \qquad (II.82)$$

Où :

- *f* : Coefficient des pertes de charge linéaire (ou coefficient de frottement).

-  $K_s$  : Coefficient des pertes de charge Singulière dépend de la forme géométrique de la conduite ou l'organe place dans la conduite.

- $\rho_f$ : Masse volumique du fluide.
- *L* : Longueur de la conduite.
- $D_i$ : Diamètre intérieur de la conduite, pour le cas des collecteurs  $D_i = D_{icoll}$ Dans notre cas on :

 $K_T$ : Les raccordements entre tubes/collecteurs en forme de T renversé ( $\perp$ ) à l'entrée et T ( $\overline{\parallel}$ ) à la sortie au nombre de(2n - 2).

 $K_C$ : Les raccordements sous forme d'un coude de 90° ( $\underline{\mathbb{H}}$ ) et ( $\underline{\mathbb{H}}$ ) au nombre de deux. Donc au total on a :

$$\Delta P_S = \rho_f ((2n-2)K_T + 2K_C) \frac{u_f^2}{2}$$
 [Pa] (II.83)

C'est-à-dire le coefficient des pertes de charges singulières  $K_s$  prend l'expression suivante :

$$K_s = 2[(2n-2)K_T + 2K_C]$$

Donc :

$$\Delta P_{Tot} = nf \frac{L}{D_i} \rho_f \frac{u_f^2}{2} + \rho_f ((2n-2)K_T + 2K_C) \frac{u_f^2}{2}$$
[Pa] [II.84]
$$\Delta P_{Tot} = \rho_f \left[ (2n-2)K_T + 2K_C + nf \frac{L}{D_i} \right] \frac{u_f^2}{2}$$
 [Pa] (II.85)

#### II-1.6 Méthode du calcul des paramètres caractéristiques d'un capteur solaire plan

On se place ici dans le cas de dispose d'un capteur solaire plan dont on connait les dimensions et les propriétés thermiques et optiques des différents éléments constitutifs. Le problème est de déterminer son rendement dans des conditions météorologiques données. Les inconnues principales du problème sont U et  $\eta$ .

On utilise la méthode suivante :

1) On fixe une valeur mesuré de  $T_{pm}$ 

2) On calcule les différents coefficients d'échange par convection et rayonnement puis le

coefficient globale de pertes *U* par l'une des relations (II.40)

3) On calcule F, F',  $F_R$ ,  $\eta$  par les relations (II.50), (II.56), (II.67),(II.68)

#### II-1.6.1 Vitesse de circulation du fluide

Quelque soit la méthode choisi pour les calcules des caractéristiques du capteur, la vitesse de circulation du fluide qui définie le type de l'installation (à pompe ou thermosiphon) est très importante de la connaitre préalablement. [12]

#### II-1.6.2 Le débit de fluide

Le débit de fluide est obtenue directement à partir de figure ci-dessus.

$$\begin{aligned} \text{Pour:} \quad \varphi &= 30^{\circ}, \ h = 0.6m \Rightarrow \begin{cases} V_1: \dot{m}_f &= 1m^3/h = 0.27kg/s \\ V_2: \dot{m}_f &= 1.75m^3/h = 0.48kg/s \\ V_3: \dot{m}_f &= 2.46m^3/h = 0.68kg/s \end{cases} \\ \text{Pour:} \quad \varphi &= 60^{\circ}, \ h = 1.74m \Rightarrow \begin{cases} V_1: \dot{m}_f &= 0.3m^3/h = 0.08kg/s \\ V_2: \dot{m}_f &= 1.12m^3/h = 0.31kg/s \\ V_3: \dot{m}_f &= 1.96m^3/h = 0.54kg/s \end{cases} \end{aligned}$$



Figure II.8:schéma représente le débit massique de fluide caloporteur

#### II-1.6.3 Calcul des paramètres principaux

Après la présentation de la méthode de détermination de la vitesse et le débit du fluide dans les tubes de l'absorbeur que l'on va utiliser pour savoir le régime d'écoulement et le mode de transfert de chaleur ainsi que l'estimation des pertes de charge dans le capteur, on revient maintenant aux étapes des calculs des paramètres du capteur .

Les données et les caractéristiques du capteur considèrent comme model et base de calcul pour n'importe quel appareil similaire sont présentés dans le tableau (II.1) ci-dessous.

#### Cas du capteur en tube parallèle :

Fixation d'une valeur mesurée  $T_{pm(0)}$ : pour une journée de 25/01/2015

$$T_{pm(0)} = 75,08$$
 °

Absorbeur	Symbole	Unité	Valeur	
Matière des tubes avec les ailettes :	s ailettes : Aluminium			
Coefficient d'absorption (pour les rayons solaire) $\alpha_{ps}$ -		-	0,90	
Coefficient d'absorption (Rayons infrarouge)	$\alpha_{pi}$	-	0,95	
Coefficient d'émissivité (Rayons infrarouge)	$\varepsilon_{pi}$	-	0,2	
Epaisseur	$e_{pi}$	m	0,001	
Diamètre intérieur pour l'absorbeur à tube	D <sub>i</sub>	m	0,010	
Diamètre extérieur pour l'absorbeur à tube	D <sub>e</sub>	m	0,014	
Coefficient de conductivité thermique		w/m .k	240	
Distance entre deux tubes ( $l$ = Longueur d'une ailette + $D_e$ )		m	0,073	
Epaisseur de l'ailette égale épaisseur tube (On suppose $e_{pl} = e_{pt}$		m	0,001	
nombre des tubes de l'absorbeur				
our tube serpentin 01				
pour tube parallèle	09			
Couverture				
Matière : Verre ordinaire		re		
Coefficient d'absorption (pour les rayons infrarouge) $\alpha_{ci}$ -		-	0,1	
Coefficient d'émissivité (Rayons infrarouge)	ε <sub>ci</sub>	-	0,93	
Coefficient d'transmission (pour les rayons solaire)	$ au_{cs}$	-	0,84	

Tableau II.1 : Données du capteur

#### <u>Chapitre II</u>

Etude Analytique

Epaisseur	e <sub>c</sub>	m	0,004
Isolation			
Matière :	Mousse polyuréthane		
Coefficient de conductivité thermique	$\lambda_i$	w/m.°C	0,027
Epaisseur	e <sub>i</sub>	m	0,035
Météorologique			1
Température ambiante	T <sub>a</sub>	°C	11,2
Vitesse du vent	u <sub>vent</sub>	m/s	3
Positionnement		I	I
Ville	Adrar		
La latitude		deg	27.53°
Longitude		deg	0.28°,
Altitude		m	264
Inclinaison (deux inclinaison)	φ	deg	30°, 60°
Dimensions			
Longueur	L	m	1,93
Largeur	Lr	m	0,93
hauteur	Н	m	0,07
Distance entre absorbeur et couverture	D	m	0,045
Fluide caloporteur			
Fluide : Eau			
Capacité calorifique	C <sub>p</sub>	J/(kg.°C)	4186
Fonctionnement			
Régime de fonctionnement	Permanant		

✓ Calculons maintenant les paramètres inconnus  $h_{vent}$ ,  $h_{pc}^{VC}$ :

#### 1) Coefficient de convection du vent:

 $u_{vent} = 3 m/s$  ,  $h_{vent} = 5,7 + 3,8 u_{vent} = 5,7 + 3,8(3) = 17,1 w/m^2 k^{\circ}$ 

2) Coefficient de transfert de chaleur par convection entre absorbeur et couverture  $h_{pc}^{VC}$ Afin d'utiliser la relation empirique de HOLLANDS (1976) en considère la paroi absorbante et la couverture comme deux surfaces parallèles délimitant un espace contenant de l'air: [6]



Figure II.9 : Convection naturelle entre l'absorbeur et la vitre

$$h_{pc}^{VC} = \frac{\lambda_a}{d} (N_u)_{pc}^{VC}$$
(II.86)

$$Nu = 1 + 1.44 \left( 1 - \frac{(\sin 1.8 \,\varphi)^{1.6} 1708}{\text{Ra.} \cos \varphi} \right) \left( 1 - \frac{1708}{\text{Ra.} \cos \varphi} \right)^* + \left( \left( \frac{\text{Ra.} \cos \varphi}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right)^* (\text{II.} 87)$$

Les expressions suivies d'un astérisque ()\* sont prises égales à zéro si leur résultat est négatif Avec :

- $\phi$ : Angle d'inclinaison du capteur (0°<  $\phi$ <75°).
- Nu : Nombre de Nusselt.
- $\lambda_a$ : Conductivité thermique de l'air.
- d : Distance entre la vitre et l'absorbeur.
- Ra : Nombre de Rayleigh.
- > Propriétés de l'air à la température moyenne  $T_{moy}$

$$T_{moy} = \frac{T_a + T_{pm}}{2} = \frac{11,2 + 75,08}{2} = 43,14^{\circ}C = 316,79 K$$

Tableau II.2 : Formules et propriétés de l'air a  $T_{moy}$  en °C

Formules	Valeurs	Unités	
$\rho = 1,1774 - 0,00359 (T_{moy} - 27)$	1,1194	Kg/m <sup>3</sup>	
$\lambda_a = 0.02624 + 0.0000758 (T_{moy} - 27)$	0,0274	W/m°C	
$\mu = 10^{-5} (1,983 + 0,0184 (T_{moy} - 27))$	2,279.10 <sup>-5</sup>	Pa.s	
$C_p = 1005,7 + 0,066(T_{moy} - 27)$	1006,765	j/kg.°C	
$P_r = \mu . C_p / \lambda_a$	0,835		
$\beta = /T_{moy} + 273$	0,003163	k <sup>-1</sup>	
<b>NB</b> : Ces relations son valables entre 0 et 100°C			

#### <u>Chapitre II</u>

> Nombre de Grachof $G_r$ :

$$G_r = \frac{g\rho^2 \Delta T d^3 \beta}{\mu^2} (\text{II.88})$$

g: Accélération de la pesanteur = 9.81 m/s<sup>2</sup>

 $\Delta T$ :Écart de température entre la vitre et l'absorbeur en °k

$$\Delta T = T_{pm} - T_a = 384,08 - 284,2 = 63,88^{\circ}C$$

- *d*: Distance entre l'absorbeur et couverture.
- $\beta$ : Dilatation en k.

$$G_r = \frac{9,81 * (1,1194)^2 * 63,88 * (0,045)^3 * 0,003163}{(2,279 * 10^{-5})^2} = 435370$$

Nombre de Rayleigh:

$$Ra = G_r * P_r = 435370 * 0,835 = 363870$$

Nombre de NusseltNu :

Nu = 1 + 1,44 
$$\left(1 - \frac{(\sin 1,8 * 60)^{1,6}1708}{363957,435 * \cos 60}\right) \left(1 - \frac{1708}{363957,435 * \cos 60}\right) + \left(\left(\frac{363957,435 * \cos 60}{5830}\right)^{1/3} - 1\right)$$
  
Nu = 4,5271

- pour  $\phi = 60^{\circ}$ Nu = 4,5271
- ✓ Le coefficient  $h_{pc}^{VC}$  : pour  $\varphi = 60^{\circ}$

$$h_{pc}^{VC} = \frac{\lambda_a}{d} (N_u)_{pc}^{VC} = \frac{0.0275}{0.045} * 4.5271 = 2.7629 \, w/m^2. k$$

#### 3) Coefficient globale de pertes U

- $h_{pc}^{VC} = 2,776 \ w/m^2 k$   $h_{vent} = 17,1w/m^{2} \circ C$ Pour l'isolation on a :  $e_i = 0,035 \ m$   $\lambda_i = 0.027 \ w/m. k$  $A = L * Lr = 1,7949 \ m^2$
- 3.1 Calcul des paramètres inconnus:

$$h_{pc}^{R}$$
 et  $h_{ca}^{R}$ 

> Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la paroi et la couverture  $h_{pc}^R$ On a : la température moyenne de vitre mesurée est :

 $T_{mc} = 41,05^{\circ}C = 304,8 k$ 

$$h_{pc}^{R} = \sigma \frac{(T_{pm}^{2} + T_{mc}^{2})(T_{pm} + T_{mc})}{\frac{1}{\alpha_{pi}} + \frac{1}{\alpha_{ci}} - 1}$$

Tous les paramètres sont connus

$$h_{pc}^{R} = 0.82 \, w/m^2 k$$

> Coefficient d'échange de chaleur par rayonnement entre la paroi et la couverture  $h_{ca}^R$ On a :

$$h_{ca}^{R} = \frac{\sigma \alpha_{ci} (T_{mc}^{4} - \varepsilon_{a} T_{a}^{4})}{T_{mc} - T_{a}}$$

Tous les paramètres sont connus

 $h_{ca}^{R} = 0,93 \, w/m^{2}. \, k$ 

$$U = \frac{1}{\frac{1}{2,7629+0,82} + \frac{1}{17,1+0,93}} + \frac{1}{\frac{0,035}{0,027*1,7949} + \frac{1}{17,1}} \qquad [w/m^2K]$$
$$U = 4,2704 \ w/m^2k$$

# 4) Calcul des F, F' et $\eta$ :

Le calcul du rendement thermique  $\eta$  nécessite d'abord le calcul des deux coefficients F, F'.

#### a. Le rendement de l'ailette F

Le rendement de l'ailette est défini par :

$$F = \frac{tanh\left[\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)\right]}{\omega\left(\frac{l-D_e}{2}\right)} \qquad avec: \ \omega = \frac{U}{\lambda_p e_p}$$
$$\omega = \frac{4,2704}{240 * 0,001} = 17,7935 \quad , F = \frac{tanh\left[17,7935 * \left(\frac{0,073 - 0,014}{2}\right)\right]}{17,7935 * \left(\frac{0,073 - 0,014}{2}\right)} = 0,9173 = 91,73\%$$

#### b. Facteur d'efficacité de la plaque absorbanteF ':

Ce facteur exprime le rapport de la résistance au transfert de chaleur entre la plaque et l'extérieur sur la résistance thermique entre le fluide et l'extérieur.

$$F' = \frac{\frac{1}{U}}{l\left[\frac{1}{[(l-D_e)F + D_e]U} + \frac{e_t}{\lambda_t \pi D_i} + \frac{1}{h_i \pi D_i}\right]}$$

Le seul paramètre inconnu est le coefficient de convection entre le fluide et la paroi du tube de l'absorbeur.

#### c. Coefficient de convection fluide/paroi *h<sub>i</sub>*:

Le coefficient est calculable par l'un des corrélations suivantes, pour un écoulement dans les tubes lisse :

• Ecoulement turbulent: [9]

**COLBURN.** Pour:  $R_e > 5000 \ et \quad 0.6 \le P_r \le 100$  $N_u = 0.023 R_e^{0.8} P_r^n$  (II. 89)

Avec:

 $n = 0,3 \ si$   $T_{fluid} > T_{tube}$  Fluide chauffe la paroi du tube  $n = 0,4 \ si$   $T_{fluid} < T_{tube}$  la paroi du tube chauffe fluide

• Ecoulement laminaire:

**SIEDER** et **TATE** pour: 
$$R_e P_r \frac{D}{L_{tub}} \ge 10$$
 et  $\mu_p$  calculer à  $T_{pm}$ 

$$N_u = 1,86 \left( R_e P_r \frac{D}{L_{tub}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} (\text{II}.90)$$

Si la condition n'est pas vérifier on utiles la relation de HAUSEN:

$$N_{u} = 3,66 \frac{0,0668 \left(\frac{R_{e}P_{r}D}{L_{tub}}\right)}{1 + 0,04 \left(\frac{R_{e}P_{r}D}{L_{tub}}\right)^{2/3}} \left(\frac{\mu}{\mu_{p}}\right)^{0,14} (\text{II}.91)$$

Propriétés de l'eau à la température moyenne du fluide :

$$T_{fmoy} = \frac{T_{fe} + T_{fs}}{2} = \frac{30,58 + 53,66}{2} = 42,12^{\circ}C$$

Tableau II.3 : Formules et propriétés de l'eau à  $T_{fmoy}$  en °C

Formules	Valeurs	Unités
$\rho = -0.0038T_{fmoy}^2 - 0.0505T_{fmoy} + 1002.6$	993,731	Kg/m <sup>3</sup>
$\lambda = -9,87.10^{-6}T_{fmoy}^2 + 2,238.10^{-3}T_{fmoy} + 0,5584$	0,6352	W/m°C
$\mu = 10^{-4} (0.002T_{fmoy}^2 - 0.3389T_{fmoy} + 17.199)$	6,47.10 <sup>-4</sup>	Pa.s
C <sub>p</sub>	4186	j/kg.°C
$P_r = 1,577.10^{-3}T_{fmoy}^2 - 0,261T_{fmoy} + 12,501$	4,3	
<b>NB</b> : Ces relations son valables entre 0 et 100°C		

#### > Installation a pompe (Circulation forcée)

-Le débit du fluide dans un tube est déjà calculé :

$$\dot{m}_{ftube} = \frac{\dot{m}_f}{n}$$
(II. 92)

$$\dot{m}_{ftube} = \frac{0,0833}{9} = 0,0093$$

- La vitesse dans les tubes sera:

$$u_{ftube} = \frac{4\dot{m}_{ftube}}{\pi\rho D_i^2} = \frac{4*0,0093}{3,14*993,731*(0,010)^2} = 0,1186m/s$$

- Le **Prandtl**  $P_r = 4,3$ 

- Vérification du régime d'écoulement :

$$R_e = \frac{\rho D_i u_{ftube}}{\mu} = \frac{993,731*0,010*0,1186}{6,47*10^{-4}} = 1820,7 < 2300 \text{ Écoulement est laminaire}$$
$$P_r R_e \frac{D_i}{L} = 4,3*1820,7*\frac{0,010}{1,93} = 40,56 \ge 10$$

On utilise la relation de SIEDER et TATE :

$$N_u = 1,86 \left( R_e P_r \frac{D}{L_{tub}} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_p} \right)^{0,14} = 7,01$$
$$\mu_p = 3,0286 * 10^{-4}$$

Donc le nombre de Nusselt :

$$N_{u} = 7,0243$$

$$h_{i} = \frac{\lambda}{D_{i}} N_{u} = \frac{0,6352}{0,01} * 7,0243 = 446,1536 \ w/m^{2} \ k$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U}}{l\left[\frac{1}{\left[(l-D_{e})F+D_{e}\right]U} + \frac{e_{t}}{\lambda_{t}\pi D_{i}} + \frac{1}{h_{i}\pi D_{i}}\right]}$$

$$= \frac{1/4,2704}{0,073\left[\frac{1}{\left[(0,059)0,9173+0,014\right]4,2704} + \frac{0,001}{380 * 3,14 * 0,010} + \frac{1}{446,1536 * 3,14 * 0,010}\right]} F' = 0,9141$$

$$= 91,41\%$$

#### d. Le facteur de conduction $F_R$ :

Expression du facteur de conductance de l'absorbeur  $F_R$ :

$$F_{R} = \frac{\dot{m}_{f}C_{p}}{AU} \left[ 1 - exp\left(-\frac{AF'U}{\dot{m}_{f}C_{p}}\right) \right]$$
$$= \frac{0.083 * 4186}{1.7949 * 4.2704} \left[ 1 - exp\left(-\frac{1.7949 * 0.9141 * 4.2704}{0.083 * 4186}\right) \right]$$
$$F_{R} = 0.9050 = 90.50\%$$

Avec :  $A = L_{tube} * Lr = 1,93 * 0,93 = 1,7949 m^2$  Surface de la plaque absorbante. e. Le rendement  $\eta$ :

On deux expressions pour calculer le rendement global du capteur :

L'expression du rendement global du capteur qui prend en compte  $F_R$  et  $T_{fe}$ :

$$\eta = F_R \left[ \eta_R - \frac{U(T_{fe} - T_a)}{G^*} \right]$$

L'expression du rendement global du capteur qui prend en compte F' et  $T_{pm}$ :

$$\eta = F'\left[\eta_R - \frac{U(T_{pm} - T_a)}{G^*}\right]$$

 $\eta_R = \frac{Q_s}{G^*}$ 

Expression du rendement optique :

Expression de la puissance absorbée par le capteur:  $Q_s = \eta_R G^*$  (II. 93) Donc le rendement radiatif du capteur peut s'écrit :

$$\eta_{R} = (\tau \alpha)_{eff} = \left(\frac{\tau_{cs} \alpha_{ps}}{1 - (1 - \alpha_{ps})\rho_{cs}}\right)$$
(II. 94)  
$$\eta_{R} = \frac{0.84 * 0.9}{1 - (1 - 0.9) * 0.07} = 0.7613$$
  
$$\eta = F_{R} \left[\eta_{R} - \frac{U(T_{fe} - T_{a})}{G^{*}}\right]$$
  
$$\eta = 0.9050 \left[0.7613 - \frac{4.2704(30.58 - 11.2)}{1108.36}\right] = 0.6215 = 62.15\%$$

#### f. Calcul de la température moyenne de la plaque absorbante $T_{pm}$ :

On recalcule la valeur de  $T_{pm}$  par la relation suivante, afin de la comparer avec la valeur de la  $(T_{pm(0)} = 75,08^{\circ}C)$ :

On a :

$$Q_s = \eta_R G^* = 0,7613 * 1108,36 = 843,8269$$
$$Q_u = AF_R \left[ Q_s - U (T_{fe} - T_a) \right]$$

Donc :

La relation de la température devient:

$$T_{pm} = T_{fe} + \left(\frac{A * F_R \left[Q_s - U(T_{fe} - T_a)\right](1 - F_R)}{F_R * U}\right)$$
(II. 95)  
$$T_{pm} = 30,57 + \left(\frac{1,7949 * 0,9050 * [843,8269 - 4,2704 * (30,57 - 11,2)] * (1 - 0,9050)}{0,9050 * 4,2704} T_{pm} = 60,96 \ ^{\circ}C$$

#### Cas du capteur en tube serpentin :

Fixation d'une valeur mesurée  $T_{pm(0)}$ : pour une journée de 23/02/2015

$$T_{pm(0)} = 73,29 \,^{\circ}C$$

#### Le facteur de conduction $F_R$ :

Pour un collecteur de type serpentin, le facteur  $F_R$  (facteur de conductance) a été évalué par **Zhang et al,** (1985) en fonction de trois paramètres dimensionnels ( $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ). Il est donné par:[6,23]

$$F_{R} = F_{1} F_{3} * \left[ \frac{2 * F_{5} * F_{3}}{F_{6} exp \left[ -\frac{(1 - F_{2}^{2})^{0.5}}{F_{3}} \right] + F_{5}} - F_{5} \right]$$
(II. 96)

Les paramètres  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$  sont fonctions des paramètres géométriques (l,  $e_p$ ,  $D_i$ ,  $D_e$ , N), des paramètres thermiques ( $\lambda_P$ , U,  $C_p$ ,  $h_f$ ) et du debit du fluide caloporteur du capteur tel que:

$$F_{1} = \frac{\kappa}{Ul} \frac{\kappa R(1+\gamma)^{2} - 1 - \gamma - \kappa R}{[\kappa R(1+\gamma) - 1]^{2} - (\kappa R)^{2}}$$
(II. 96)

$$F_2 = \frac{1}{\kappa R (1+\gamma)^2 - 1 - \gamma - \kappa R}$$
(II. 97)

$$F_3 = \frac{\dot{m}C_p}{F_1 U A_c} \tag{II.98}$$

$$F_4 = \left(\frac{1 - F_2^2}{F_2^2}\right)^{0.5} \tag{II.99}$$

$$F_5 = \frac{1}{F_2} + F_4 - 1 \tag{II. 100}$$

$$F_6 = 1 - \frac{1}{F_2} + F_4 \tag{II. 101}$$

$$\kappa = \frac{\left(\lambda_P * e_p * U\right)^{0.5}}{\sinh * \left[\left(l - D_e\right) * \left(\frac{U}{\lambda_P * e_p}\right)^{0.5}\right]}$$
(II. 102)

$$\gamma = -2\cosh\left[\left(l - D_e\right) * \left(U/\lambda_P * e_p\right)^{0.5}\right] - \frac{D_e * U}{\varsigma}$$
(II. 103)

$$R = \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_i h_i}$$
(II. 104)

Avec:

 $C_b$ : Conductivité thermique de la junction plaque- tube (w/m.k). [16]

 $h_i$ : Coefficient d'échange thermique fluide à tube.

 $A_{c} = NlL = 9 * 0,073 * 1,93 = 1,268m^{2}$ 

N : le nombre de segment.

$$\kappa_{\rm s} = \frac{(240 * 0.001 * 4.2516)^{0.5}}{sinh * [(0.073 - 0.014) * (4.2516/240 * 0.001)^{0.5}]} = 4.0263$$
  
$$\gamma = -2cosh[(0.073 - 0.014) * (4.2516/240 * 0.001)^{0.5}] - \frac{0.014 * 4.2516}{4.0263} = -2.0768$$

Notre cas le tube et la plaque absorbante sont considéré comme ailette donc

$$R = \frac{1}{3,14 * 0,01 * 440,758} = 0,0722$$

$$\kappa_{R} = 4,0263 * 0,0722 = 0,2908$$

$$F_{1} = \frac{4,0263}{4,2516 * 0,073} \frac{0,2908 * (1 - 2,0768)^{2} - 1 + 2,0768 - 0,2908}{[0,2908(1 - 2,0768) - 1]^{2} - (0,2908)^{2}} = 8,8859$$

$$F_{2} = \frac{1}{0,2908 * (1 - 2,0768)^{2} - 1 + 2,0768 - 0,2908} = 0,8904$$

$$F_{3} = \frac{0,0833 * 4186}{8,8859 * 4,2516 * 1,268} = 7,2755$$

$$F_{4} = \left(\frac{1 - 0,8904^{2}}{0,8904^{2}}\right)^{0.5} = 0,5113$$

$$F_{5} = \frac{1}{0,8904} + 0,5113 - 1 = 0,6344$$

$$F_{6} = 1 - \frac{1}{0,8996} + 0,4856 = 0,3882$$

$$F_{R} = 8,8859 * 7,2755 * \left[\frac{2 * 0,6344 * 7,2755}{0,3882 * exp \left[-\frac{(1 - 0,8904^{2})^{0.5}}{7,2755}\right] + 0,6344} - 0,6344\right]$$

$$F_{R} = 0,9665 = 96,65\%$$
. Le rendement  $\eta$ :

$$\begin{split} \eta &= 0.9665 \left[ 0.7613 - \frac{4.2516(29,49 - 11,46)}{1108,36} \right] = 0.7603 = 76,03\% \\ T_{pm} &= T_{fe} + \left( \frac{A * F_R \left[ Q_s - U \left( T_{fe} - T_a \right) \right] (1 - F_R)}{F_R * U} \right) \\ &= 29,49 + \left( \frac{1.7949 * 0.9665 * [889,2869 - 4.2516 * (29,49 - 11,46)] * (1 - 0.9665)}{0.9665 * 4.2516} \right) \\ &= T_{pm} = 40,97 \,^{\circ}C \end{split}$$

Les résultats mesurées et calculés pour les deux capteurs représentés ci-dessous sont réalisés pour la mode de circulation du fluide (circulation forcé) :

Tableau II.4: Résultats des calculs

Circulation forcée « avec Pompe »				
Paramètres	Unités	capteur en tube parallèle	capteur en tube serpentin	
T <sub>pm</sub>	°C	75,08	73,34	
T <sub>cm</sub>	°C	41,05	39,71	
T <sub>a</sub>	°C	11,2	11,46	
T <sub>fe</sub>	°C	30,57	29,49	
T <sub>fs</sub>	°C	53,66	59,72	
h <sub>AV</sub>	$w/m^2k$	2,9859	2,9704	
h <sub>AR</sub>	$w/m^2k$	1,2085	1,2085	
U	$w/m^2k$	4,2704	4,2516	
F	%	91,73	91,79	
<b>F</b>	%	91,41	91,45	
F <sub>R</sub>	%	90,50	96,65	
$Q_s$	$w/m^2$	843,8269	889,2869	
$Q_{pAV}$	$w/m^2$	190,739	183,8	
$Q_{pAR}$	$w/m^2$	77,20	74,782	
$Q_p$	$w/m^2$	267,939	258,582	
Q <sub>u</sub>	W	4485,675	5872,758	
$\eta_R$	%	76,13	76,13	
η	%	62,15	76,03	



Figure II.10: Organigramme du calcul de bilan thermique

# Chapitre III: Etude expérimentale et discussion des résultats

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

La région d'Adrar qui est située au sud ouest Algérien est caractérisé par un fort taux d'ensoleillement, horizontale de 6598.5 Wh/m2/j et de 7003.82 Wh/m2/j sur un plan orienté plein sud et incliné à la latitude du lieu à 27.88° pendant une durée d'insolation journalière réelle de 10 h en moyenne. Ce potentiel énergétique important a favorise cette région à climat continental connue par des basses températures en hivers de l'ordre de (-4 °C) à exploiter les chauffe – eau solaire pour subvenir aux besoins quotidiens. Les coordonnées du site sont les suivantes : la latitude 27.88°, le longitude 0.28°, l'altitude 264m, albédo 0.2. Les capteurs sont inclinés à deux inclinaisons 30° et 60° par rapport à l'horizontal et orienté en plein sud.

#### III-2.Description du banc d'essai

Notre travail a pour objectif, l'étude comparative du deux capteurs solaires plan à eau sur le rendement instantané de ces derniers, le prototype est installé sur la plate-forme des essais expérimentaux de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables de Adrar, comme montré en figure (III.1).

Le rendement d'un capteur solaire plan en régime permanent, peut être évalué expérimentalement par le bilan thermique.



Figure III-1: Photo du prototype de deux capteurs solaires plans réalisé à l'URER/MS

### III-2.1. Caractéristiques physique du capteur solaire plan d'essais :

Le tableau suivant présente les paramètres nécessaires du capteur solaire plan mis en essai à l'unité de recherche des énergies renouvelables à ADRAR. Les essais sont effectués durant de la journée du 25/01/2015 de 10h00 à 16h:00 pour 1<sup>er</sup> capteur et 24/02/2015 de 10h00 à 16h:00 pour 2<sup>eme</sup> capteur.

Eléments	Dimension et caractéristiques	Matériaux
	Longueur : 1.930 m, Largeur : 0.93 m	Aluminium
Bac	Hauteur : 0.07m	
	Epaisseur : 0.004 m. Transmissivité : 0.84	Verre blanc
couverture	Indice de réfraction :1.52	
	Type de l'absorbeur	Tube -ailette
Absorbeur	Epaisseur : 0.001 m, Emissivité : 0.2	
	Conductivité : 240 W/ m °C, Absorptivité : 0.95	Aluminium
	Diamètre : 0.010 / 0.014 m	cuivre
tube	Serpentin : Longueur : 17.10 m, nombre de tube : 1	
	Parallèle: Longueur : 1.93m, nombre de tube : 9	
	Epaisseur arrière : 0.035m. Epaisseur latérale : 0.035m	Mousse
Isolant	Conductivité : 0.027 W/ m °C	Polyuréthanne

Tableau III.1 : Caractéristiques techniques du capteur

## III-2.2: Montage de prototype:



Figure (III.2): Plaque absorbante





#### **III-2.3 Instrumentation**

#### Paramètres mesures et instruments de mesures

Pour déterminer la performance instantanée du capteur solaire, un certain nombre de paramètres doivent être mesurés.

#### > Préparation et installation des thermocouples

Lors des essais expérimentaux, on utilise des thermocouples pour la mesure des différentes températures. Les thermocouples sont adaptés pour ce genre d'utilisation car ils sont bon marché, robustes et pratiques. Un thermocouple est formé par la soudure au chalumeau de deux différents fils métalliques. Suivant l'effet Seebeck, une tension thermoélectrique apparait au niveau de la jonction en fonction de la température de cette dernière. Lorsque ces deux fils sont connectés aux bornes de l'acquisition de données (Fluke Hydra data Logger 2625A) on forme alors un thermocouple à deux jonctions (T1 : jonction chaude et T2 : jonction froide) comme montré en figure III.5.



*Figure III.5. : Schéma représentatif d'un thermocouple relié aux bornes d'une acquisition de données.* 

Par effet Seebeck, ce thermocouple génère une tension qui est proportionnelle à la différence de température des deux jonctions. Si on veut mesurer la température T1, alors on doit compenser l'effet de la jonction froide T2 ce qui est fait automatiquement par notre système d'acquisition de données grâce à un circuit électronique interne. Notre acquisition de données se charge également de la conversion électronique de la tension thermoélectrique délivrée par la jonction chaude à une température directement lue en degrés Celsius (°C). Aux laboratoires, on peut trouver différents type de thermocouples. Les plus couramment utilisés sont :

Type K : Chromel / Alumel

Type J : Fer/Constantan

#### Type T : Cuivre/Constantan

Pour notre banc d'essai, on utilise des thermocouples de type K . Mais avant de les utiliser, il faut vérifier leurs soudures par simple étalonnage.



Figure III.6: L'étalonnage des thermocouples

L'étalonnage d'un thermocouple consiste à relever sa réponse à l'aide de notre acquisition de données quand sa soudure est placée dans un milieu dont la température est connue. Cette opération est effectuée au minimum en deux points fixes correspondants aux températures de changement d'état de l'eau. C'est-à-dire le point 0°C et le point 100°C.

#### Mesure des températures :

Pour les besoins de notre étude expérimentale, il nous faut huit thermocouples de type K (Cromel-Alumel) pour mesurer la température de l'eau à l'entrée et la sortie du capteur ainsi que la température de la plaque d'absorption, la vitre et à l'extérieur, sont implantés comme suit .

• Deux thermocouples sont placés sur la surface de la plaque absorbante. un en haut et l'autre en bas

- un thermocouple est placé sur la surface extérieur de la vitre .
- un thermocouple est placé sur la surface de tube d'échangeur .
- Deux thermocouples sont placés l'un à l'entrée, l'autre à la sortie du capteur.
- un thermocouple est placé sur la surface de la plaque (bac).
- un thermocouple pour mesurer la température ambiante .

### > Mesure du rayonnement global :

Le rayonnement solaire global sur une surface inclinée de 60° (surface du capteur) est mesuré à l'aide d'un pyranométre de type Kipp et Zonen.



Figure III.7: Le pyranomètre

Une Pompe à eau représentée sur la figure III.8, qui est joué le rôle d'un circulateur du fluide caloporteur dans le circuit.



Figure III.8: La pompe de circulation

## III-2.4. Enregistrement des données :

Un enregistreur du type Fluke 2625A est programmé pour enregistrer les températures et le rayonnement global pour la journée 25/01/2015 pour ler capteur et 24/02/2015 pour 2eme capteur avec un pas de temps d'une minute.



Figure III.9: L'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés

#### III-3. Mode opératoire :

L'étude expérimentale effectuée sur le prototype a pour objectif la détermination du rendement instantané . Le rendement instantané est obtenu par la relation suivante : (II. 68)

$$\eta = \frac{Q_u}{G^*}$$

 $Q_u$ : Flux utile transmis au fluide caloporteur

*G*<sup>\*</sup>: le rayonnement globale instantané.

$$Q_u = F_R \left[ Q_s - U \left( T_{fe} - T_a \right) \right] \qquad [w/m^2]$$

Où  $F_R$  est le facteur de conductance de la plaque absorbante,  $Q_s$  le flux solaire absorbé, U le coefficient des pertes globale,  $T_{fe}$ : est la température de l'eau à l'entrée,  $T_a$ : la température de l'ambiante .

Le banc d'essai est monté en boucle fermée. Il est composé essentiellement par deux capteurs solaires plans à un seul vitrage représenté sur la figure (III.1), dont la surface totale est égale à  $1.7494 \text{ m}^2$ ,

#### III-4 : Les résultats expérimentaux :

Nous allons présenté et interprété les résultats des tests effectués sur le capteur solaire plan. Ces tests ont pour le but d'étude de l'influence des paramètres tels que le rayonnement solaire, l'angle d'inclinaison, la vitesse de la pompe et la configuration du réseau du fluide caloporteur du capteur sur le rendement de ce dernier. Les tests ont été menés pendant le mois de janvier et le mois de février 2015.

III-4.1 Premier cas : Capteur solaire plan en tube parallèle :

III-4.1.1 La variation des températures et le rayonnement pour des journées différentes:

**Four l'inclinaison: 60°** 



*Figure III.10 : La variation le rayonnement pour 25/01/2015* 



Figure III.11 : La variation le rayonnement pour 21 à 24 /01/2015





Figure III.12 : La variation des températures pour Vitesse 1\_25/01/2015

*Figure III.13 : La variation des températures pour Vitesse 2 \_ 21 à 24* 



Figure III.14 : La variation des températures pour Vitesse 3\_20/01/2015

On ce qui concerne les résultats du capteur en tube parallèle pour l'inclinaison 60° Les figure III.10 et III.11 : représentent l'évolution du rayonnement solaire reçu sur un plan inclinée (cloche), les figures III.12, III.13 et III.14 ils illustrent la variation des températures des différents composants pour différente vitesse (V1, V2, V3), les températures maximales de fluides à la sortie sont pour :V1:Tfs=62.65 °, V2 :Tfs=60.52°, V3 :Tfs=57.49°



✓ Pour l'inclinaison : 30°

*Figure III.15 : La variation des températures pour Vitesse 1\_03/02/2015* 



*Figure III.16 : La variation des températures pour Vitesse 2\_04/02/2015* 



Figure III.17 : La variation des températures pour Vitesse 3\_10/02/2015

*Figure III.18 : La variation le rayonnement pour 10/02/2015* 

Dans ces figures on remarque que les valeurs des températures de fluide à la sortie (Ts) varient proportionnellement avec le rayonnement où atteint à sa valeur maximal à après midi ,un décalage dans quelque points à cause des facteurs naturelles comme le passage des nuages .

Inclinaison	30°	бо°
Vitesse		
Vı	Tfs=62,49	Tfs=62,65
V2	Tfs=58,97	Tfs=60,52
V3	Tfs=51,36	Tfs=57,49

Tableau III.2: Les températures maximales des sorties de fluide dans les deux inclinaisons



Figure III.19: Variation temporelle du rendement instantané



Figure III.20: Evolution du rendement instantané  $\eta$  en fonction de  $\Delta T/G$ 

L'analyse du la figure III.19. montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales entre 10h00, bien que l'irradiation solaire commence à décroitre à partir de 13h0 et on remarquant aussi que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque

 $\checkmark$ 

63%) aux environs de 10 h malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur, ceci est dû à l'augmentation des pertes thermiques vers le milieu ambiant extérieur.

III-4. 2 Deuxième cas : Capteur solaire plan en tube serpentin :

III-4.2.1 La variation des températures et le rayonnement pour des journées différentes:

1100 1000 900 800 700 G in[WIm<sup>2</sup>] 600 500 400 300 200 100 12 14 15 10 18 Temps [heures]

Pour l'inclinaison: 60°

Figure III.21 : La variation le rayonnement pour 24/02/2015



Figure III.23 : La variation le rayonnement pour 26/02/2015



*Figure III.25 : La variation des températures pour Vitesse 2 25/02/2015* 



Figure III.22 : La variation le rayonnement pour 25/02/2015



Figure III.24 : La variation des températures pour Vitesse 1\_24/02/2015



Figure III.26 : La variation des températures pour Vitesse 3 26/02/2015

L'analyse de ces figures représentant les variations des températures maximales du fluide à sortie , on constant que la variation des vitesse n'a pas une influence sur la température de fluide bien sur à la sortie ,suite de passage de les nuages on remarquons une perturbation soit de rayonnement incident ou température .



✓ Pour l'inclinaison : 30°

Figure III.27 : La variation le rayonnement pour 24/02/2015



Figure III.29 : La variation le rayonnement pour 18/02/2015



*Figure III.31 : La variation des températures pour Vitesse 2\_20/02/2015* 



*Figure III.28 : La variation le rayonnement pour 20/02/2015* 



Figure III.30 : La variation des températures pour Vitesse 1\_24/02/2015



Figure III.32 : La variation des températures pour Vitesse 3\_18/02/2015

D'après les figures :l'inclinaison 30° pour différentes vitesses , on remarquant quelque perturbations de rayonnement qui sont influés sur la température de sortie de fluide . la température la plus élevée est celle de le sortie de fluide à la vitesse 3.

Inclinaison	30°	60°
Vitesse		
V1	Tfs=61,59	Tfs=70,78
V2	Tfs=62	Tfs=72,07
V <sub>3</sub>	Tfs=67,47	Tfs=70,30

Tableau III.3: Les températures maximales des sorties de fluide dans les deux inclinaisons







Figure III.34: Evolution du rendement instantané n en fonction de  $\Delta T/G$ 

Pour la journée 24/02/2015 ,nous remarquons également que le rendement instantané commence à diminuer après avoir atteint son maximum (presque 76%) aux environs de 10 h malgré l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur. ( ceci est dû à le système est saturée).

La figue montre que le rendement instantané est inversement proportionnel au rapport  $\Delta T/\,G$  .

#### III-4. 3 La comparaison entre les deux configuration :

Les résultats obtenus des tests expérimentaux permettent de faire une étude comparative a abouti le choix de configuration parmi les deux étudiées.

Inclinaison	Ecart de T(30°)	Ecart de T(60°)
Vitesse		
V1	0,9	8,13
V2	3,03	11,55
V3	16,11	12,81

Tableau III.4:L'écart de la température entre les valeurs de température de sortie de fluide des deux capteurs.

Le rendement instantané :

 $1^{ere}$  configuration  $\eta = 63 \%$ 

 $2^{\text{eme}}$  configuration  $\eta = 76\%$ 

L'écart de température pour les différentes inclinaisons et les différentes vitesses est montré que la 2<sup>eme</sup> configuration est meilleure par apport la 1<sup>ere</sup> configuration, Les variations de l'inclinaison et de la vitesse sont influées sur la température de sortie de fluide et le rendement.

# Conclusion générale

# **Conclusion et Perspectives**

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude analytique et expérimentale d'un capteur solaire plan à eau en régime permanent cette étude est basée sur la comparaison entre deux capteurs solaires à configurations différents de la forme de réseau de circulation de fluide caloporteur dans le but de mettre en évidence l'influence de ce configuration sur la température du fluide caloporteur et sur le rendement de ce capteur.

Après avoir passé en revue quelques données astronomiques nécessaires à toute étude des dispositifs solaires, une modélisation mathématique du capteur solaire plan a été développée, ce qui nous a permis d'avoir les différentes équations qui régissent le comportement thermique de ce dispositif en régime permanent, ainsi que l'expression de son rendement instantané. Le dispositif solaire objet de notre étude, est un banc d'essai réalisé au sein de notre Unité (URER/MS) située à Adrar. Tous les éléments qui le constituent ainsi que les appareils de mesure utilisés dans le test ont été présentés.

L'étude présentée a permis la détermination des performances des deux capteurs solaires plans en forme de serpentin et en forme des tubes . Le principe de fonctionnement, ainsi que les paramètres influent sur le rendement des capteurs plans ont été cernés et définis. Les différentes températures mesurées au niveau de capteur ont été présentées et discutées.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence de l'angle d'inclinaison du capteur solaire plan et la vitesse du circulation de fluide sur le taux du rayonnement solaire absorbé par ce dispositif et par conséquent sur son rendement instantané.

Par ailleurs, il faut souligner que les tests (par ciel clair) n'ont duré quelque jours, ce qui restent insuffisant pour l'établissement des caractéristiques du capteur solaire plan. En effet, il serait intéressé de mener des tests de performances en incluant des perturbations climatiques (température ambiante, éclairement, vent, ....).

Le rendement instantané diminue si le rapport entre l'écart de température et le rayonnement reçu par ce dispositif augmente. Ceci peut être expliqué par le fait que les pertes thermiques vers le milieu extérieur seront élevées.. les résultats obtenus théoriquement par un travail expérimental, et ont trouvé un écart de 13% estimé satisfaisant.

Après l'étude comparative entre deux configurations, dans ce travail nous avons déduit que le capteur de la forme en serpentin qui donne un rendement maximale 76%, il est plus performant légèrement que celui de la forme de tubes en série de rendement de 63%.

Finalement on proposant comme perspective de refaire l'étude du chauffe-eau solaire en régime variable ainsi que l'influence des paramètres caractéristiques sur les performances du système.

# Annexes

#### Les nombres adimensionnels

#### 1. Nombre de Nusselt

Il caractérise l'importance de la convection par rapport à la conduction : C'est le rapport de la quantité de chaleur échangée par convection h.S.  $\Delta$  T à une quantité de chaleur échangée par conduction  $\lambda_f$ .S. $\Delta$  T/L :

$$N_u = \frac{h_c * L}{\lambda_f}$$

 $h_c$ : Coefficient de convection thermique.

L : Longueur caractéristique.

 $\lambda_f$ : Coefficient de conductivité thermique du fluide.

#### 2. Nombre de Grashoff

Ce nombre caractérise la transmission de la chaleur en convection naturelle, il exprime le rapport entre les forces de viscosité et les forces ascensionnelles créées dans le fluide par les différences de température qui y règnent.

$$G_r = \frac{g * \rho^2 * \Delta T * L^3 * \beta}{\mu^2}$$

 $\beta$ : Le coefficient de dilatation thermique rapporté à la température moyenne du fluide

 $(\beta = 1/T \text{ pour un fluide parfait}).$ 

g : Accélération de la pesanteur.

L : Une dimension caractéristique.

#### 3. Nombre de Prandlt

Ce nombre caractérise la distribution des vitesses par rapport à la distribution de la température.

il caractérise aussi les propriétés physiques du fluide.

$$P_r = \frac{\mu . C_p}{\lambda_f} = \frac{\nu}{a}$$

Cp : Chaleur spécifique à pression constante.

 $\lambda_f$ : Conductivité thermique du fluide.

a : Diffusivité thermique.

#### 4. Nombre de Reynolds

Le régime d'écoulement d'un fluide peut être laminaire ou turbulent. Le passage d'un régime à un autre est caractérisé par le nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{\rho * L * V}{\mu} = \frac{L * V}{\nu}$$

V: Vitesse caractéristique du fluide.

L : Dimension linéaire caractéristique du corps.

 $\mu$ : Viscosité dynamique.

v : Viscosité cinématique.

 $\rho$ : Densité du fluide.

L'expérience montre que pour Re inférieur à une valeur critique Rec, l'écoulement dans une conduite est toujours laminaire. On peut admettre la valeur 2200 pour Rec

#### 5. Nombre de Peclet

Il exprime le rapport des flux thermiques par convection et par conduction dans un échange de chaleur convectif. Ce nombre intervient surtout dans les problèmes d'écoulements faibles nombre de prandlt: c'est-à-dire les métaux liquides.

$$P_e = P_r * R_e = \frac{v * L}{a}$$

#### 6. Nombre de Rayleigh

Il exprime la relation entre les nombres de Grashoff et de Prandlt. Ce nombre peut fournir un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente.

$$Ra = G_r * P_r$$

#### 7 .Nombre de Graetz

$$G_r = R_e * P_r * \frac{D}{L}$$

L et D sont des dimensions caractéristiques du conduit. [14]

# **Références bibliographiques**

**[1]. Saadi Souad** : «effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan»; Thèse de magistère; Université Mentouri de Constantine ; (2010).

[2]. A.Elanique :«Capteurs Solaires Thermiques, Application à la production d'eau chaude sanitaire» Cours 2009/2010.

[3]. Les sources d'énergie renouvelable www.2020energy.eu.

[4]. Benkhelifa Abdelaziz, «Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairement solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur», Mémoire MASTER Université Kasdi Merbah Ouargla 2012.

[5].Abdellarahim, ASMA «Etude théorique et dimensionnement d'un chauffe-eau solaire» université Tlemcen 2014.

[6]. John A. Duffie, William A. Beckman «Solar Engineering of Thermal Processes»:, WILEY-interscience-Edition;(1980).

[7]. R. Bernard; G. Menguy; M. Schwartz, «Le rayonnement solaire conversion thermique et applications»; Technique et documentation Lavoisier, 2<sup>eme</sup> édition 1980.

**[8]. Bouziane Housseyn et Chalabi Med Réda** : «Amélioration de rendement des capteurs solaires plan à eau par qualité des matériaux,» Mémoire Master Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen 2013.

[9]. Yves Jannot . thermique solaire. Paris (2007).

[**10**].Mohamed Mogharbi et Daoud Hallassa, «Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air». Master ,Université Kasdi Merbah de Ouargla .2011.

[11].Michel Capderou: «Atlas Solaire de l'Algérie»; EPAU; Tome (I, II); (OPU,1985,1988).

[12]. Bougagbi Lakhdar :« Etude et amélioration du rendement de la conversion photo thermique du capteur solaire» ; Thèse de magistère; Université Badji Mokhtar Annaba ; (2008).

[13]. Albert Fourny et Marianne Wojcik, «Texte de la conférence présentée le 10 mai 2000, au CRDP de Nancy»: Conférence de Monsieur Hervé Le Treut, directeur de recherche au Laboratoire de Météorologie Dynamique (Unité mixte de recherche : CNRS, École Normale Supérieure, École polytechnique, Université Paris VI).

[14].Abbaz Dalila «Optimisation des paramètres de fonctionnement d'un plancher solaire direct (PSD)»,Magister Université de Constantine 1; 2013.

[15].Akrami Mustapha, «Contribution à l'étude d'un capteur solaire thermodynamique thermosiphon à eau et application aux sites de TIARET et ADRAR», Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen.

[16]. Stoteris A.Kalogirou : « solar energy engineering processes and system » 1<sup>st</sup> ed.

**[17]. Abdelaoui Med Khimmusti et Guricha Foud**, « Etude expérimentale d'un bassin d'eau utilisé comme capteur solaire plan» ,universite de Ouargla.

**[18].N, Bellel** :« Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur»; thèse de magistère; Université de Constantine ; (1989).

[19] .H, Abdi ; N, Ait Messaoudene. «Etude expérimentale et théorique des performances de deux capteurs plans à contact direct eau plaque d'absorption,» Revue des Energies Renouvelables, Chemss, p 53-60. (2000).

[20]. Sotehi Oulid «étude et analyse de l'influence de l'écart de température ( absorbeur - vitre) sur l'efficacité d'un capteur solaire.»:Magister Université Mentouri de Constantine 2007

[21]. Paulin Gallet et all « Physique des convertisseurs héliothermiques » EDISUD 1980.

[22]. D.yogi goswami, frank kreith, jan f.kreider «principe of solar engineering»:, second edition

[23]. O. Ketfi , M. Merzouk , N. Kasbadji Merzouk , S. Elmetenani et D. Lafri «Etude expérimentale d'un capteur solaire plan muni d'un collecteur sous forme de serpentin», Revue des Energies Renouvelables Vol. 17 N°4 (2014).