

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



Ministre de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-  
TLEMCEM FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de Fin d'études pour l'Obtention du Diplôme

de Master en Génie Mécanique  
Option : Génie Energétique

Thème

# Amélioration le rendement des capteurs solaires plans à eau par qualité des matériaux

Présenté par :

M<sup>r</sup> Bouziane Housseyn

M<sup>r</sup> Chalabi M<sup>ed</sup> Réda

Le 05/10/2013 soutenu devant la commission d'examen composé de :

Président : M<sup>r</sup> A.ZINAI Université de Tlemcen

Encadreur : M<sup>me</sup> L.BENSEDDIK Université de Tlemcen

Examineurs : M<sup>r</sup> H.GUENIFED Université de Tlemcen

M<sup>r</sup> O.SEBBANE

Université de Tlemcen

Année Universitaire 2013-2014

## *Résumé*

Le présent travail a pour but principal de déterminer la qualité de matériau des différents composants des capteurs solaires plans à eau sur leurs performances.

Il se présente en trois parties :

La première, énonce quelques principes sur le rayonnement solaire, elle décrit en outre les différentes caractéristiques d'un capteur solaire plan.

La deuxième partie, introduit les équations de bases permettant de calculer le rendement instantané et les pertes thermiques.

La dernière partie, englobe les interprétations sur les résultats obtenus.

## *Abstract*

The present work have for object principle the matériel quality of differntcomponents as a solar collecter plan to water on his performances thermal.

This study himself presents in three parts :

The first states some priciples on the solar radiation, it describes in addition the different characteristics of solar collector plan.

The second part introduces equations of basis allowing to calculate the instantaneous output and thermal losses.

The last part, includes interpretation of results get through.

## *ملخص*

الهدف الأساسي من هذه الدراسة هو ملاحظة تأثير اختلاف نوعية المواد المكونة للملتقطات الشمسية المسطحة المائية على قدرتها الحرارية و من اجل هذا قمنا بدراسة نظرية قياسية.

هذا العمل ينقسم إلى ثلاثة أجزاء هي

الجزء الأول يتضمن شرح مدقق عن الإشعاعات الشمسية كذلك وصف للمكونات و الخصائص الأساسية للملتقطات الشمسية المسطحة المائية

الجزء الثاني عرض مدقق عن مختلف المعادلات التي تسمح بحساب مردود الملتقط الشمسي المسطح المائي و كذا الطاقة الضائعة

الجزء الأخير يتضمن النتائج النظرية والتعليق عليها

# *Dédicace*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*Qui me sont très chers au monde mes parents pour leurs*

*soutiens durant toutes mes années d'études :*

***MUSTAPHA-FATIHA***

*Ma belle femme : B.ASMAA & son frère MOHAMMED*

*ISMAIL ; qui m'ont soutenu jusqu'à la dernière minute et*

*qui m'ont poussé pour le terminer.*

*Ma grande sœur : AMINA & son mari T. KRIMO*

*Ma petite sœur : ASMAA*

*Mon frère : AZIZOU*

*Mes amis surtout : MOHAMMED, NOUR ADDINE,*

***LEHCENNE, B.RACHID***

***HOUSSEYN***

# *Dédicace*

*J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail à :*

*Qui me sont très chères au monde mes parents pour leurs*

*soutiens durant toutes mes années d'études :*

**MOHAMMED-FATIMA**

*Ma sœur & son marie*

*Ma petite sœur : **MEREIMME***

*Mon frère : **LAKHDAR***

*Mes amis surtout : **BOUMADIANE, B.LEARBI***

**MOHAMMED REDA**

# Remerciements

*Nous remercions vivement et chaleureusement et à exprimer nos profonde reconnaissance à nos professeurs et cadres de l'université ainsi qu'à toute les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce travail, plus particulièrement :*

*Mme **L.BENSEDDIK** notre encadreur, pour son inestimable aide et ses précieux conseils qui nous ont permis de surmonter beaucoup de difficultés.*

*Mr **A.ZINAI**, pour l'honneur qu'il nous a fait pour présider le jury.*

*Mr **H.GUENIFED**, Mr **O.SEBBANE**, pour l'honneur qu'ils nous ont fait en examinant notre mémoire.*

*Enfin, toutes nos sympathies et nos reconnaissances vont à ceux et celles qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce modeste projet, qu'ils trouvent toutes nos estime et nos vifs remerciements.*

---



---

**SOMMAIRE**
**INTRODUCTION GENERALE :**

<b>CHAPITRE I : Gisement Solaire :</b> .....	(3)
Introduction :.....	(3)
1. Soleil :.....	(3)
2. Energie solaire :.....	(5)
2.1. Origine :.....	(5)
2.2. Caractères particuliers :.....	(6)
2.3. Captation :.....	(6)
3. le rayonnement solaire :.....	(7)
3.1. Rayonnement direct :.....	(8)
3.2. Le rayonnement solaire diffus :.....	(9)
3.3. Le rayonnement global :.....	(9)
4. Rappel astronomique :.....	(10)
4.1. Le mouvement de la terre autre du soleil [13] :.....	(10)
4.2. Repérage de la position du soleil :.....	(10)
4.2.1. Le système équatorial :.....	(10)
a. La déclinaison du soleil( $\delta$ ) :.....	(10)
b. L'angle horaire ( $w$ ) :.....	(11)
4.2.2. Système horizontal :.....	(11)
a. L'azimut du soleil( $a$ ) :.....	(11)
b. La hauteur du soleil ( $h$ ) :.....	(12)
c. L'angle d'incidence ( $\theta$ ) :.....	(12)
d. L'angle de réfraction ( $\theta_r$ ) :.....	(13)
5. Temps solaire :.....	(13)
6. Transfert thermique :.....	(14)
6.1. Généralités : .....	(14)
6.2. Différents modes de transfert de chaleur :.....	(14)
6.2.1. Conduction thermique [16] :.....	(14)
6.2.2. Convection [16] :.....	(15)

6.2.3. Rayonnement [16] :.....	(17)
7. Notation d'albédo [17]:.....	(18)
 <b>CHAPITRE II : Description Des Capteurs Solaires</b> .....	 (19)
 <b>A Conservation Thermique</b>	
Introduction :.....	(19)
1. Les différents types des capteurs solaires :.....	(19)
1.1. Les panneaux solaires thermiques :.....	(19)
1.1.1. Les capteurs à eau :.....	(20)
a. Les capteurs non vitrés :.....	(21)
b. Les capteurs plants vitrés : .....	(21)
c. Les capteurs sous vides :.....	(22)
1.1.2. Les capteurs à air :.....	(22)
1.2. Les panneaux solaires photovoltaïques :.....	(23)
2. Les différents composants d'un capteur solaire plan:.....	(23)
2.1. Partie avant (Couverture) : .....	(23)
a. Les différents types des couvertures :.....	(24)
b. Le nombre de vitrage :.....	(25)
2.2. Partie absorbante (Absorbeur) :.....	(26)
2.3. Partie arrière (Isolant) :.....	(26)
2.3.1. Isolants minéraux :.....	(27)
2.3.2. isolants végétaux :.....	(27)
2.3.3. Isolants organiques de synthèse :.....	(27)
2.3.4. Isolant transparent (Aérogel de silice) :.....	(28)
a. Préparation de l'aérogel de silice :.....	(28)
b. Propriété générale du matériau :.....	(28)
2.4. Le fluide caloporteur.....	(28)
3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan :.....	(29)
4. Les différents paramètres influant sur le rendement .....	(30)
du capteur solaire plan :	
a. Les paramètres externes:.....	(30)

b. Les paramètres internes:.....	(30)
5. Paramètres de position :.....	(30)
6. Paramètres géométriques:.....	(31)
7. Les différents modes de transfert thermique dans un capteur solaire :...	(31)
8. Les applications des capteurs solaires plans :.....	(32)
<b>CHAPITRE III : Bilan Énergétique.....</b>	<b>(34)</b>
Introduction :.....	(35)
1. Comportement du rayonnement dans un corps :.....	(35)
2. Réflexion des radiations :.....	(35)
3. Coefficient de transmission de vitre( $\tau$ ) :.....	(36)
4. Effet des réflexions multiples : .....	(37)
5. Flux global reçu sur un plan horizontal :.....	(37)
6. Flux global reçu sur un plan incliné :.....	(38)
7. Calcul du produit transmissivité-absorption global ( $\tau_a$ ):.....	(39)
8. Bilan énergétique:.....	(40)
8.1. Rendement instantané du capteur :.....	(41)
8.2. Rendement journalier du capteur :.....	(41)
8.3. Rendement optique du capteur :.....	(42)
8.4. La puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur :.....	(42)
8.5. Température de sortie du fluide caloporteur ( $T_{fs}$ ) :.....	(44)
8.6. Facteur de conductance du capteur ( $F_R$ ) :.....	(45)
8.7. Température moyenne du fluide caloporteur ( $T_{fm}$ ) :.....	(45)
8.8. Température moyenne de l'absorbeur ( $T_{pm}$ ) :.....	(45)
8.9. Evaluation des pertes thermiques :.....	(46)
A. Coefficient de pertes vers l'avant :.....	(47)
B. Coefficient des pertes vers l'arrière ( $U_{ar}$ ) :.....	(49)
C. Coefficient des pertes vers les cotés ( $U_{lat}$ ) :.....	(50)
9. Concept de coefficient des pertes vers l'avant.....	(50)
d'un capteur en aérogel de silice :	
9.1. Le coefficient de pertes par l'avant du capteur en aérogel de silice :..	(50)



<b>CHAPITRE IV : Résultats et Analyses .....</b>	<b>(52)</b>
Introduction :.....	(53)
1. Les standards destinés aux tests des capteurs solaires :.....	(53)
2. Caractéristiques des capteurs plans ont étudié .....	(55)
3. Interprétation des résultats :.....	(67)
<b>Conclusion Générale :.....</b>	<b>(79)</b>
Bibliographie	

*Liste Des Figures*

<b>Figure I.1:</b> Structure du soleil.....	(5)
<b>Figure I.2:</b> Variation mensuelle de la constante solaire.....	(8)
<b>Figure I.3:</b> Mouvements de la terre.....	(10)
<b>Figure I.4 :</b> Variation annuelle de la déclinaison solaire.....	(11)
<b>Figure I.5 :</b> Les coordonnées célestes horizontales.....	(12)
<b>Figure I.6 :</b> angle d'incidence ( $\theta_i$ )et angle de réfraction ( $\theta_r$ ).....	(13)
<b>Figure I.7 :</b> Loi de Fourier et transfert de chaleur conductif .....	(15)
<b>Figure I.8 :</b> Loi de Newton et transfert de chaleur convectif .....	(16)
<b>Figure II.1 :</b> schéma de type des capteurs .....	(21)
<b>Figure II.2 :</b> Un panneau solaire thermique .....	(22)
<b>Figure II.3:</b> Capteur solaire à eau .....	(22)
<b>Figure II.4 :</b> capteur non vitré .....	(23)
<b>Figure II.5 :</b> capteur plan vitré .....	(23)
<b>Figure II.6 :</b> capteur sous vide .....	(24)
<b>Figure II.7 :</b> Capteur à air .....	(24)
<b>Figure II.8 :</b> Un panneau photovoltaïque .....	(25)
<b>Figure II.9 :</b> les composants de capteur solaire .....	(25)
<b>Figure II.10 :</b> Les rayonnements incidents .....	(26)
<b>Figure II.11 :</b> Le nombre de vitres.....	(28)
<b>Figure II.12 :</b> schéma de classification du type des capteurs .....	(31)
<b>Figure II.13 :</b> schéma de fonctionnement d'un capteur .....	(32)
<b>Figure II.14:</b> chauffage de piscines .....	(33)
<b>Figure II.15:</b> Plancher solaire .....	(33)

*Liste Des Figures*

<b>Figure III.1</b> : schéma des réflexions des rayonnements.....	(39)
<b>Figure III.2</b> :bilan énergétique .....	(42)
<b>Figure III.3</b> : schéma de sens de fluide .....	(46)
<b>Figure III.4</b> : schéma électrique équivalent des échanges thermiques...	(49)

*Liste des tableaux*

<b>Tableau I.1</b> : Caractéristique du soleil.....	(4)
<b>Tableau I.2</b> : Valeur des coefficients du trouble atmosphérique .....	(8)
<b>Tableau I.3</b> : Variation de la pression atmosphère avec l'altitude.....	(9)
<b>Tableau I.4</b> : Ordres de grandeur de la conductivité thermique à 20°C.	(15)
<b>Tableau I.5</b> : Ordre de grandeur de coefficient h .....	(17)
<b>Tableau I.6</b> : ordres de grandeurs d'émissivité.....	(18)
<b>Tableau II.1</b> : l'émissivité de certains matériaux .....	(28)
<b>Tableau II.2</b> : Conductibilité de certains matériaux .....	(29)
<b>Tableau IV.1</b> : Performance d'un capteur solaire plan avec .....	(58)
un couvercle en verre blanc	
<b>Tableau IV.2</b> : Performances d'un capteur solaire plan avec.....	(58)
un couvercle en plastique	
<b>Tableau IV.3</b> : Performance d'un capteur solaire plan.....	(58)
sans couvercle	
<b>Tableau IV.4</b> : Performances d'un capteur solaire plan .....	(59)
simple vitrage	
<b>Tableau IV.5</b> : Performance d'un capteur solaire plan .....	(59)
double vitrage	
<b>Tableau IV.6</b> : Performance d'un capteur solaire plan avec .....	(59)
un absorbeur en acier	
<b>Tableau IV.7</b> : Performances d'un capteur solaire plan .....	(60)
à absorbeur sélectif	

<b>Tableau IV.8:</b> Performances d'un capteur solaire plan avec.....	(60)
un absorbeur en aluminium	
<b>Tableau IV.9:</b> Performance d'un capteur solaire plan avec.....	(60)
un absorbeur en cuivre	
<b>Tableau IV.10:</b> Performance d'un capteur solaire plan.....	(61)
avec isolant en sciure de bois	
<b>Tableau IV.11:</b> Performances d'un capteur solaire plan avec.....	(61)
un isolant en fibre de verre	
<b>Tableau IV.12:</b> Performance d'un capteur solaire plan avec .....	(61)
un isolant en mousse de polyuréthane	
<b>Tableau IV.13:</b> Performance d'un capteur solaire plan .....	(62)
en aérogel de silice	
<b>Tableau IV.14:</b> Performance d'un capteur solaire plan .....	(62)
<b>Tableau IV.15:</b> Performance d'un capteur solaire plan .....	(62)

**Symboles :**

i :	inclinaison du capteur [°]	
w :	L'angle horaire [°]	
a :	L'azimut du soleil [°]	
h :	La hauteur du soleil [°]	
T <sub>s</sub> :	Temps solaire	[h]
T <sub>L</sub> :	temps légal[h]	
L <sub>réf</sub> :	longitude de référence	[°]
L <sub>lieu</sub> :	longitude du lieu [°]	
C :	correction sur le temps légal	
E :	l'équation du temps	
n :	quantième jour de l'année	
m :	indice de réfraction	
I <sub>c</sub> :	Le flux incidence sur la surface du capteur[w/m.k]	
A :	coefficient de trouble caractérisant le sol ou bien le coefficient d'extinction	
B :	l'intensité de l'éclairement hors atmosphère	
C :	Coefficient de distance terre-soleil	
K <sub>e</sub> :	coefficient d'extinction [m <sup>-1</sup> ]	
h <sub>i</sub> :	Coefficient de convection fluide-tube [w/m <sup>2</sup> .k]	
T <sub>p</sub> :	Température de la plaque absorbante	[°C]
T <sub>a</sub> :	Température ambiante	[°C]
T <sub>fe</sub> :	Température d'entrée du fluide caloporteur[°C]	
T <sub>fs</sub> :	Température de sortie du fluide caloporteur[°C]	
T <sub>fm</sub> :	Température moyenne du fluide caloporteur[°C]	
T <sub>Pm</sub> :	Température moyenne de l'absorbeur[°C]	
Q <sub>u</sub> :	énergie utile extraite de l'absorbeur par le fluide caloporteur	[W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>p</sub> :	énergie perdue par le capteur vers l'environnement	[W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>t</sub> :	Puissance thermique transmise directement par la paroi externe [W/m <sup>2</sup> ]	
Q <sub>b</sub> :	Puissance thermique transmise à travers l'ailette jusqu'à la paroi externe du tube.	[W/m <sup>2</sup> ]
Q <sub>s</sub> :	Puissance stockée sous forme de chaleur	[W/m <sup>2</sup> ]
U <sub>L</sub> :	Coefficient global des pertes	[w/m <sup>2</sup> .k]

$U_{lat}$	: Coefficient des pertes vers les côtés [w/m <sup>2</sup> .k]	
$U_{ar}$	: Coefficient des pertes vers l'arrière [w/m <sup>2</sup> .k]	
$U_{av}$	: Coefficient des pertes vers l'avant	[w/m <sup>2</sup> .k]
$L$	: épaisseur de la vitre [m]	
$A_c$	: Surface de captation [m <sup>2</sup> ]	
$F_a$	: Le rendement de l'ailette [%]	
$E$	: Épaisseur de l'absorbeur	[m]
$d_e$	: Diamètre extérieur du tube [m]	
$d_i$	: diamètre intérieur du tube	[m]
$L_T$	: Longueur des tubes	[m]
$dh$	: Epaisseur de la lame d'air [m]	
$N_v$	: Nombre de vitrage	
$e_1$	: Épaisseur de l'isolant arrière	[m]
$e_2$	: Épaisseur de l'isolant sur les côtés du capteur	[m]
$A_e$	: Aire latérale du capteur [m <sup>2</sup> ]	
$K_a$	: Conductivité de la lame d'air	[w/m <sup>2</sup> .k]
$R_b$	: résistance thermique de la soudure	[m.k/w]
$C_p$	: capacité calorifique de fluide caloporteur	[j/kg.°k]
$K'$	: Conductivité thermique de l'eau	[w/m.°C]
$K$	: conducteur de l'isolant	[w/m.°C]
$K_2$	: Conductivité thermique de l'isolant latéral	[w/m.°C]
$R_a$	: le nombre de Rayleigh	
$G_r$	: Nombre de Grashoff	
$Re$	: Nombre de Reynold	
$Pr$	: Nombre de Prandlt	
$N_u$	: Nombre de Nusselt	
$F_R$	: Facteur de conductance du capteur	
$f$	: coefficient des pertes tenant compte de l'effet du vent [w/m <sup>2</sup> .k]	
$h_w$	: coefficient de transfert thermique du au vent [w/m <sup>2</sup> .k]	
$V_v$	: vitesse du vent [m/s]	

**Symboles grecs**

$\theta_r$ : Angle de réfraction[°]	
$\theta_i$ : Angle d'incidence	[°]
$\alpha$ : angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan [°]	
$\delta$ :La déclinaison du soleil[°]	
$\tau$ : coefficient de transmission	
$\alpha$ : coefficient d'absorption	
$\varepsilon$ : Coefficient d'émissivité entre deux plaques parallèles.	
$\rho$ :coefficient de réflexion	
$\varepsilon_g$ : Emitance du verre	
$\nu$ : viscosité cinématique de fluide caloporteur[m <sup>2</sup> /s]	
$\lambda$ : Conductivité de l'absorbeur [w/m.°C]	
$\varepsilon_p$ : Emitance de l'absorbeur	
$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzmann[w/m <sup>2</sup> .k <sup>4</sup> ]	
$\eta_i$ :Rendement instantané du capteur	[%]
$\eta_o$ :Rendement optique du capteur	[%]





Depuis la révolution industrielle au XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité.

En effet, l'exploitation massive des énergies conventionnelles ne cesse de s'accroître, durant le XX<sup>ème</sup>, la consommation d'énergie est multipliée par 10 avec une accélération à partir de 1945, ce qui a pour effet l'épuisement des ressources traditionnelles en matière d'énergie.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres.

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.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes.

Les capteurs solaires plans transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des grains ou du bois, le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire.

L'objectif principal étant de collecter le maximum d'énergie solaire à un coût minimum.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan.

Dans ce sens, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des capteurs solaires plans et ayant surtout pour but l'amélioration de son rendement instantané qui est la performance la plus significative. Le rendement instantané du capteur varie avec la géométrie du capteur, l'ensoleillement et les conditions extérieures. Une fois le capteur construit et installé, sa géométrie est fixe, et il ne dépendra que des paramètres externes.

### ***Objectif***

L'objectif de ce travail est l'étude de la qualité de matériau des différents composants des capteurs solaires plans à eau sur leur performance du rendement instantané du capteur solaire plan.

A cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale et des recommandations.

### *Organisation de travail*

Le présent mémoire comporte quatre chapitres :

Après cette brève introduction, nous abordons dans le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.

Le deuxième chapitre présente un bref aperçu sur les différents types de capteurs solaires thermiques, ses classifications, son fonctionnement, ainsi que les différentes caractéristiques, catégories et applications d'un capteur plan.

Le troisième chapitre présente les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système solaire, le rôle des différents coefficients intervenant dans ce système d'équations (étude théorique).

Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

Finalement, ce mémoire sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

**Introduction :**

Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en [1] :

Ressources fossiles et fissiles non renouvelables qui sont accumulées dans l'écorce terrestre au cours des ères géologiques, du fait des processus biologiques ou physico-chimiques.

Ressources renouvelables qui trouvent leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre qui sont :

- Le rayonnement solaire qui fournit 99,97% de sa densité thermique
- La chaleur interne terrestre qui fournit 0,03% de sa densité thermique
- Le travail des forces de gravitation.

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. Soleil :**

Le soleil est une étoile, le seul du système solaire est plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 minutes à nous atteindre. La plus proche après elle est Proxima Centauri, située à 4,2 années lumière du soleil, donc la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile assurant la vie sur terre [1].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur la terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux.

**Présentation générale :**

Le soleil est déformé, pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chaude qui se compose de 80% d'hydrogène et 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [1][2].

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99,9% de la masse de système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil [2].

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

**Tableau I.1** : Caractéristique du soleil.

Diamètre Equatorial (Km)	1392530
Circonférence (Km)	4372544
Surface(Km)	$6,09 \cdot 10^{12}$
Masse(Kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Volume(Km <sup>3</sup> )	$1,41 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne(Kg/m <sup>3</sup> )	1408
Distance par rapport à la terre (Km)	149598000

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

- Le noyau contient 40% de la masse de soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \cdot 10^4$  Km, elle présente les caractéristiques suivantes [3][4] :
  - Une température de  $15 \cdot 10^6$ °C.
  - Une densité de  $1015 \text{ kg/m}^3$ .
  - Une pression de 109 atm.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [4][5] :
  - Une épaisseur de 244160 Km.
  - Une température varie de  $10 \cdot 10^6$ °C à  $50 \cdot 10^4$ °C.
- La zone de convection connue où la chaleur produite se propage par convection turbulente elle présente [3][4]:
  - Une Température comprise entre 5000 à 6400°°C.
  - Une épaisseur à l'ordre de  $199758$  Km.
- La photosphère est une couche de gaz qui 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 ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [6] :
  - La température de surface décroît de 6400°°C à 4500°°C.
  - Une épaisseur de 500 Km.
  - Une pression de 1/100 atm.

- La chromosphère est la base atmosphère de soleil. C'est une fine couche rose de gaz, transparente pour la lumière visible. Elle n'est visible que lors d'éclipse totale de soleil, la couleur rose est due à l'émission lumineuse de l'hydrogène ionisé à la longueur d'onde  $H_{\alpha}$  (656.3nm) cette couche présente les caractéristiques suivantes[6] :
  - Une épaisseur 200Km.
  - Une température augmentée de 4200°C à 10<sup>4</sup>°C.
- La couronne solaire est la partie de l'atmosphère du soleil située au de la chromosphère qui s'étend sur plusieurs millions de Kilomètres en se diluant dans l'espace, ses caractéristique solaire[7] :
  - Elle est sans limite précise
  - La température augmente de 10<sup>6</sup>°C à 2.10<sup>6</sup>°C.

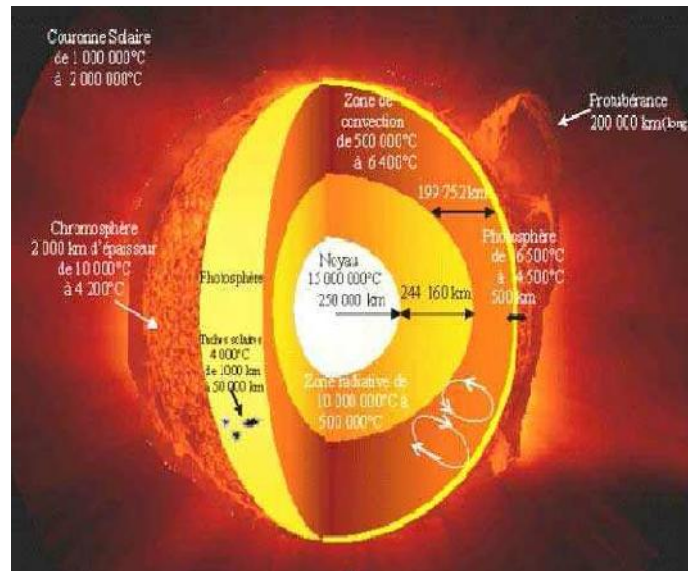


Figure I.1: Structure du soleil.

## 2. Energie solaire :

### 2.1. Origine :

Les conditions résidentes 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[1].

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  $3.7.1026 \text{ j/s}$ [1].

## 2.2. Caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [8]:

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de  $1\text{kW/m}^2$  à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol ( $1 \text{ kW/m}^2$ ) 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.

## 2.3. Captation :

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir:

### ❖ 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 [8], [9].

Trois types principaux de centrales sont utilisés [9]:

- ✓ Les centrales à capteurs cylindre-paraboliques pour atteindre des températures entre  $300$  et  $350 \text{ }^\circ\text{C}$ .

- ✓ 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 [8].

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].

**3. le rayonnement solaire :**

Le rayonnement solaire est une énergie produite par le soleil à la suite de la réaction de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur terre et exploitable pour la production d'électricité et de chaleur.

L'énergie solaire se propage dans l'espace sous la forme de « grains », ou quanta d'énergie, photons; elle est sans cesse renouvelée.

❖ **La constante solaire I:**

la constante solaire exprime la quantité d'énergie solaire que reçoit une surface de 1m<sup>2</sup> située à une distance de 1 ua (distance moyenne terre-soleil ), exposée perpendiculairement aux rayons de soleil, en l'absence d'atmosphère pour la terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère.

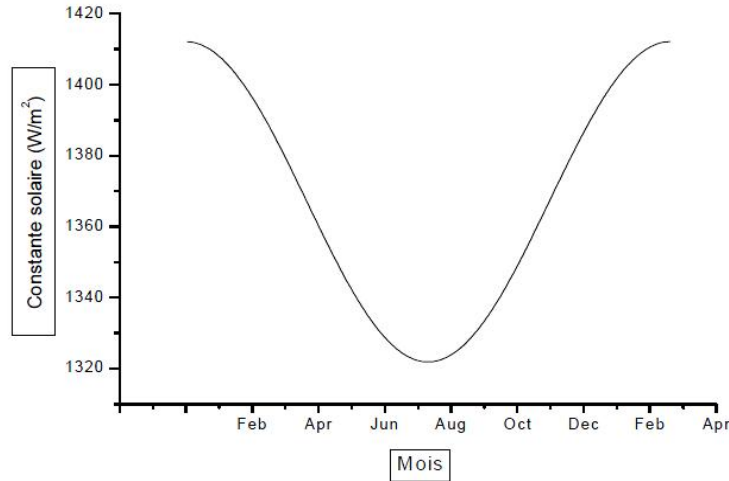
La variation de la constante solaire suit la relation suivante [4]:

$$I = I_0 + (1 + 0,033 * \cos (0,948 * n))(I.1)$$

$I_0 = 1353 \frac{W}{m^2}$  : est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [4].

n: le numéro du jour de l'année.





**Figure I.2:** Variation mensuelle de la constante solaire [4]

Le rayonnement solaire qui arrive au sol se décompose en deux parties :

- 1) - L'une produite directement du soleil (rayonnement direct).
- 2) - L'autre diffusée par l'atmosphère (rayonnement diffusée).

L'autre des rayonnements diffus et direct est appelée rayonnement global.

### 3.1. Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en présence d'un petit angle solide centré sur le disque solaire il parvient en ligne directe par temps clair [10].

L'état du ciel est défini par deux coefficients a et b qui symbolisent le trouble atmosphérique de lieu où se trouve le capteur solaire (tableau I.1).

La transmissivité totale de l'atmosphère pour le flux solaire direct est donnée par [11] :

$$\tau_{dir} = a \cdot \exp\left(-p \cdot \frac{b}{1000 \cdot \sin(h)}\right) \quad (I.2)$$

Où :

a, b : coefficient traduisant les troubles atmosphériques.

h : hauteur un soleil

p : pression atmosphérique du lieu

	Ciel pur	Condition normales	Zone industrielles
<b>a</b>	0,87	0,88	0,91
<b>b</b>	0,17	0,26	0,43

**Tableau I.2 :** Valeur des coefficients du trouble atmosphérique [12]

Le tableau(I.3) donne de la pression atmosphérique avec l'altitude.

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P(mbar)	1000	950	900	850	800	500

**Tableau I.3** : Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude[12]

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontale est donner par[6] :

$$I_{dirh} = I \cdot \tau_{dir}(I.3)$$

$I_{dir}$  : éclairement énergétique direct reçu sur un plan horizontal.

L'éclairement énergétique  $I_{dir}$  reçu sur un plan incliné est donnée par [11] :

$$I_{dir} = I_{dirh} \cdot \cos(\theta_i)(I.4)$$

$\theta_i$ : Angle d'incidence du rayon solaire

### 3.2. Le rayonnement solaire diffus :

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réflexion par le sol, il parvient de toute la voûte céleste [10].

La relation entre le coefficient de transmission de flux direct et diffus est [11] :

$$\tau_{dir} = 0,271 - 0,2939 \cdot \tau_{dif}(I.5)$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par [11] :

$$I_{difh} = I \cdot \sin(h) \cdot \tau_{dif}(I.6)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par [11] :

$$I_{dif} = I_{dif1} + I_{dif2}(I.7)$$

$$I_{dif1} = I_{difh} \cdot \frac{1 + \cos(i)}{2}(I.8)$$

$$I_{dif2} = \text{alb} \cdot \left( \frac{1 + \cos(i)}{2} \right) \cdot (I_{difh} \cdot \sin(h) + I_{difh})(I.9)$$

$I_{dif1}, I_{dif2}$ : Rayonnement diffusés sur le ciel et par le sol respectivement.

Alb : albédo du sol.

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

### 3.3. Le rayonnement global :

Le rayonnement global ( $I_{glb}$ ) est la somme des rayonnements diffus et direct[10] :

$$I_{glb} = I_{dir} + I_{dif}(I.10)$$

## 4. Rappel astronomique :

### 4.1. Le mouvement de la terre autour du soleil[13] :

La connaissance des mouvements relatifs à la terre et au soleil est nécessaire pour connaître le flux solaire reçu sur la surface de la terre en un milieu quelconque de la journée ou de l'année

- La terre tourne autour du soleil en 365j 5h .46s (année tropique ou équinoxiale).
- La terre obéit à deux mouvements :
  - 1) un mouvement de rotation autour d'un axe passe par les pôles mobiles par rapport à un système extérieur. la période de rotation de la terre autour de cet axe définit la durée du jour.
  - 2) Un mouvement de rotation autour du soleil, d'autre part le plan équatorial garde toujours la même direction, il est incliné de  $23^{\circ}27'$  par rapport au plan de l'écliptique.

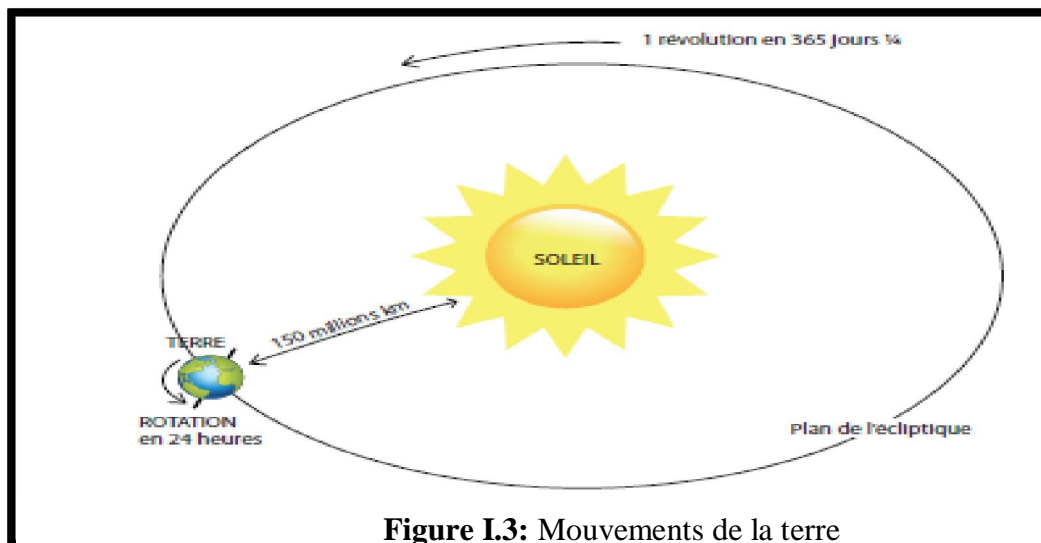


Figure I.3: Mouvements de la terre

## 4.2. Repérage de la position du soleil :

### 4.2.1. Le système équatorial :

Dans le système équatorial direction du soleil, on utilise deux angles.

#### a. La déclinaison du soleil( $\delta$ ) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan équatorial, elle varie autour de l'année entre  $(-23^{\circ}27')$  et  $(+23^{\circ}27')$  ; donc elle est maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), Donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23,45. \sin \left( 360. \left( \frac{284+n}{365} \right) \right) \quad (I.11)$$

D'où :

n : quantième jour de l'année  $1 \leq n \leq 365$ .

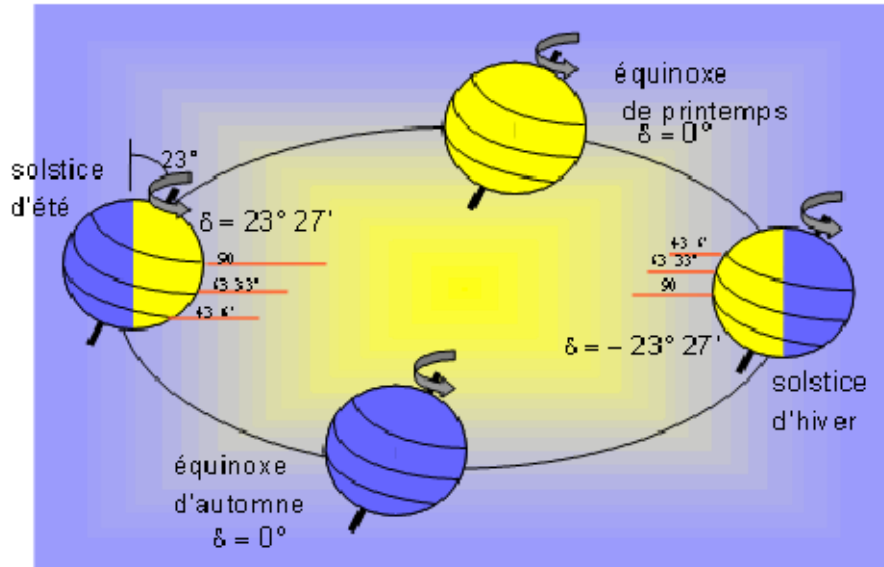


Figure I.4 : Variation annuelle de la déclinaison solaire

**b. L'angle horaire (w) :**

Il représente le déplacement angulaire du soleil à l'est à ouest du méridien local du à la rotation de la terre autour de son axe par 15° par heure(15°/h) :

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

Autre définition : l'angle horaire c'est l'angle formé par la plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu, son expression est [14] :

$$w = \frac{360}{24} (T_{sv} - 12) \quad (I.12)$$

Où  $T_{sv}$ : temps solaire vrai Donne en heurs.

**4.2.2. Système horizontal :**

**a. L'azimut du soleil(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.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(w)}{\cos(h)} \quad (I.13)$$

- ✓ positif quand le soleil est à l'ouest.
- ✓ Négatif quand le soleil est à l'est.

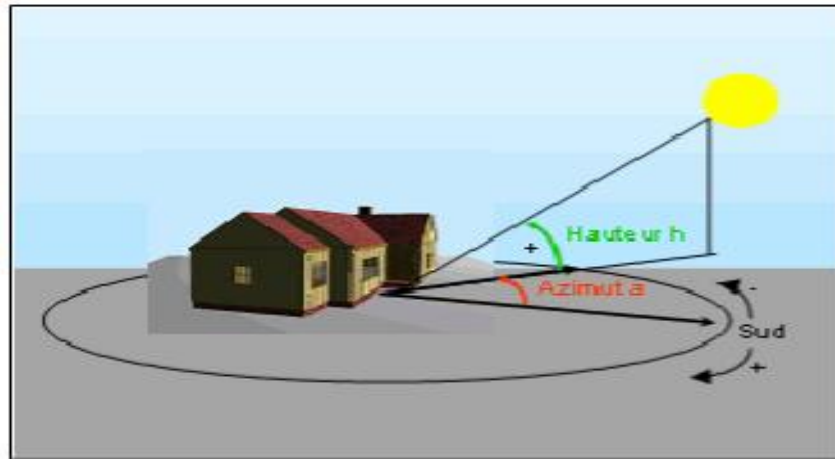


Figure I.5 :Les coordonnées célestes horizontales

**b. La hauteur du soleil (h) :**

La hauteur solaire est l'angle entre la droite joignant le centre du disque solaire au point d'observation et le plan horizontal passant par le point d'observation.

$$\sinh = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos w \quad (I.14)$$

On définit aussi l'angle zénithal noté ( $\theta_z$ ) qui est l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale du lieu.

$$\theta_z = 90 - h \quad (I.15)$$

**c. L'angle d'incidence ( $\theta$ ) :**

L'angle d'incidence représente l'angle compris entre le plan du capteur et la radiation solaire.

$\theta$ : est exprimé par :

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin L \cdot \cos i - \sin \delta \cdot \cos L \cdot \sin i \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos i \cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin L \cdot \sin i \cdot \cos \gamma \cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin i \cdot \sin \gamma \cdot \sin \omega \quad (I.16)$$

i: inclinaison du capteur

$\alpha$  : angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan

**d. L'angle de réfraction( $\theta_r$ ) :**

C'est l'angle que fait le rayonnement traversant le capteur solaire (vitre, plaque,...etc.) avec la normale du plan. On peut calculer sa valeur d'après la Loi de Snell :

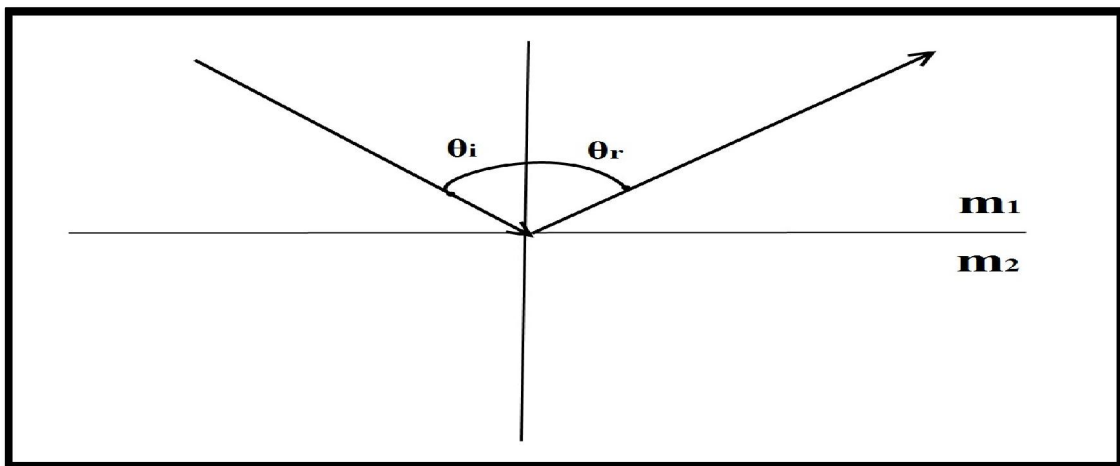
$$\frac{\sin\theta_2}{\sin\theta_1} = \frac{m_1}{m_2} \quad (\text{I.17})$$

Avec :

$\theta_1$  : angle d'incidence du rayonnement

$\theta_2$  : angle d'incidence de réfraction

$m$  : indice de réfraction ( $m_{\text{air}}=1, m_{\text{verre}}=1.5$ ).



**Figure I.6 :** angle d'incidence ( $\theta_i$ ) et angle de réfraction ( $\theta_r$ )

**5. Temps solaire :**

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 [15] :

$$T_s = T_l - 4(L_{\text{rég}} + L_{\text{lieu}}) + E + C_T \quad (\text{I.18})$$

Où :

$T_s$  : Temps solaire

$T_L$  : temps l'égal (l'horloge), comme en Algérie :  $T_L = \text{GMT}(\text{Gerenuiechmean time}) + 1$

$L_{\text{rég}}$  : longitude de référence. Algérie  $L_{\text{rég}}=0$

$L_{\text{lieu}}$  : longitude du lieu (ou se trouve l'observateur)

$C$  : correction sur le temps légal, pour l'Algérie ( $c=-1$ )

$E$  : l'équation du temps donnée par :

$$E = 9,87. \sin(2\beta) - 7,53. \cos(\beta) - 1,5 \sin(\beta) \quad (I.19)$$

Où :

$$\beta = \frac{360. (n - 81)}{364} \quad (I.20)$$

Avec :  $1 \leq n \leq 365$

n c'est le quantième jour de l'année.

## 6. Transfert thermique :

Dans de très nombreux sècheurs de l'industrie, on se trouve confronté à des problèmes de transfert thermique qui ont ces dernières années une importance particulière en raison de cout élevé de l'énergie et des impératifs d'économie qui en résultent.

### 6.1. Généralités :

Le transfert de chaleur est défini comme l'étude de la chaleur dans une surface qui est due à un changement de l'énergie interne entre différents éléments dans les domaines des milieux examinés, Le transfert de chaleur joue un rôle très important dans les applications industrielles et technologiques.

### 6.2. Différents modes de transfert de chaleur :

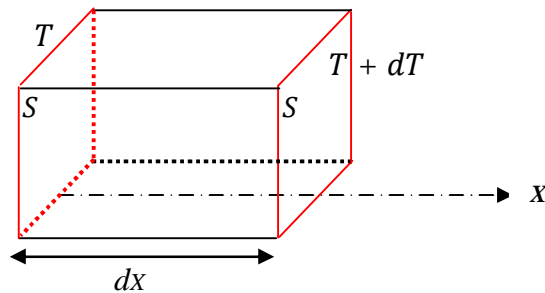
Le transfert de chaleur se produit suivant trois modes : conduction, convection et rayonnement thermique

#### 6.2.1. Conduction thermique [16] :

La conduction est le transfert d'énergie (chaleur) provoquée par des différences de température au sein d'un milieu solide ou fluide ou entre deux matériaux solides en contact sans transport macroscopique de matière. C'est un transfert d'une molécule à une autre molécule adjacente. Ce mode de transfert est le seul existant dans un solide opaque. Le milieu matériel, siège d'un phénomène de conduction de la chaleur, peut être homogène ou hétérogène, isotrope ou anisotrope.

#### ❖ La loi de Fourier (1822) :

Décompose dans un solide homogène et isotrope deux sections planes de surface S, parallèles, distance dx et perpendiculaire à la direction de propagation de la chaleur x.



**Figure I.7 :** Loi de Fourier et transfert de chaleur conductif

$$\Phi = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (I.21)$$

Le signe (-) vient du fait que  $\frac{dT}{dx}$  est négatif. La propagation de la chaleur s'effectue dans le sens opposé au gradient de température c'est-à-dire du plus chaud vers le plus froid.

La conductivité thermique ( $\lambda$ ) du matériau traduit l'aptitude à conduire la chaleur et dépend de :

- La nature chimique du matériau.
- La nature de la phase considérée (solide, liquide et gazeux).
- La température, l'orientation des fibres ou cristaux dans les corps anisotropes (bois, plastique laminé, etc.)

**Tableau I.4 :** Ordres de grandeur de la conductivité thermique à 20 °c[16]

Milieu	$\lambda \left( \frac{W}{m \cdot K} \right)$
Gaz à la pression atmosphérique	0,006 – 0,18
Matériaux isolants	0,025 – 0,25
Liquides non métalliques	0,1 – 1
Solides non métalliques	0,025 – 3
Alliage métallique	10 – 150
Métaux purs	20 – 400

### 6.2.2. Convection[16] :

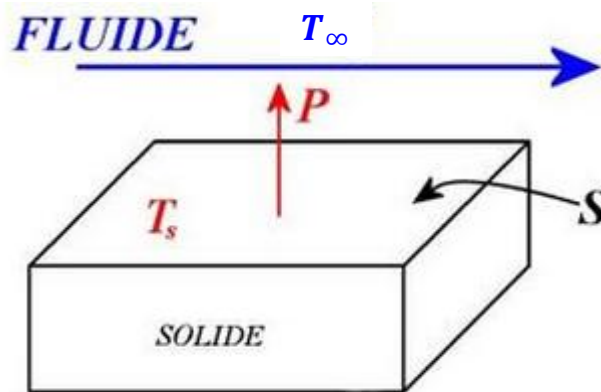
Le transfert de chaleur est provoqué par le déplacement d'un fluide, qui transporte avec lui l'énergie qu'il contient. Lorsqu'il le fluide est mis en mouvement sous le seul



effet des différences de masse volumique résultant des différences de température sur les frontières et d'un champ de forces extérieures (pesanteur), on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est dû aux différences de pression (force extérieure) telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

❖ **Loi de Newton :**

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi quelconque soit le type de convection (libre ou forcée) et quel que soit le régime de l'écoulement du fluide (laminaire ou turbulent) le flux de chaleur transmis est donné par la relation dite loi de Newton.



**Figure I.8 :** Loi de Newton et transfert de chaleur convectif

$$\Phi = h \cdot S \cdot (T_s - T_\infty) \quad (1.22)$$

Le problème majeur à résoudre avant le calcul du flux de chaleur consiste à déterminer  $h$  qui dépend de nombreux paramètres :

- Caractéristiques du fluide (Tableau I.)
- Nature de l'écoulement
- La température
- La forme de la surface d'échange, etc

**Tableau I.5** : Ordre de grandeur de coefficient h[16]

Convection	Fluide	$h \left( \frac{W}{m^2 \cdot K} \right)$
Libre	Air	5 – 25
	Eau	100 – 900
Forcée	Air	10 – 500
	Eau	100 – 15000
	Huile	50 – 2000
	Métaux fondus	6000 – 120000
	Eau bouillante	2500 – 25000
condensation	Vapeur d'eau	50000 – 100000

**6.2.3. Rayonnement[16] :**

Il a longtemps été considéré que les échanges radiatifs étaient prépondérants à hautes températures, puisqu'en effet le flux émis par une surface est proportionnel à sa température à la puissance quatrième. Cependant, même à température ambiante, les échanges radiatifs ne sont pas à négliger.

Tout corps, dont la température est supérieure à °C, émet un rayonnement électromagnétique. Une des particularités de ce rayonnement dit "thermique" est qu'il peut se propager même dans le vide. Ainsi, que le soleil qui se situe à une distance considérable dans "vide spatial" nous procure une sensation de la chaleur.

Le rayonnement thermique est caractérisé par des longueurs d'ondes comprises entre 0,1 et 100µm, il inclut le domaine visible (onde lumineuse ou lumière de 0,4 et 0,8 µm) et n'occupe qu'un faible électromagnétique.

Ainsi le filament de tungstène utilisé dans les lampes à incandescence a une couleur caractéristique de sa température. A faible température, il est rouge-orange, puis jaune puis blanc. Le pic du spectre d'émission se déplace de la limite entre l'infrarouge et le visible (rouge) vers le milieu du visible (blanc).

**❖ Loi de Stefan-Boltzmann :**

Pour l'étude de rayonnement, on définit un corps de référence appelé le corps noir (équivalant au gaz parfait en thermodynamique classique) dont on peut déterminer les propriétés. L'émittance M est la puissance émise par unité de surface sur toute la gamme de longueur d'onde (entre 0 et ∞)

Dans tout le demi-espace supérieur pour un corps noir, la loi de Stefan-Boltzmann est donnée par :

$$M = \sigma \cdot T^4 \quad (I.23)$$

T : température absolue(k) du corps considéré.

$\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann =  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{k}^4$

Matériau	Emissivité
Aluminium poli	0,05
Aluminium surface rugueuse	0,07
Aluminium très oxydé	0,25
Matériau en amiante	0,78
Brique commune	0,85
Brique vitrifiée, rugueuse	0,85
Brique réfractaire, rugueuse	0,94
Béton	0,54
Sol gelé	0,93
Verre	0,92
Verre, givré	0,96
Peinture, finition en argent	0,31
Peinture à huile, moyenne	0,94
Neige	0,8

**Tableau I.6** : ordres de grandeurs d'émissivité[16]

Le flux de chaleur échangée entre la surface et l'environnement est donné par :

$$\Phi = \sigma \cdot \varepsilon \cdot s \cdot (T_S^4 - T_{env}^4) \quad (I.24)$$

## 7. Notation d'albédo [17]:

On appelle albédo « alb » la fraction de l'énergie incidente diffusée par un corps lumineux, donc pour un corps noir parfait l'albédo est nulle, alors qu'il vaut 0,9 pour la neige fraîche 0,15 à 0,25 pour la mer en hiver.

Le rayonnement réfléchi diffus repart dans l'atmosphère qui le rediffuse à nouveau partiellement dans le sol.

## Introduction :

Le capteur solaire thermique est un élément conçu pour convertir l'énergie transportée par la radiation solaire en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physique : l'effet de serre, corps et noir :

La chaleur produit par les capteurs solaires thermique peut être utilisé pour :

- Chauffer les locaux et l'eau sanitaire.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Faire fonctionner un moteur thermique.
- Alimenter des machines réfrigérant.

Les capteurs plan peut assurer des températures de 30°C à 150°C et ne nécessite ni concentration des rayonnements incident un suivi de soleil [18].

Le niveau relativement bas de la température de capteur plan est dû à la réémission par rayonnement de récepteur et les pertes de chaleur périphérique du capteur [1].

## 1. Les différents types des capteurs solaires :

Dans le domaine énergétique nous avons deux grands types des capteurs solaires :

- Capteurs solaires thermiques
- Capteurs solaires photovoltaïques.

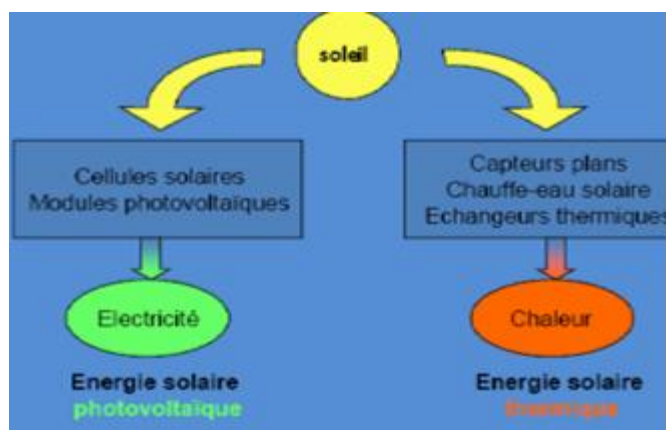


Figure II.1 :schéma de type des capteurs

### 1.1. Les panneaux solaires thermiques :

Les panneaux solaires thermiques, appelés aussi capteurs solaires thermiques, convertissent la lumière du soleil en chaleur, ils sont composés de capteurs qui absorbent la chaleur des rayons

du soleil .Ces panneaux sont souvent utilisés dans la production d'eau chaude, le chauffage des habitations, des installations domestiques.



**Figure II.2:**Un panneau solaire thermique

On peut distinguer deux types de panneaux solaires thermiques :

### 1.1.1. Les capteurs à eau :

Pour ce genre de capteurs, la chaleur est absorbée par un liquide caloporteur qui circule dans des tubes munis d'ailettes. Ce sont ces ailettes qui captent la chaleur. Ces capteurs solaires à eau sont utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire dans un chauffe-eau individuel.



**Figure II.3:**Capteur solaire à eau

Cependant, on peut aussi citer trois types de capteurs à eau :

**a. Les capteurs non vitrés :**

Le liquide caloporteur est contenu dans des tubes en plastiques, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, des plaques chauffantes et le chauffage des piscines.



**Figure II.4 :** capteur non vitré

**b. Les capteurs plans vitrés :**

Le fluide caloporteur, très souvent de l'eau mélangée à un antigel alimentaire, de type mono-propylène glycol, passe dans un serpentin plaqué en sous face d'une feuille absorbante, le tout placé derrière une vitre, dans un caisson isolé de laine minérale et/ou de mousses composites polyuréthanes; la vitre est transparente à la lumière du soleil mais opaque aux rayons infrarouges de l'intérieur, ce qui piège la chaleur



**Figure II.5 :** capteur plan vitré

c. Les capteurs sous vides :

Le fluide caloporteur circule à l'intérieur d'un tube sous vide simple ou double. Le vide améliore l'isolation contre les pertes en convection, par rapport au capteur précédent. Deux principes sont rencontrés : le premier principe est le même que pour les capteurs plans vitrés, le fluide caloporteur parcourt le tube en aller et retour pour recueillir la chaleur ; le second est plus poussé technologiquement, il fait appel à un caloduc, utilisant un second fluide caloporteur restant dans le tube (voir article détaillé, à faire dans tube sous vide).



Figure II.6 : capteur à sous vide

1.1.2. Les capteurs à air :

L'air est chauffé lorsqu'il circule dans les tubes, ce qui permet ensuite de chauffer l'habitat, le logement mais peut être aussi utilisé à des usages industriels ou agricoles.

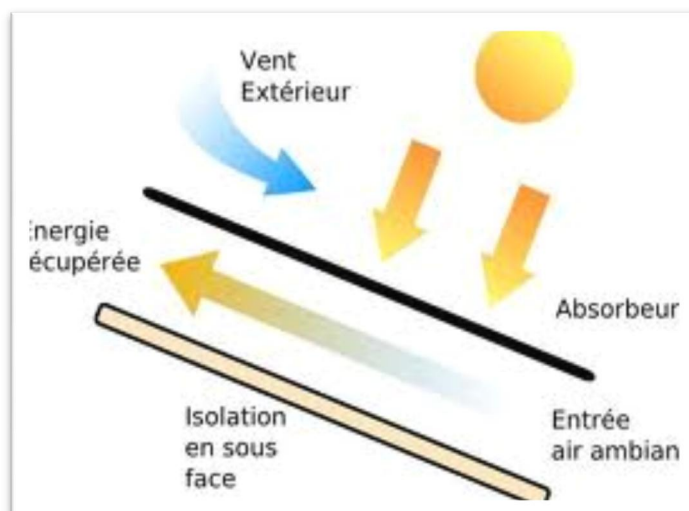


Figure II.8 : Capteur à air

### 1.2. Les panneaux solaires photovoltaïques :

Appelés aussi modules photovoltaïques, son principe de fonctionnement est de transformer la lumière produite par le soleil en électricité qui peut être directement utilisé.

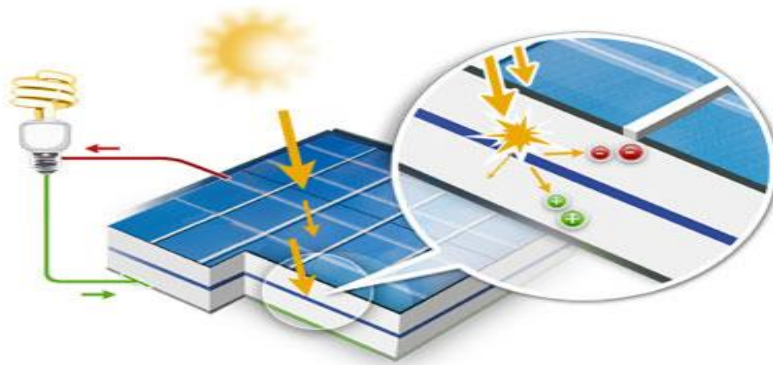


Figure II.9:Un panneau photovoltaïque

### 2. Les différents composants d'un capteur solaire plan:

Le capteur plan est une boîte constituée de trois parties principales :

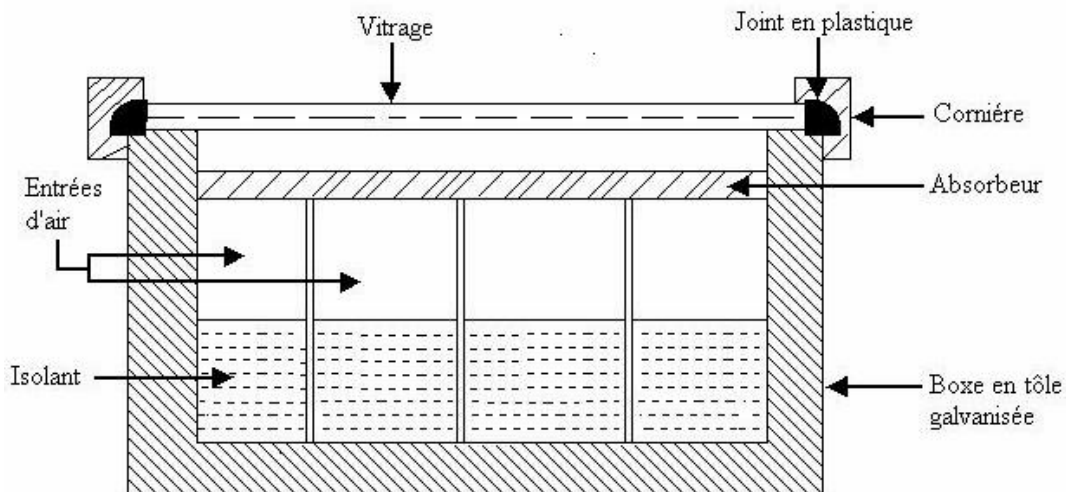


Figure II.10 : les composants de capteur solaire

#### 2.1. Partie avant (Couverture) :

L'effet de serre créé par un vitrage favorise le maintien de la chaleur au niveau du capteur et empêche une partie du rayonnement de la plaque absorbante. Le verre bloque en effet les



infrarouges même s'il laisse passer la lumière visible, l'utilisation des couvertures transparentes pour éviter le refroidissement de l'absorbeur par l'effet de vent.

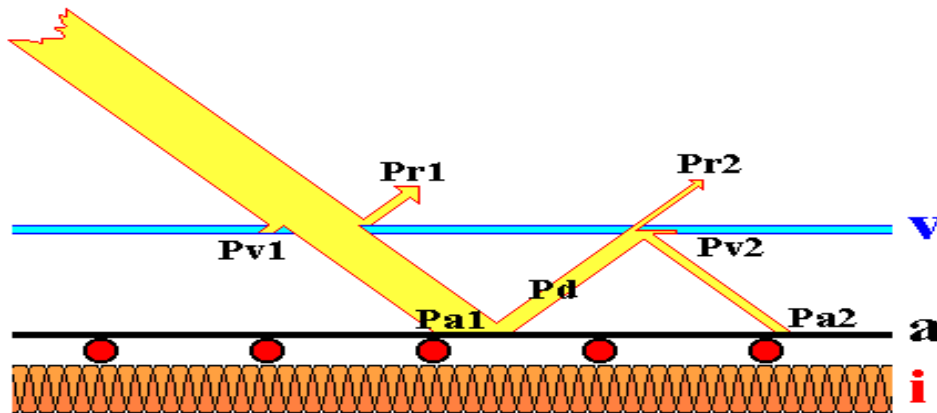


Figure II.11 : Les rayonnements incidents

Perd également la totalité de puissance émise par rayonnement de la plaque  $P_d$  sans vitrage.

En revanche, avec le vitrage,  $P_d$  est reflété par la vitre sur la plaque. On obtient ainsi  $P_{a2}$ [19].

Pour comprendre l'utilité d'un vitrage, il suffit de considérer les pertes par rayonnement de la plaque notées  $P_d$  sur le schéma ci-dessus.

C'est logique dans le cas, puisque le facteur des infrarouges émis par l'absorbeur et bloqué par le verre est prépondérant par rapport à la réflexion du verre face au rayonnement solaire, le verre étant transparent. Le rendement de l'absorbeur est alors défini comme le rapport entre la puissance reçue par le capteur et celle émise par le soleil :

$$R_{\text{rendement}} = \frac{P_{a \text{ tot}}}{P_{\text{soleil}}} \quad (\text{II.1}) \quad \text{Où} \quad P_{a \text{ tot}} = P_{a1} + P_{a2} \quad (\text{II.2})$$

Pour la réflexion de la plaque absorbante, il faut prendre en compte son rayonnement de corps noir, proportionnel à la quatrième puissance de sa température. Il va de soi que travailler à basse température augmente donc le rendement puisque cela baisse considérablement le rayonnement du corps noir, même si celui-ci est très faible[20].

#### a. Les différents types des couvertures :

Le matériau pour le vitrage doit avoir les propriétés requises pour son application. A savoir, une excellente transparence et un coefficient de réflexion proche de zéro ainsi qu'un

faible coefficient d'absorption et une isolation thermique grande. Il existe des matériaux spécifiquement adaptés à de telles applications mais ceux-ci sont la plupart du temps très onéreux. On peut citer les verres à protection contre les UV, les verres autonettoyants, double vitrage,...etc. [21]

✓ **Poly méthacrylate de méthyle (plexiglas) :**

Ce matériau peut également remplacer le verre. Il est moins fragile mais il présente l'inconvénient de ne pas supporter une température de l'ordre de 95°C, son coefficient de transmission est plus faible que celui du verre, de l'ordre de 83%.

✓ **Polycarbonate :**

Le polycarbonate a l'avantage d'avoir une double paroi reliée par des alvéoles réduisant ainsi le problème de convection entre les deux plaques transparentes.

Il transmet environ 84% du rayonnement reçu.

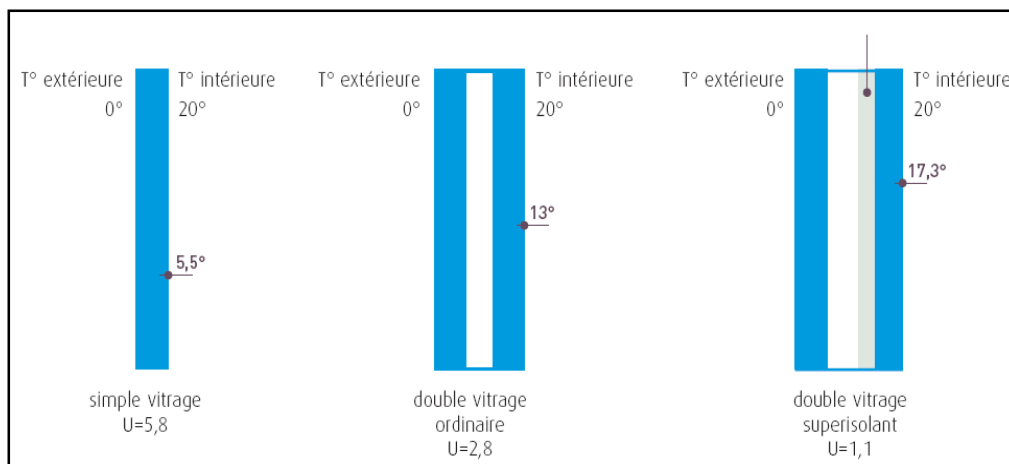
Il a également l'avantage d'avoir une solidité mécanique à toute épreuve et une facilité au découpage pour l'utilisation, il réduit également l'inertie du capteur par sa légèreté.

✓ **plastique :**

On peut voir de plastiques convenir pour un panneau solaire. Cependant, les plastiques sont beaucoup moins résistants à l'élévation de température que le verre et doivent être travaillés pour la résistance aux UV.

**b. 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 l'extérieur, en la réfléchissant vers l'intérieur sans toutefois arrêter la chaleur et le rayonnement du soleil. [22]



**Figure II.12** : Le nombre de vitres

### 2.2. Partie absorbante (Absorbeur) :

C'est au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique, et qui doit assurer les fonctions suivantes :

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie.

Matériel	Emission		
	1 $\mu\text{m}$	1-6 $\mu\text{m}$	8-14 $\mu\text{m}$
<b>Aluminium (poli)</b>	0,1-0,2	0,02-0,1	n. d.
<b>Cuivre (poli)</b>	n. d.	0,03	n. d.
<b>Laiton (poli)</b>	0,8-0,95	0,01-0,05	n. d.
<b>Tungstène</b>	n. d.	0,1-0,6	n. d.

**Tableau II.1** : l'émissivité de certains matériaux

### 2.3. Partie arrière (Isolant) :

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et conduction et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de :

## Chapitre II Description Des Capteurs Solaires A Conservation Thermique

---

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....etc.

L'isolation est d'une importance primordiale dans les applications thermiques. Dans le cas des capteurs, l'isolant est placé sous l'absorbeur, il est en général opaque au rayonnement visible et toujours opaque à l'infrarouge de grande longueur d'onde.

On distingue trois grandes familles d'isolants :

### 2.3.1. Isolants minéraux :

Les isolants minéraux souvent utilisés sont : la pierre ponce " Feldspath", la laine de verre et la vermiculite.

### 2.3.2. isolants végétaux :

Le bois sous forme de fibres agglomérées, le liège, la sciure de bois et les cendres des végétaux, sont les matériaux souvent utilisés comme isolants végétaux.

### 2.3.3. Isolants organiques de synthèse :

On cite à titre d'exemple ; la mousse de polyuréthane, la mousse de phénolique, le polystyrène expansé et le chlorure de polyvinyle qui sont les plus souvent utilisés.

Dans le tableau qui suit on trouve les valeurs de la conductibilité de certains matériaux les plus utilisés dans le domaine de transfert thermique.

Matériaux	$\lambda$ (W.m-1.°C-1)	Matériaux	$\lambda$ (W.m-1.°C-1)
Argent	419	Plâtre	0.48
Cuivre	386	Amiante	0.16
Aluminium	204	Coton	0.059
Acier doux	45	Liège	0.044 – 0.049
Acier inox	14.9	Laine de roche	0.038 – 0.041
Glace	1.88	Laine de verre	0.035 – 0.051
Béton	1.4	Polystyrène expansé	0.036 – 0.047
Bois	0.12	Polyuréthane mousse	0.030 – 0.045
Brique terre cuite	1.1	Polystyrène extrudé	0.027
Verre	0.78	Air	0.026

**Tableau II.2 :** Conductibilité de certains matériaux

### 2.3.4. Isolant transparent (Aérogel de silice) :

#### a. Préparation de l'aérogel de silice :

L'isolant transparent le plus utilisé et le plus développé est l'aérogel de silice, il est obtenu par le processus de sol-gel suivi d'un processus extraction supercritique du solvant. Brièvement, une solution colloïdale de silice, est mélangée avec l'eau, un alcool, et une combinaison de catalyseur. On assistera à deux phénomènes : l'hydrolyse et la floculation, **c'est-à-dire que la stabilité de la solution colloïde est détruite**. La manipulation est réalisée dans un autoclave de telle sorte que lors de la montée en température (28°C environ) la pression atteinte soit de l'ordre de 120 bars. L'évacuation du solvant se fait en 2 à 4 heures environ, le matériau solide basse densité, résultant est appelé aérogel de silice.

#### b. Propriété générale du matériau :

C'est un matériau solide basse densité (sa densité variant de 80 à 270 Kg/m<sup>3</sup>), transparent poreux (sa porosité variant de 35% à 98%).

- son indice de réfraction varie de 1.02 à 1.05 pour une épaisseur de matériau de l'ordre de 20mm, la transmittance solaire normale est de 90% avec une incertitude de  $\pm 2\%$ , sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02 w/m.k
- le matériau est stable jusqu'à une température de 750°C et une pression de 300 kpa. Sa fragilité et sa perméabilité vis-à-vis de l'eau nous impose la couverture en verre du capteur.

### 2.4. Le fluide caloporteur

Le fluide de travail est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée. Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants[1]:

- ✓ Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- ✓ Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- ✓ Toute fuite est sans conséquence.

## Chapitre II Description Des Capteurs Solaires A Conservation Thermique

---

✓ Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.

✓ Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

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

On peut classer les capteurs solaires plans selon l'organigramme suivant :

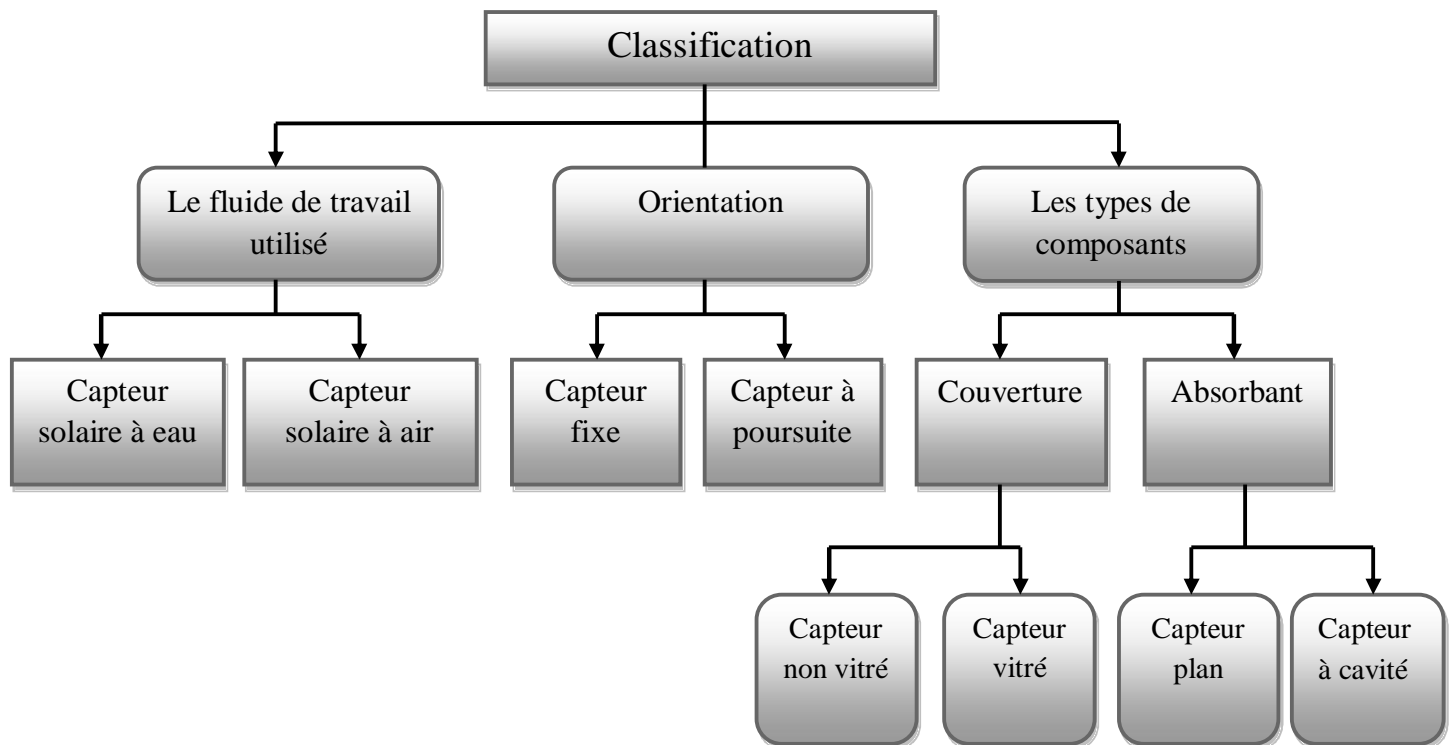


Figure II.13 :schéma de classification du type des capteurs

### 3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan :

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (figure II.2) [11]:

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbant muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui

## Chapitre II Description Des Capteurs Solaires A Conservation Thermique

circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est transmise à l'utilisateur.

Le vitrage est transparent pour le rayonnement visible et le proche I.R mais opaque pour le rayonnement I.R lointain émis par l'absorbeur, ainsi la couverture transparente crée un effet de serre.

L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement.

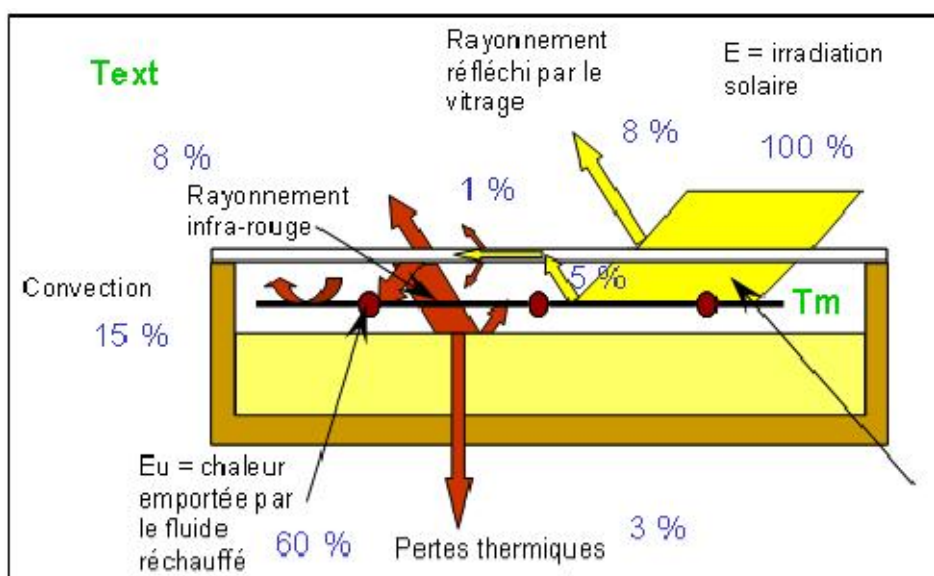


Figure II.14 : schéma de fonctionnement d'un capteur

### 4. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan :

Le rendement d'un capteur influencé par différents paramètres, on peut classer en deux catégories comme suit [3][19][11][28]:

#### a. Les paramètres externes sont :

- ✓ Paramètre d'ensoleillement : éclairage énergétique dû au rayonnement global, position du soleil, durée d'insolation.
- ✓ Température ambiante.
- ✓ Vitesse du vent.

#### b. Les paramètres internes sont :

### 5. Paramètres de position :

- ✓ inclinaison, orientation du capteur.
- ✓ capteur fixe au niveau du soleil.

### 6. Paramètres géométrique:

- ✓ Absorbeur
  - Configuration du réseau de circulation de fluide caloporteur
  - Les propriétés thermo-physique et optique
  - Dimensions des tubes, de la plaque absorbante et espacement entre les tubes.
  - Géométrie des canaux (carrée, rectangulaire, hexagonale, circulaire).
  - Température de l'absorbeur.
  - Epaisseur de la lame d'air entre l'absorbeur et la vitre.
- ✓ La surface sélective
  - Propriétés optiques
- ✓ Couverture transparente
  - Epaisseur
  - Le nombre de vitrage et la forme.
  - Propriété optique et thermo-physique.
- ✓ Isolant
  - Propriété thermo-physique et optique
- ✓ Fluide caloporteur
  - Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent)
  - Température et le débit d'entrée
  - Les propriétés thermo-physiques.

### 7. Les différents modes de transfert thermique dans un capteur solaire :

Les pertes thermiques au niveau du capteur solaire peuvent avoir lieu par l'intervention de trois modes de transfert thermique: convection, conduction et rayonnement. 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



## Chapitre II Description Des Capteurs Solaires A Conservation Thermique

---

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. Les proportions sont différentes car l'eau et l'antigel ont des propriétés différentes, et complémentaires. 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.

### **8. Les applications des capteurs solaires plans :**

Les panneaux solaires thermiques sont employés sous toutes les latitudes pour plusieurs utilisations :

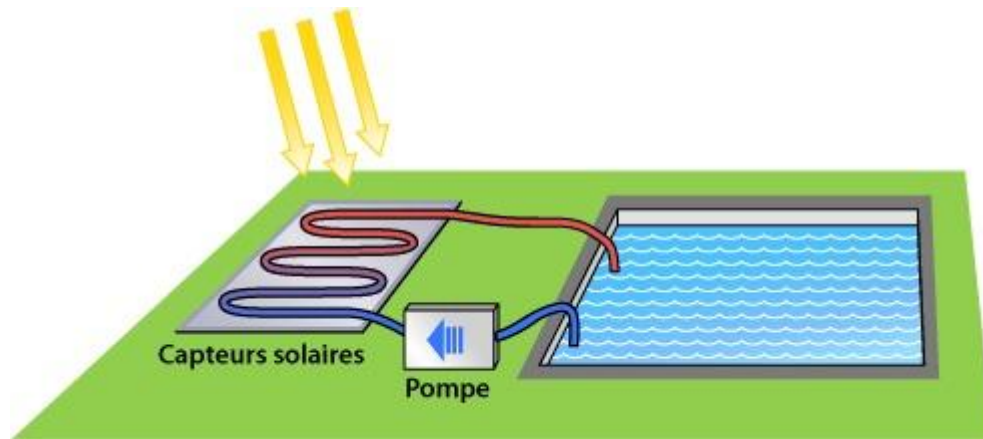
- Utilisation d'eau chaude dans les maisons,
- Plancher chauffant,
- Piscines,
- Fours solaires,
- Pasteurisation,
- Distillation des fluides.

L'énergie solaire thermique peut même être utilisée pour refroidir. Dans cette application, on utilise un processus connu sous le nom de refroidissement par évaporation. Ce système est utilisé pour refroidir les bâtiments.

## Chapitre II Description Des Capteurs Solaires A Conservation Thermique

---

Enfin, la chaleur du soleil est aussi utilisée dans la production d'électricité. Cela exige une technologie avancée, mais l'avantage est que la chaleur peut être stockée, une usine d'énergie solaire thermique fonctionne 24h sur 24. Ces installations sont généralement situées dans des zones qui reçoivent beaucoup de soleil.



**Figure II.15:** chauffage de piscines



**Figure II.16:** Plancher solaire

**Introduction :****1. Comportement du rayonnement dans un corps :**

On caractérise le comportement de chaque corps vis-à-vis du rayonnement par trois coefficients :

$$\text{-la réflectivité}(\rho) \quad \rho = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}} \quad (\text{III.1})$$

$$\text{-L'absorption}(\alpha) : \quad \alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}} \quad (\text{III.2})$$

$$\text{-La transmissivité}(\tau) \quad \tau = \frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie incidente}} \quad (\text{III.3})$$

La transmissivité, la réflexion, et l'absorption des radiations solaires par les différentes parties d'un capteur, sont importantes dans la détermination des performances d'un capteur, et ont évidemment la relation :

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (\text{III.4})$$

➤ Cas particulier :

$$\rho = 1 \quad \text{Miroir parfait}$$

$$\alpha = 1 \quad \text{Corps noir parfait}$$

$$\tau = 1 \quad \text{Transparent parfait}$$

**2. Réflexion des radiations :**

Soit  $n_1$  et  $n_2$  les indices de réfraction de deux milieux. Un rayon frappant l'interface avec un angle d'incidence  $\theta_i$ , sera partiellement réfracté, les angles d'incidence, de réflexion et de réfraction sont liés par la loi de Descartes.

$$n_1 \sin \theta_i = n_2 \cdot \sin \theta_r \quad (\text{III.5})$$

$$\theta_i = \theta_r \quad (\text{III.6})$$

La réflectivité monochromatique directionnelle hémisphérique  $\rho_\lambda$  est donnée par les formules de Fresnel, soit :

- Pour une onde polarisée parallèlement au plan d'incidence :

$$\rho_{\lambda} = \frac{tg^2(\theta_i - \theta_{\tau})}{tg^2(\theta_i + \theta_{\tau})} tg^2(\theta_i - \theta_{\tau}) \quad (\text{III.7})$$

- Pour une onde polarisée perpendiculairement au plan d'incidence :

$$\rho_{\lambda} = \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_{\tau})}{\sin^2(\theta_i + \theta_{\tau})} \quad (\text{III.8})$$

La réflectivité est donnée par :

$$\rho_{\lambda} = \frac{1}{2} [\rho_{\lambda} + \rho_{\lambda}] \quad (\text{III.9})$$

### 3. Coefficient de transmission de vitre( $\tau$ ) :

Pour ce coefficient, il faut tenir compte des pertes optiques par réflexion et absorption des radiations solaires au niveau de la vitre .Il en résulte deux coefficients de transmission, l'un du à la réflexion des rayonnements, l'autre à l'absorption.

La transmissivité totale de la vitre sera égale au produit de ces deux coefficients( $\tau_p, \tau_{\alpha}$ ).

- Coefficient de transmission du à la réflexion des rayonnements ( $\tau_p$ ) :

$$\tau_p = \frac{1}{2} \left[ \frac{1-\rho}{1+(2.N-1).\rho} + \frac{1-\rho}{1+(2.N-1).\rho} \right] \quad (\text{III.10})$$

$N$ : nombre de vitre dans le capteur.

- Coefficient de transmission du à l'absorption des rayonnements ( $\tau_{\alpha}$ ) :

$$\tau_{\alpha} = \exp\left[\frac{K_e \cdot L}{\cos\theta_{\tau}}\right] \quad (\text{III.11})$$

$K_e$  : Coefficient d'extinction

$L$  : Épaisseur de la vitre

$\theta_{\tau}$  : Angle de réfraction

- Le coefficient total de transmission de la vitre est égal à :

$$\tau = \tau_p \cdot \tau_{\alpha} \quad (\text{III.12})$$

#### 4. Effet des réflexions multiples :

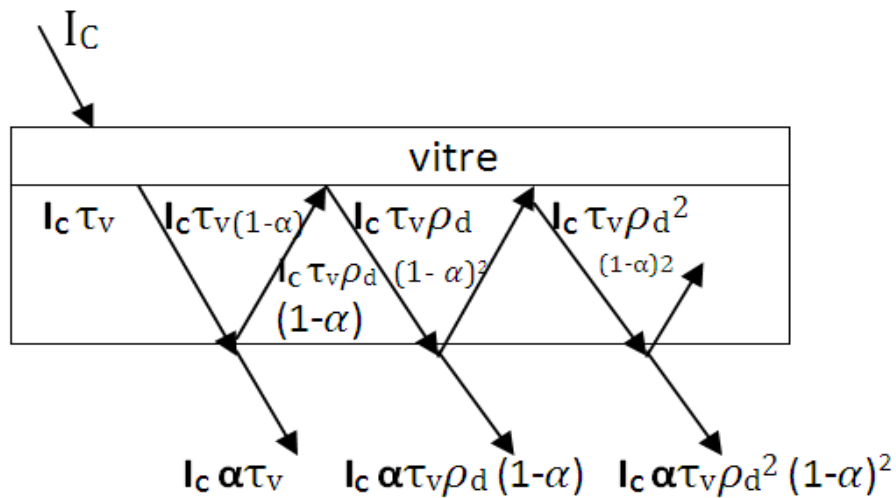


Figure III.1 : schéma des réflexions des rayonnements

$I_c$  : Le flux incident sur la surface du capteur

$\rho_d$  : coefficient de réflexion hémisphérique du vitrage.

$\tau_v$  : facteur de transmission hémisphérique du vitrage

$1-\alpha$  : coefficient de réflexion de l'absorbeur.

$\alpha$  : coefficient d'absorption de l'absorbeur.

Le flux incidence sur la surface du capteur va se composer en :

$\tau_v \cdot I_c$  : le flux transmis et arrivant à la surface de l'absorbeur.

$\tau_v \cdot \alpha \cdot I_c$  : le flux absorbé par l'absorbeur.

$\tau_v \cdot (1-\alpha) \cdot I_c$  : le flux réfléchi par l'absorbeur vers la vitre.

$(1-\alpha) \cdot I_c \cdot \rho_d \cdot \tau_v$  : le flux réfléchi par la vitre vers l'absorbeur.

#### 5. Flux global reçu sur un plan horizontal :

$$I_h = I_{hdif} + I_{dir} \cdot \sinh[25] \quad (\text{III.13})$$

$I_{hdir}$  : Flux direct reçu sur une surface horizontale

$$I_{hdir} = B. \exp\left(\frac{-P.A}{P_0.COS\theta_z}\right) \quad (III.14)$$

Avec:

$$\theta_z = \frac{\pi}{2} - h: \text{Anglezenital} \quad (III.15)$$

$$\frac{p}{p_0} = \exp(-0.0001184. \text{altitude}) \quad (III.16)$$

A : coefficient de trouble caractérisant le sol ou bien le coefficient d'extinction

B : l'intensité de l'éclairement hors atmosphère.

$$B = 0.88. I_0. C \quad (III.17)$$

Avec :

C : Coefficient de distance terre-soleil

$$C = 1 + 0.034 \cos(30. (M - 1) + n) \quad (III.18)$$

n : Numéro du mois

$I_{hdif}$  : Flux diffus reçu sur une surface horizontale

$$I_{hdif} = \sinh(I_0. C. 0,271 - 0,2939. I_{hdir}) \quad (III.19)$$

## 6. Flux global reçu sur un plan incliné :

$$I_c = I_{cdir} + I_{cdif} \quad [25] \quad (III.20)$$

$I_{cdir}$  : Flux direct reçu sur une surface inclinée.

$$I_{cdir} = I_{hdir} \cdot \cos\theta_i \quad (III.21)$$

$\theta_i$  : Angle d'incidence.

$I_{cdif}$  : Flux diffus reçu sur une surface inclinée.

$$I_{cdif} = I_{hdif} \cdot \left(\frac{1+\cos i}{2}\right) + I_h \cdot ALB \left(\frac{1-\cos i}{2}\right) \quad (III.22)$$

## 7. Calcul du produit transmissivité-absorption global ( $\tau\alpha$ ):

### ➤ **Produit transmissivité-absorptivité direct ( $\tau\alpha$ )<sub>dir</sub> :**

$$(\tau\alpha)_{dir} = \tau \cdot \alpha \cdot \sum((1 - \alpha) \cdot \rho d)^n \quad (\text{III.23})$$

Avec :

$\alpha$  : Coefficient d'absorption de la plaque

$$\alpha = \alpha_n \cdot (\cos \theta_i)^{0.25} \quad (\text{III.24})$$

$\alpha_n$  : coefficient d'absorption à une incidence normale (90°)

$\rho d$  : Coefficient de réflexion diffus en pratique

$$\rho d = \tau\alpha - \tau \quad (\text{III.25})$$

### ➤ **produit transmissivité-absorptivité diffus ( $\tau\alpha$ )<sub>dif</sub> :**

$$(\tau\alpha)_{dif} = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho d}$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot (\cos \Psi_c)^{0.25} \quad (\text{III.26})$$

$$\Psi_c = 59.68 - 0.1388 \cdot i + 0.001497 \cdot i^2 \quad (\text{III.27})$$

$\Psi_c$  : angle d'incidence formé par le rayonnement diffus de ciel avec la normale du collecteur.

### ➤ **Produit transmissivité –absorptivité réfléchi ( $\tau\alpha$ )<sub>ref</sub> :**

$$(\tau\alpha)_{ref} = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha) \cdot \rho d} \quad (\text{III.28})$$

$$\alpha = \alpha_n \cdot (\cos \Psi_s)^{0.25} \quad (\text{III.29})$$

$$\Psi_s = 90 - 0.5788 \cdot i + 0.0026093 \cdot i^2 \quad (\text{III.30})$$

$\Psi_s$  : angle d'incidence formé par le rayonnement diffus du sol avec la normale du collecteur.

Le produit transmissivité-absorptivité global ( $\tau\alpha$ ) est : [25]

$$(\tau\alpha) = \frac{(\tau\alpha)_{dir}(I_h \cdot I_{hdif}) \cdot R_b + (\tau\alpha)_{dif} \cdot R_c \cdot I_{hdif} + (\tau\alpha)_{ref} \cdot I_h \cdot R_s}{I_c} \quad (\text{III.31})$$

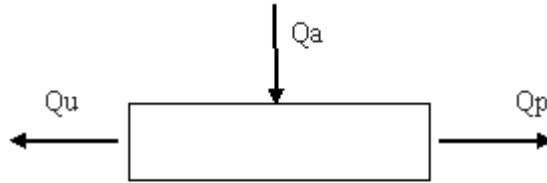
$$R_b = \frac{\cos\theta_i}{\sin h} \quad (\text{III.32})$$

$$R_c = \frac{(1 + \cos i)}{2} \quad (\text{III.33})$$

$$R_s = \frac{ALB(1 - \cos i)}{2} \quad (\text{III.34})$$

## 8. Bilan énergétique:

Le bilan énergétique d'un capteur plan s'obtient simplement en écrivant que l'énergie absorbée  $Q_a$  se répartit en :



**Figure III.2 :** bilan énergétique

$Q_u$  : énergie utile extraite de l'absorbeur par le fluide caloporteur.

$Q_p$  : énergie perdue par le capteur vers l'environnement.

$dQ_s$ : énergie stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur on a donc :

$$Q_a = Q_u + Q_p + \frac{dQ_s}{dt} \quad (\text{III.35})$$

En régime permanent établit l'équation s'écrit :

$$Q_a = Q_u + Q_p \quad (\text{III.36})$$

Car le régime permanent est un régime qui ne varie pas avec le temps, donc l'accroissement  $\frac{dQ_s}{dt} = 0$ .



$$Q_a = I_C \cdot (\tau\alpha) \cdot A_c \quad (\text{III.37})$$

$$Q_p = A_c \cdot U_L \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{III.38})$$

$I_C$  : Flux incident pour une surface inclinée.

$A_c$  : Surface de captation.

$T_a$  : Paramètre caractérisant la fonction d'énergie absorbée par la plaque de l'énergie solaire incidente.

$U_L$  : Coefficient global des pertes.

$T_p$  : Température de la plaque absorbante.

$T_a$  : Température ambiante.

### 8.1. Rendement instantané du capteur :

D'après l'analyse de HOTTEL, WHILIER, WORTZ et BLISS [26,27], ce rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie utile réellement extraite du système est l'éclairement solaire global incident sur le capteur.

$$\eta_{ins} = \frac{Q_u}{I_C \cdot A_c} \quad (\text{III.39})$$

$A_c$  : Surface de captation.

$I_C$  : L'éclairement solaire incident.

### 8.2. Rendement journalier du capteur :

Le rendement journalier du capteur est défini par :

$$\eta_j = \frac{\sum Q_u}{A_c \cdot \sum I_c} \quad (\text{III.40})$$

Ou bien 
$$\eta_j = \frac{\int_0^t Q_u dt}{A_c \int_0^t I_c dt} \quad (\text{III.41})$$

### 8.3. Rendement optique du capteur :

Il est défini comme étant le rapport entre l'énergie absorbée par la plaque et le flux incident sur le capteur :

$$\eta_0 = \frac{Q_a}{I_c \cdot A_c} \quad (\text{III.42})$$

### 8.4. La puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur :

$$Q_u = Q_t + Q_b \quad (\text{III.43})$$

$Q_u$ : Puissance thermique utile récupérée par le fluide caloporteur

$Q_t$ : Puissance thermique transmise directement par la paroi externe

$Q_b$ : Puissance thermique transmise à traverses l'ailette jusqu'à la paroi externe du tube.

$$Q_b = F_a \cdot [Q_a - U_L \cdot (T_b - T_a)] \cdot (wT - de) \quad (\text{III.44})$$

$F_a$  : Le rendement de l'ailette qui s'écrit :

$$F_a = \frac{th[b(\frac{WT-de}{2})]}{b(\frac{WT-de}{2})} \quad (\text{III.45})$$

Avec :  $b^2 = \frac{U_L}{\delta \cdot \lambda} \quad (\text{III.46})$

$\lambda$  : Conductivité de l'absorbeur

$\delta$ : Épaisseur de l'absorbeur.

$de$  : Diamètre extérieur des tubes.

$$Q_t = [Q_a - U_L \cdot (T_b - T_a)] \cdot de \quad (\text{III.47})$$

D'où la puissance utile  $Q_u$  peut être exprimée en fonction de la température moyenne du fluide  $T_{fm}$  en introduisant un facteur  $F_f$  appelé "efficacité de l'absorbeur"

$$Q_u = WT \cdot F_f \cdot [Q_a - U_L \cdot (T_{fm} - T_a)] \quad (\text{III.48})$$

Avec :

$$F_f = \frac{\frac{1}{U_L}}{W_T \cdot \left[ \frac{1}{U_L \cdot (d_e + (W_T - d_e) \cdot F_a)} + R_b + \frac{1}{\pi d_i h_i} \right]} \quad (\text{III.49})$$

$h_i$  : Coefficient de convection fluide-tube

$R_b$  : Résistance thermique de la soudure

$$R_b = \frac{1}{\pi \cdot L_T \cdot \lambda} \cdot \ln \left( \frac{R_{ey}}{R_i} \right) + \frac{1}{\pi \cdot L_T \cdot \lambda} \cdot \ln \left( \frac{R_{ey} + \delta}{R_{ey}} \right) \quad (\text{III.50})$$

$$h_i = \frac{N_u \cdot K'}{d_i} \quad (\text{III.51})$$

$$K' = \frac{P_r \cdot \nu}{C_p} \quad (\text{III.52})$$

$$N_u = 1.75 \cdot \left[ \frac{R_{ey} P_r d_i}{L_T} + 0.012 \cdot \left( \frac{G_r^{0.33} R_{ey} P_r d_i}{L_T} \right)^{1.33} \right]^{0.33} \quad (\text{III.53})$$

$$G_r = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta \theta \cdot d_i^3}{\nu^2} \quad (\text{III.54})$$

$\nu$  : viscosité cinématique de l'eau.

$C_p$  : Capacité calorifique de l'eau

$K'$  : Conductivité thermique de l'eau.

$d_i$  : Diamètre intérieur de tube.

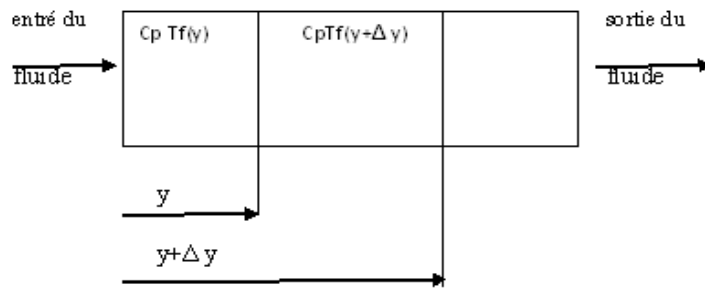
$G_r$  : Nombre de Grashoff.

$L_T$  : Longueur des tubes.

$\beta$  : Coefficient de dilatation thermique.

$\Delta \theta$  : Écart de température entre le fluide caloporteur et l'absorbeur.

### 8.5. Température de sortie du fluide caloporteur ( $T_{fs}$ ) :



**Figure III.3** : schéma de sens de fluide

Bilan sur un élément du fluide caloporteur d'après la loi de conservation de l'énergie, on a :

$$Qu(y)dy = \dot{m} C_p \cdot [T_f(y + dy) - T_f(y)] \quad (\text{III.55})$$

$$Qu(y) = \dot{m} C_p \frac{dT_f(y)}{dy} \quad (\text{III.56})$$

En égalisant 48 et 56 on aura :

$$F_f \cdot WT \cdot [Q_a - U_L(T_{fm}(y) - T_a)] = \dot{m} C_p \cdot \frac{dT_f(y)}{dy} \quad (\text{III.57})$$

$$\ln(T_{fm}(y) - T_a - \frac{Q_a}{U_L}) = -\frac{F_f U_L W_t \cdot y}{\dot{m} C_p} + C_1 \quad (\text{III.58})$$

➤ Au point = 0 , on a  $T_{fm}(0) = T_{fe} \Rightarrow \ln(T_{fe} - T_a - \frac{Q_a}{U_L}) = C_1$  (III.59)

Alors (III.58) devient :

$$\ln \frac{T_{fm}(y) - T_a - \frac{Q_a}{U_L}}{T_{fe} - T_a - \frac{Q_a}{U_L}} = -\frac{F_f U_L W_t \cdot y}{\dot{m} C_p} \quad (\text{III.60})$$

➤ Au point  $y = L$ , on a  $T_{fm}(L) = T_{fs}$

Finalement la température de sortie du fluide est :

$$T_{fs} = [T_{fe} - T_a - \frac{Q_a}{U_L}] \cdot e^{-\left(\frac{F_f U_L W_t \cdot L}{\dot{m} C_p}\right)} + T_a + \frac{Q_a}{U_L} \quad (\text{III.61})$$

**8.6. Facteur de conductance du capteur ( $F_R$ ) :**

$$F_R = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{fs} - T_{fe})}{A_c \cdot [I_c \cdot \eta_0 - U_L \cdot (T_{fe} - T_a)]} \quad (\text{III.62})$$

D'où la relation importante donnant  $Qu$  en fonction de la température d'entrée du fluide.

$$Qu = A_c \cdot F_R \cdot [I_c \cdot \eta_0 - U_L \cdot (T_{fe} - T_a)] \quad (\text{III.63})$$

La température d'entrée  $T_{fe}$  est généralement, très proche de celle du stockage pour les cycles fermés cependant l'utilisation d'une température de référence  $T_i$  est possible, donc :

$$\eta_i = F_i \left[ \eta_0 - U_L \cdot \frac{T_i - T_a}{I_c} \right] \quad (\text{III.64})$$

$T_i$ : température de référence	$F_i$
$T_p$ : température de l'absorbeur	1
$T_{fe}$ : température d'entrée du fluide	$Fr$
$T_{fs}$ : température de sortie du fluide	$F_0 = \frac{Fr}{1 - \frac{Fr U_L}{\dot{m} C_p}}$

Pour améliorer  $Fr$ , on doit :

- Diminuer les pertes  $UL$
- Augmenter  $F_f$  et par la suite  $h_i$
- Augmenter le terme  $\dot{m}C_p$

**8.7. Température moyenne du fluide caloporteur ( $T_{fm}$ ) :**

$$T_{fm} = T_{fe} + \frac{Qu}{U_L F_R} \cdot \left( 1 - \frac{F_R}{F_f} \right) \quad (\text{III.65})$$

**8.8. Température moyenne de l'absorbeur ( $T_{pm}$ ) :**

$$T_{pm} = T_{fe} + \frac{Qu}{U_L F_R} \cdot (1 - F_R) \quad (\text{III.66})$$

**8.9. Evaluation des pertes thermiques :**

Pour évaluer toutes les pertes du capteur, on pose les hypothèses suivantes :

- Le régime est permanent
- la puissance absorbée par la vitre est négligeable.
- La conduction dans la vitre est négligeable.

Ces pertes ont lieu suivant les trois modes de transfert thermique, soit :

Conduction, convection et rayonnement.

Ces différentes pertes se divisent en trois catégories, soit :

**➤ Pertes vers l'avant :**

- pertes par convection entre absorbeur et vitrage.
- pertes par convection entre vitrage et air ambiant.
- pertes par rayonnement entre absorbeur et vitrage.
- pertes par rayonnement entre vitrage et le ciel.

**➤ Pertes vers l'arrière :**

- pertes par conduction à travers l'isolant.
- pertes par convection et rayonnement entre points extérieur et milieu ambiant.

**➤ Pertes vers les cotés:**

- pertes par convection et conduction

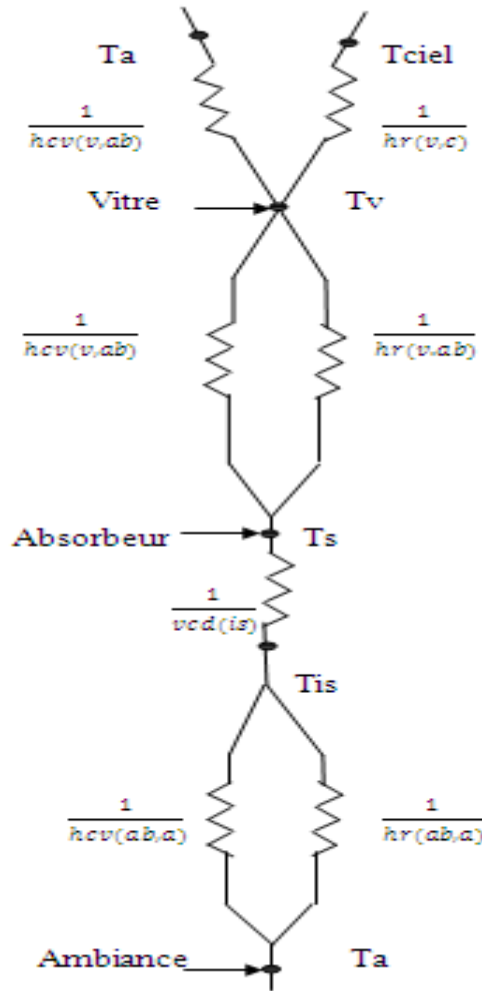


Figure III.4 : schéma électrique équivalent des échanges thermiques

**A. Coefficient de pertes vers l'avant :**

Le coefficient des pertes thermiques vers l'avant est donné par :

$$Ut = \left( \frac{1}{h_{c,p-v} h_{r,p-v}} + \frac{1}{h_w + h_{r,v-a}} \right)^{-1} \quad (III.67)$$

➤  $h_w = h_{c,v-a}$  : coefficient de transfert de chaleur du au vent ,il est calculé par la loi de HOTTELL et WOERTZ [28] :

$$h_w = 5,67 + 3.86.V_p \quad (III.68)$$

➤ Le coefficient de pertes thermiques par rayonnement entre deux plaques i et j

s'écrit[24] :

$$h_{r,ij} = \frac{\sigma(T_i^2 + T_j^2)(T_i T_j)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} \quad (\text{III.69})$$

$\sigma$  : Coefficient de Stéphane Boltzman.

$\varepsilon$  : Coefficient d'émissivité entre deux plaques parallèles.

➤ Le coefficient de pertes par rayonnement entre le vitrage et le ciel est donné par :

$$H_{r,v-a} = \frac{\varepsilon_v \cdot \sigma (T_v + T_c)(T_v^2 + T_c^2)(T_v - T_c)}{T_v - T_a} \quad (\text{III.70})$$

$$\text{Avec } T_c = 0.0522 \cdot (T_a)^{1.5}. \quad (\text{III.71})$$

➤ Le coefficient de pertes par convection entre l'absorbeur et le vitrage lorsque l'inclinaison du capteur sur l'horizontal est inférieure à 75°, est donné par [32] :

$$h_{p-v} = \frac{Nu \cdot K_a}{dh} \quad (\text{III.72})$$

$$\text{Avec } K_a = \frac{Pr \cdot \nu}{C_p} \quad (\text{III.73})$$

$\nu$ : Viscosité cinématique de l'air.

$C_p$  : Capacité calorifique de l'air.

$K_a$  : Conductivité de la lame d'air.

$dh$ : Epaisseur de la lame d'air d'après [29]

Pour le calcul de Nusselt, on peut retenir la corrélation de HOLLANDS :

$$Nu = 1 + 1,44 \cdot \left(1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos i}\right) \cdot \left(1 - \frac{(\sin(1,8i))^{1,6} \cdot 1708}{Ra \cdot \cos i}\right) + \left(\left(\frac{Ra \cdot \cos i}{5830}\right)^{\frac{1}{3}} - 1\right) \quad (\text{III.74})$$

$R_a$  : le nombre de RAYLEIGH est donné par la relation :

$$R_a = G_r \cdot P_r \quad (\text{III.75})$$

On peut employer aussi la relation empirique de KLEIN[28] qui s'est avérée plus simple pour le calcul de  $U_{av}$  à des températures de l'absorbeur comprises entre 0° et 200°C Avec une précision de 0,3 [W/m<sup>2</sup>C°].



$$U_{av} = \left[ \frac{1}{\frac{c}{T_p} \left[ \frac{T_p - T_a}{N_v + f} \right]^e + h_w} \right]^{-1} + \frac{(T_p + T_a) \cdot (T_p^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0,00591 \cdot N_v \cdot h_w)^{-1} + \frac{2 \cdot N_v + f - 1 + 0,133 \cdot \varepsilon_p - N_v}{\varepsilon_g}} \quad (\text{III.76})$$

$N_v$  : Nombre de vitrage.

$f$ : Coefficient des pertes tenant compte de l'effet du vent.

$$f: (1 - 0,089 \cdot h_w - 0,116 \cdot h_w \cdot \varepsilon_p) \cdot (1 + 0,0766 \cdot N_v) \quad (\text{III.77})$$

$h_w$  : coefficient de transfert thermique due au vent.

$$h_w = 5,7 + 3,8 \cdot V_v \quad (\text{III.78})$$

$V_v$  : vitesse du vent

$\varepsilon_p$  :Emitance de l'absorbeur.

$\varepsilon_g$  :Emitance du verre (0,89).

$i$ : angle d'inclinaison du capteur.

$$C = 520 \cdot (1 - 0,000051 \cdot i^2) \quad (\text{III.79})$$

$$e = 0,43 \cdot \left(1 - \frac{100}{T_p}\right) \quad (\text{III.80})$$

Les pertes vers l'avant sont données par :

$$q_{av} = U_{av} \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{III.81})$$

**B. Coefficient des pertes vers l'arrière ( $U_{ar}$ ) :**

$$U_{ar} = \frac{K}{e_l} \quad (\text{III.82})$$

$K$  : Conducteur de l'isolant.

$e_l$ : Épaisseur de l'isolant arrière.

Les pertes vers l'arrière sont données par :

$$Q_{ar} : U_{ar} \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{III.83})$$

**C. Coefficient des pertes vers les cotés ( $U_{lat}$ ) :**

$K_2$  : Conductivité thermique de l'isolant latéral.

$e_2$ : Épaisseur de l'isolant sur les cotés du capteur.

$A_e$  : Air latéral du capteur.

$A_c$  : Surface de captation.

Les pertes par les cotés latéraux sont données par :

$$q_{lat} = U_{lat} \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{III.84})$$

Le coefficient des pertes totales est :

$$U_L = U_{av} + U_{ar} + U_{lat} \quad (\text{III.85})$$

**9. Concept de coefficient des pertes vers l'avant d'un capteur en aérogel de silice :**

Nous faisons les considérations suivantes pour simplifier notre analyse :

- Les parois latérales isolent parfaitement le capteur de telle sorte que le transfert thermique est adimensionnel de la surface inférieure (absorbeur) vers la surface supérieure (vitre de couverture).
- La radiation solaire d'intensité  $I_c$  frappe la surface supérieure en incidence normale
- L'absorbeur est supposé être à une température constante et uniforme
- L'absorbeur est supposé être en contact direct avec l'une des faces de l'isolant transparent de telle sorte qu'il n'y ait pas de discontinuité de température à l'interface absorbeur-isolant de même la vitre de recouvrement avec l'autre face.

**9.1. Le coefficient de pertes par l'avant du capteur en aérogel de silice :**

$$U_{av} = \left( \frac{1}{U_c + U_{rp-v}} + \frac{1}{U_w + U_{rv-c}} \right)^{-1} \quad (\text{III.86})$$

- Le coefficient de pertes par conduction dans l'aérogel de silice est donné par [30] :

$$U_c = \frac{K_3}{L} \quad (\text{III.87})$$

$K_3$ : Coefficient de conduction du matériau ( $K=0,0178\text{W/m.K}$  à  $50^\circ\text{C}$  avec un coefficient de température de  $35.10^{-6}\text{W/m.K}^2$ )

L: épaisseur du matériau.

➤ Le coefficient de pertes par rayonnement de l'absorbeur vers la vitre à travers le matériau est donné par [31] :

$$U_{rp-v} = \frac{n^2 \cdot (T_p^2 T_c^2) (T_p + T_c)}{\frac{1}{\varepsilon_p} + \frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{3}{4 \cdot \tau_0} - 1} \quad (\text{III.88})$$

Avec  $\tau_0$  : est l'épaisseur optique  $= \alpha L$

Les coefficients de perte par rayonnement de la vitre vers le ciel et par convection dus au vent sont les même que dans le cas d'un capteur solaire ordinaire.

n: indice du milieu poreux.

Estimation de la température de la vitre de recouvrement :

La température de la vitre varie avec celle de l'absorbeur, elle est calculé en notant que les pertes thermiques de l'absorbeur vers sont les mêmes que celles de l'absorbeur vers le milieu ambiant ainsi :

$$T_v = T_p - \frac{U_L \cdot (T_p - T_a)}{U_c + U_{r,p-v}} \quad (\text{III.89})$$

La procédure commence par un choix de  $T_v$ , calculer les différents coefficients de pertes thermiques.

**Introduction :**

Le présent travail a pour but principal l'étude de l'influence du rendement sur les performances des capteurs solaires plans à eau en se basant sur des résultats théoriques [9].

**1. Les standards destinés aux tests des capteurs solaires :**

Ce sont des normes fixant les conditions selon lesquelles nous testons un capteur, ce qui permet de produire des résultats suivant un standard considéré et donc une comparaison entre capteurs testés selon le même standard.

Les principaux standards destinés aux tests des capteurs solaires sont :

- Standards N.B.S. 74-635
- Standards ASHRAE 93-77
- Recommandations for Européen solarcollectors tests methods.
- Standards Australiens.

➤ **Le standard N.B.S :**

Il est basé sur détermination du rendement instantané en fonction de la température moyenne du fluide caloporteur tel que :

$$\eta = F_f \cdot [(\tau\alpha)_e - \frac{U_l \cdot (T_{fm} - T_a)}{I_c}] \quad (IV.1)$$

Avec :

$F_f$  : Efficacité de l'absorbeur.

$(\tau\alpha)_e$  : Rendement optique effectif.

$U_l$  : Pertes de charges globales.

$I_c$  : Flux global.

$T_{fm}$  : Température moyenne du fluide caloporteur.

➤ **Le standard ACHRAE :**

Ce standard est basé sur la relation exprimant le rendement instantané du capteur en fonction de la température d'entrée du fluide. La relation de BLISS-WILLER l'exprime tel que [33]:

$$\eta = F_f \cdot [(\tau\alpha)_e - \frac{U_l \cdot (T_{fe} - T_a)}{I_c}] \quad (IV.2)$$

Tout comme le N.B.S les différents coefficients sont considérés comme étant constants ce qui est loin d'être le cas particulièrement pour les capteurs opérant à des températures élevées.

➤ **Les recommandations européennes :**

Ce dernier s'inspire du N.B.S. et de l'ACHRAE et les complète en introduisant une évolution du second degré pour le rendement instantané, tel que :

$$\eta = F_f \cdot [(\tau\alpha)_e - U_{l1}x - U_{l2}x^2] \quad (IV.3)$$

Avec :

$$x = \left[ \frac{(T_{fm} - T_a)}{I_c} \right] \quad (IV.4)$$

➤ **Le standard Australien :**

Il adapte une démarche tout à fait différente pour aboutir finalement à une relation exprimant le rendement instantané en intégrant l'ensemble des paramètres physiques et météorologique influant sur les paramètres du capteur tel que :

$$\eta = \eta_{0,b} \cdot (1 - f_b) + \eta_{0,b} \cdot f_b - (a + bv)x - [c + dv - (e + fT_f) \cdot (T_F^4 - T_y^4)] I_c x^2 \quad (IV.5)$$

Le champ d'application de ce standard se trouve étendu à tous les types de capteurs solaires et non plus au seul capteur solaire plan.

Instruments de mesures	Ashrae	Pyranomètre de classe I Thermomètre et thermocouple (1) Thermopile (2) Débit mètre (3) Anémomètre (4)
	Européen	Pyranomètre de classe II Thermomètre (5) Thermopile (2) Débit mètre (3) Anémomètre (4)
Déroulement et condition des tests	Ashrae	Exposer le capteur pendant trois jours aux radiations solaires à une incidence journalière >4722 w.h/m <sup>2</sup> jour ; Conditions météorologiques : Angle c'incidence -30<0<30 degrés ; Orientation du capteur à la latitude du lieu ; Vitesse de vent Vv<4.5 m/s ; Radiation solaire >630 w/m <sup>2</sup> ; Température ambiante Ta=30°C Faire circuler le fluide caloporteur pendant au moins 15 mn à la température d'étude ; Cadrer les mesures autour du midi solaire vrai ; Débit du fluide environ de 0.02 Kg/s. Durée du test au moins égale à la variation de temps et toujours >5mn ; Pendant toute la durée du test, les variations des différents paramètres doivent être à : 1% pour le débit du fluide. +/- 0.5°C pour la différence (To-Ti). +/- 0.1% pour Ta
	Européen	Radiation minimale de 600 W/m <sup>2</sup> . Moment acceptable étendu à 40°C autour du midi solaire vrai. Durée des tests de 30mn.
Nombre de Points de mesures	Ashrae	Les points de mesures au nombre de 4 sont choisis par rapport à Xm Chaque point doit être mesuré 4 fois 2 avant midi et 2 après midi T.S.V/soit au total 16 points.
	Européen	Les points mesurés sont choisis par rapport à la température d'entrée du fluide dans le capteur, ce qui nous donne un total de 16 points.

**2. Caractéristiques des capteurs plans ont étudié :**➤ **Le vitrage :**

Longueur (m)	2,5
Largeur(m)	1,5
Epaisseur(m)	0,003
Transmissivité	0,92
Emissivité	0,88
Indice du milieu	1,50

➤ **La plaque absorbante :**

Longueur(m)	2,20
Largeur(m)	1,20
Epaisseur(m)	0,0006

➤ **L'isolant :**

Coefficient de conduction[W/m.°K]	0,035
Epaisseur arrière (m)	0,03
Epaisseur latérale (m)	0,03

➤ **Echelle tubulaire**

Nature	Cuivre
Diamètre des tubes (mm)	15/18
Longueur (m)	2,40

➤ **L'aérogel de silice**

Masse volumique [Kg/m <sup>3</sup> ]	109
Indice de milieu	1,02
Transmissivité	0,92

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2094,9950	1421,2190	0,7854	9,8265	58,9598	0,7448	0,5328
11	24	28	842,5412	2600,7640	1693,4300	0,8231	10,3377	68,4642	0,7357	0,5359
12	26	30	876,1974	2733,1460	1773,6850	0,8318	10,5364	72,3819	0,7322	0,5398
13	26	30	898,8436	2822,7210	1830,4960	0,8374	10,6182	73,7394	0,7308	0,5430

**Tableau IV.1 :** Performance d'un capteur solaire plan avec un couvercle en verre blanc ( $k_e = 4 \text{ m}^{-1}$ )

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	1910,8820	1294,1920	0,7106	9,7617	55,9245	0,7552	0,4851
11	24	28	842,5412	2383,0430	1547,1440	0,7482	10,2488	64,9688	0,7432	0,4898
12	26	30	876,1974	2507,2150	1623,0720	0,7570	10,4405	68,7830	0,7397	0,4939
13	26	30	898,8436	2591,3670	1676,8400	0,7626	10,5184	70,0678	0,7383	0,4974

**Tableau IV.2:** Performances d'un capteur solaire plan avec un couvercle en plastique ( $k_e = 32\text{m}^{-1}$ )

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2210,0750	707,2899	0,8285	44,2094	41,9006	0,4389	0,2351
11	24	28	842,5412	2701,4400	760,2740	0,8550	44,6297	46,1666	0,4371	0,2406
12	26	30	876,1974	2830,6960	803,4492	0,8615	45,0197	49,1983	0,4353	0,2445
13	26	30	898,8436	2918,3810	834,9821	0,8658	45,1044	49,9517	0,4350	0,2477

**Tableau IV.3:** Performance d'un capteur solaire plan sans couvercle ( $Nv=0, \lambda = 45 \text{ W/m.K}$ )

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1362,4940	0,7550	9,8626	57,5566	0,7462	0,5107
11	24	28	842,5412	2505,0760	1625,6440	0,7928	10,3621	66,8445	0,7372	0,5145
12	26	30	876,1974	2633,8840	1703,9300	0,8016	10,5575	70,7151	0,7338	0,5185
13	26	30	898,8436	2721,1010	1759,3470	0,8072	10,6375	72,6393	0,7324	0,5219

**Tableau IV.4:** Performances d'un capteur solaire plan

simple vitrage(Nv=1, λ = 45 W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	1845,7000	1428,5320	0,8272	5,9464	59,1345	0,6916	0,5355
11	24	28	842,5412	2326,8920	1750,8030	0,8196	6,2726	69,8352	0,7364	0,5541
12	26	30	876,1974	2453,9070	1841,8370	0,8168	6,3957	74,0104	0,7468	0,5605
13	26	30	898,8436	2540,0170	1905,3520	0,8156	6,4474	75,5281	0,7535	0,5652

**Tableau IV.5:** Performance d'un capteur solaire plan

double vitrage(Nv=2, λ = 45 W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1362,4940	0,7550	9,8626	57,5566	0,7462	0,5107
11	24	28	842,5412	2505,0760	1625,6440	0,7928	10,3621	66,8445	0,7372	0,5145
12	26	30	876,1974	2633,8840	1703,9300	0,8016	10,5575	70,7151	0,7338	0,5185
13	26	30	898,8436	2721,1010	1759,3470	0,8072	10,6375	72,0393	0,7324	0,5219

**Tableau IV.6:** Performance d'un capteur solaire plan avec

un absorbeur en acier( λ = 45 W/m.K)



TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1609,3980	0,7550	5,1658	63,4563	0,8462	0,6033
11	24	28	842,5412	2505,0760	1961,5080	0,7928	5,3582	74,8699	0,8414	0,6208
12	26	30	876,1974	2633,8840	2061,5080	0,8016	5,4134	79,2574	0,8400	0,6274
13	26	30	898,8436	2721,1010	2129,5420	0,8072	52,4427	80,8851	0,8393	0,6317

**Tableau IV.7:** Performances d'un capteur solaire plan

à absorbeur sélectif ( $\epsilon = 0,1$ ,  $\lambda = 45$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1701,6540	0,7550	8,7216	65,6608	0,9334	0,6379
11	24	28	842,5412	2505,0760	2057,0940	0,7928	9,0826	77,1539	0,9309	0,6510
12	26	30	876,1974	2633,8840	2163,4870	0,8016	9,2261	81,6962	0,9299	0,6584
13	26	30	898,8436	2721,1010	2237,0990	0,8072	9,2745	83,4551	0,9295	0,6636

**Tableau IV.8:** Performances d'un capteur solaire plan avec

un absorbeur en aluminium ( $\lambda = 204$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1742,0280	0,7550	8,5456	66,6255	0,9553	0,6530
11	24	28	842,5412	2505,0760	2109,2390	0,7928	8,8921	78,3999	0,9535	0,6675
12	26	30	876,1974	2633,8840	2219,3040	0,8016	9,0240	83,0299	0,9529	0,6754
13	26	30	898,8436	2721,1010	2295,1890	0,8072	9,0662	84,8432	0,9527	0,6809

**Tableau IV.9:** Performance d'un capteur solaire plan avec

un absorbeur en cuivre ( $\lambda = 380$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1260,0660	0,7550	12,3570	55,1090	0,6963	0,4723
11	24	28	842,5412	2505,0760	1497,4060	0,7928	12,8189	63,7803	0,6895	0,4739
12	26	30	876,1974	2633,8840	1571,9850	0,8016	13,0070	67,5623	0,6867	0,4784
13	26	30	898,8436	2721,1010	1624,4920	0,8072	13,0823	68,8170	0,6858	0,4819

**Tableau IV.10:** Performance d'un capteur solaire plan  
avec isolant en sciure de bois ( $k = 0,11$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1362,4940	0,7550	10,3414	57,5566	0,7462	0,5107
11	24	28	842,5412	2505,0760	1625,6440	0,7928	10,9991	66,8445	0,7372	0,5145
12	26	30	876,1974	2633,8840	1703,9300	0,8016	11,0133	70,7151	0,7338	0,5185
13	26	30	898,8436	2721,1010	1759,3470	0,8072	11,8933	72,0393	0,7324	0,5219

**Tableau IV.11:** Performances d'un capteur solaire plan avec  
un isolant en fibre de verre ( $k = 0.032$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1388,3880	0,7550	9,2906	58,1753	0,7552	0,5205
11	24	28	842,5412	2505,0760	1657,8890	0,7928	9,7996	67,6150	0,7432	0,5247
12	26	30	876,1974	2633,8840	1737,0680	0,8016	9,9969	71,5070	0,7397	0,5286
13	26	30	898,8436	2721,1010	1793,1950	0,8072	10,0780	72,8481	0,7383	0,5320

**Tableau IV.12:** Performance d'un capteur solaire plan avec  
un isolant en mousse de polyuréthane( $k = 0,023$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1961,6280	0,7550	1,8679	71,8728	0,6842	0,7354
11	24	28	842,5412	2505,0760	2427,0690	0,7928	1,8894	85,9944	0,9834	0,7681
12	26	30	876,1974	2633,8840	2551,9580	0,8016	1,9002	90,9787	0,9830	0,7766
13	26	30	898,8436	2721,1010	2636,8170	0,8072	1,9046	93,0063	0,9828	0,7822

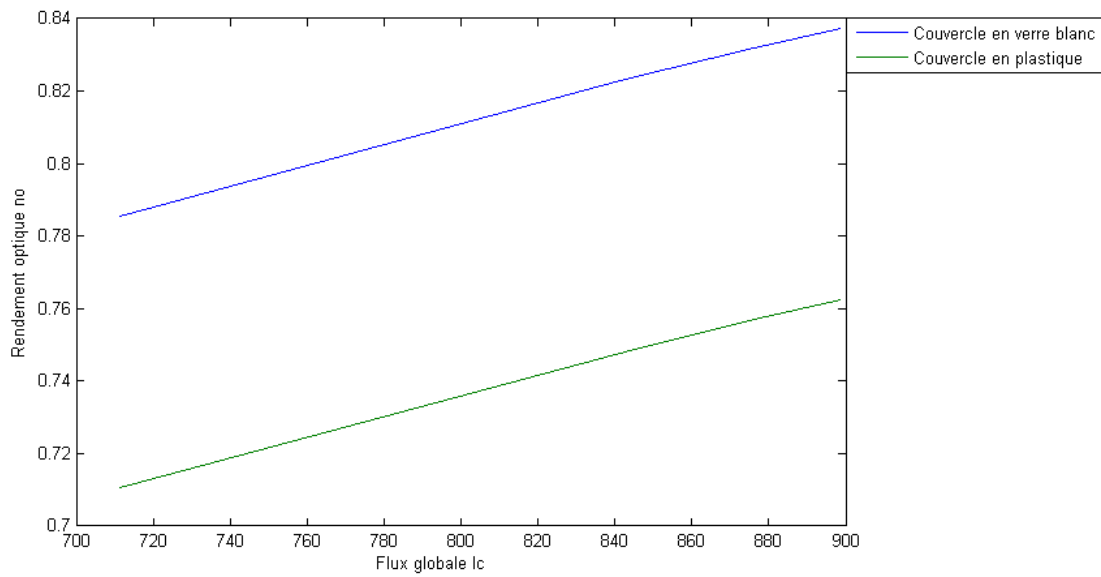
**Tableau IV.13:** Performance d'un capteur solaire plan en aérogel de silice(  $K=0,02$  W/m.K)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2013,9660	1551,9990	0,7550	8,7676	62,0848	0,8415	0,5818
11	24	28	842,5412	2505,0760	1865,8490	0,7928	9,2103	72,5842	0,8351	0,5905
12	26	30	876,1974	2633,8840	1958,3650	0,8016	9,3823	76,7948	0,8326	0,5912
13	26	30	898,8436	2721,1010	2023,2820	0,8072	9,4478	78,3460	0,8317	0,6002

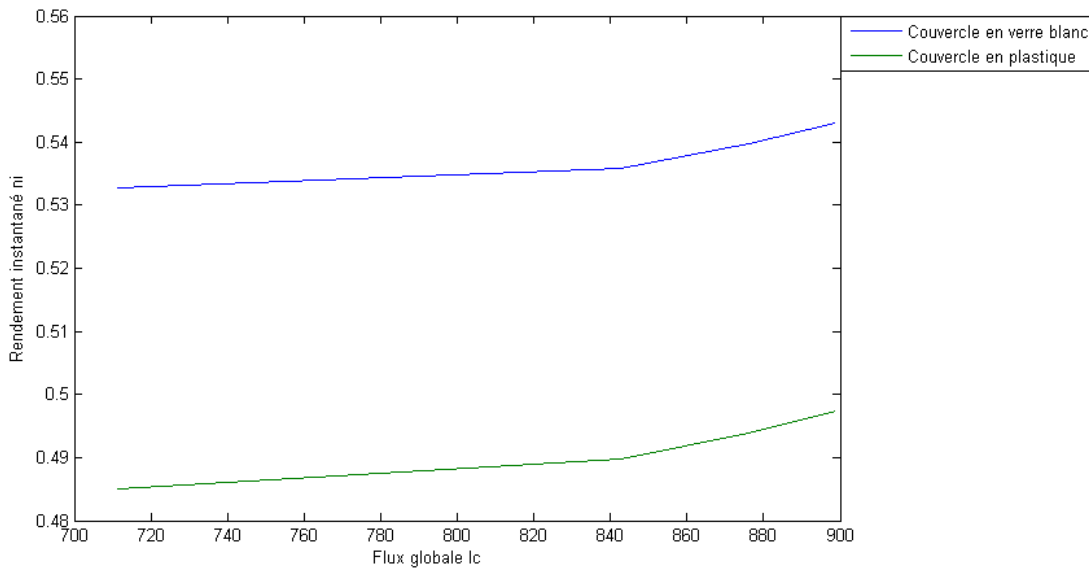
**Tableau IV.14:** Performance d'un capteur solaire plan ( $Wt = 0,1$  m)

TL [h]	Ta [°C]	TFE [°C]	I <sub>c</sub> [W/m <sup>2</sup> ]	Qa [w]	Qu [w]	η <sub>0</sub>	U <sub>L</sub> [W/m <sup>2</sup> K]	TFS [°C]	Fa	η <sub>i</sub>
10	23	25	711,3088	2094,9950	1291,1370	0,7550	9,5724	55,8515	0,7022	0,4840
11	24	28	842,5412	2600,7640	1535,8760	0,7928	10,1150	64,6995	0,6915	0,4861
12	26	30	876,1974	2733,1460	1607,6175	0,8016	10,3251	68,4137	0,8750	0,4892
13	26	30	898,8436	2822,7210	1658,7550	0,8072	10,4142	69,6357	0,6858	0,4921

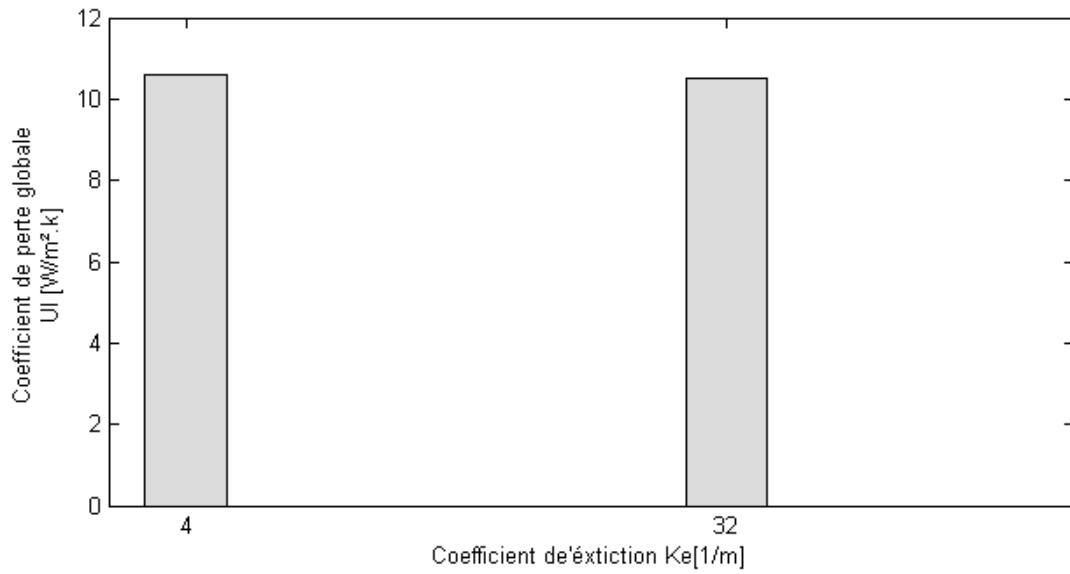
**Tableau IV.15:** Performance d'un capteur solaire plan ( $Wt = 0,14$  m)



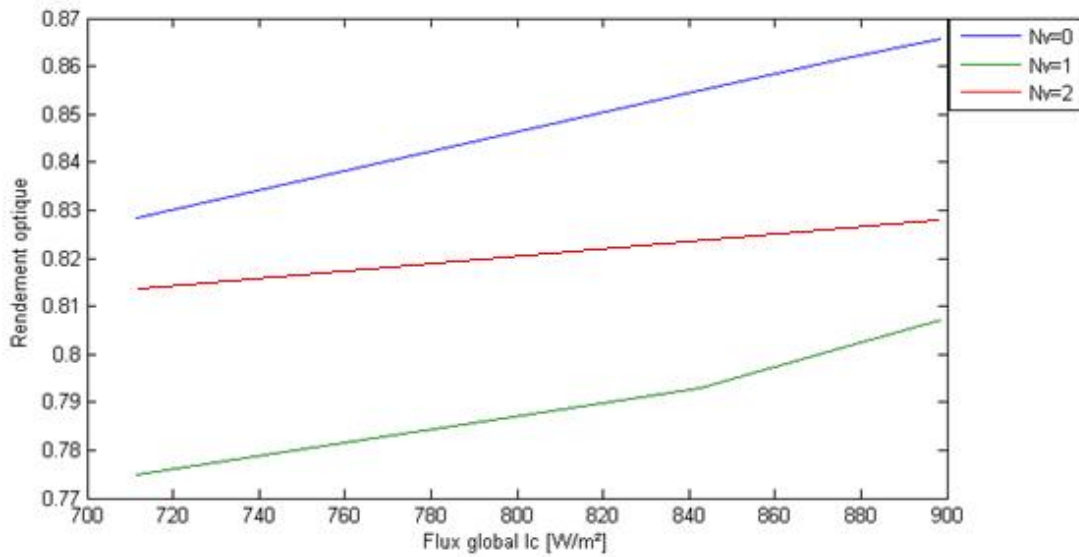
GRAPHE 1 : Influence du coefficient d'extinction ( $K_e$ )  
sur le rendement optique  $\eta_0$



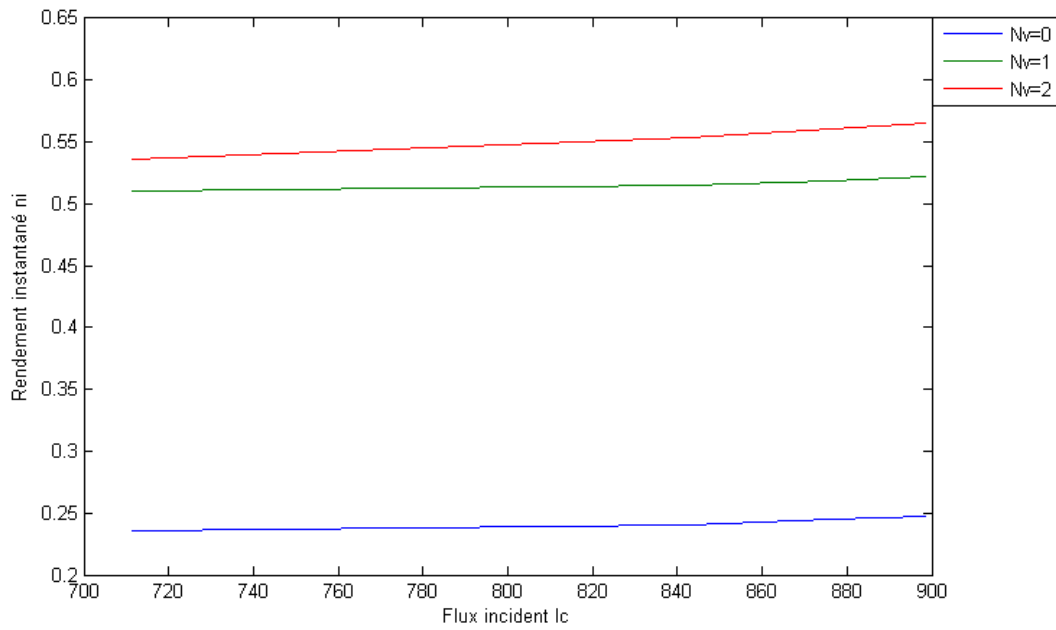
GRAPHE 2 : Influence du coefficient d'extinction ( $K_e$ )  
sur le rendement instantané  $\eta_i$



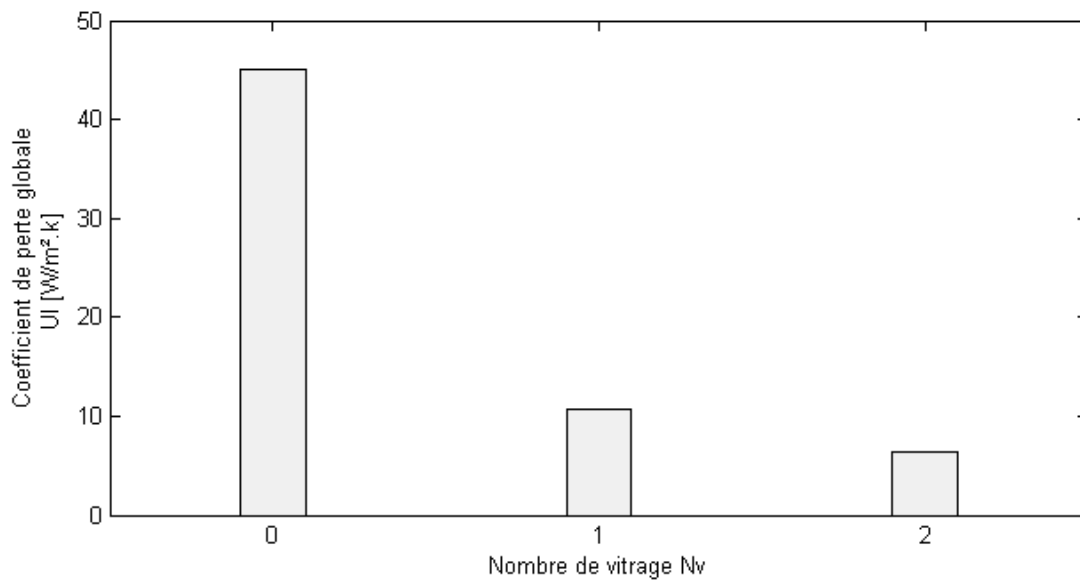
GRAPHE 3 : Influence du coefficient d'extinction ( $K_e$ )  
sur le coefficient de perte globale ( $U_l$ )



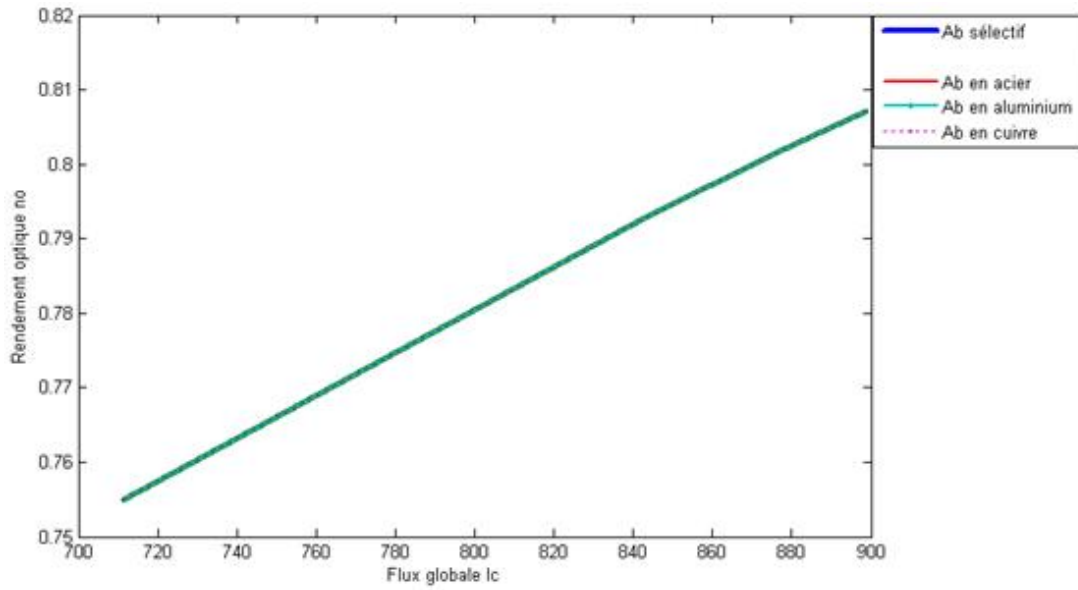
GRAPHE 4 : Influence du nombre de vitrage ( $N_v$ )  
sur le rendement optique  $\eta_0$



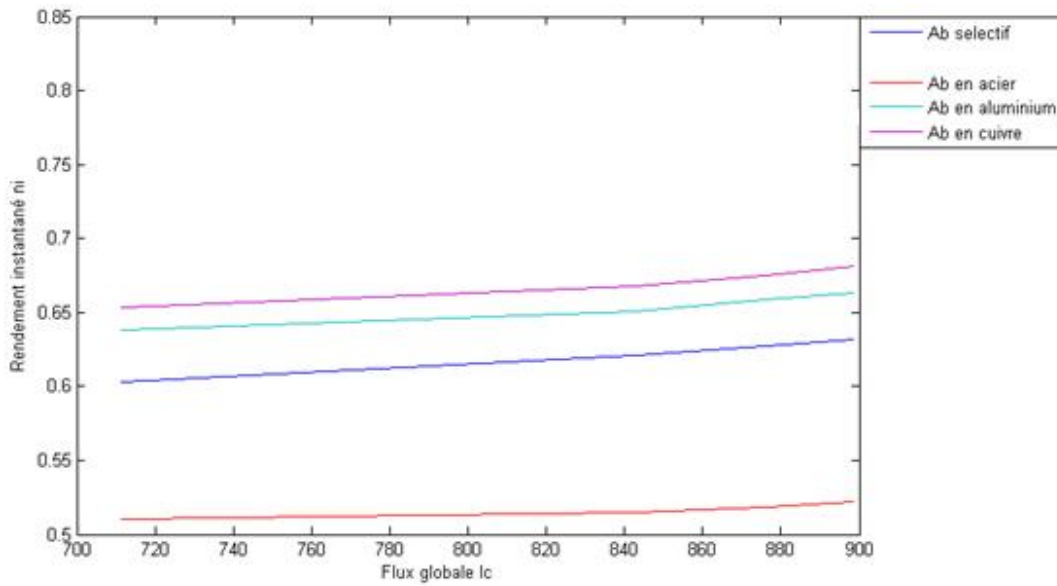
GRAPHE 5 : Influence du nombre de vitrage( $N_v$ )  
sur le rendement instantané  $\eta_i$



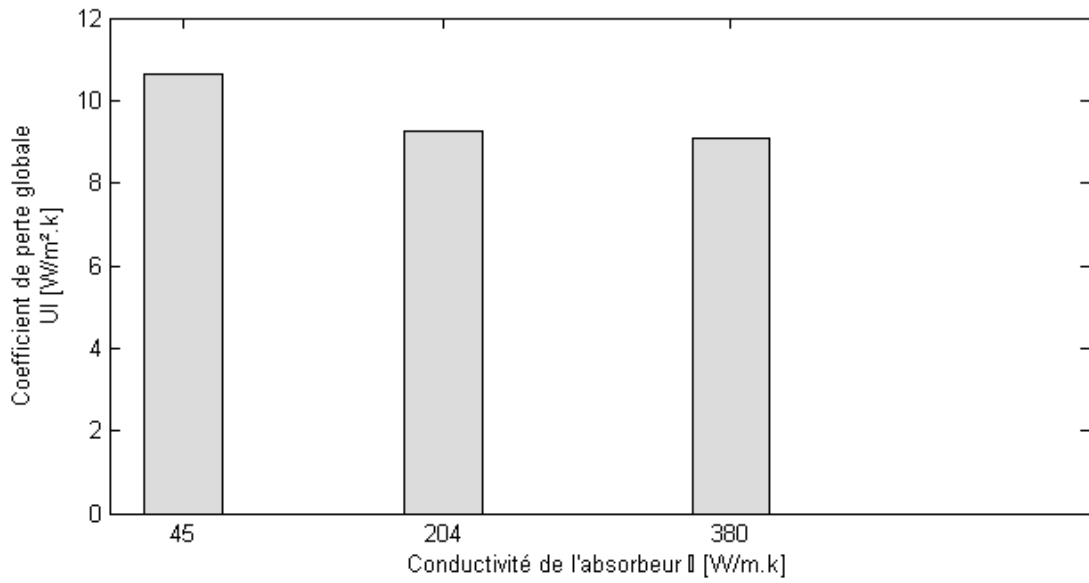
GRAPHE 6 : Influence du nombre de vitrage ( $N_v$ )  
sur le coefficient de perte globale (UI)



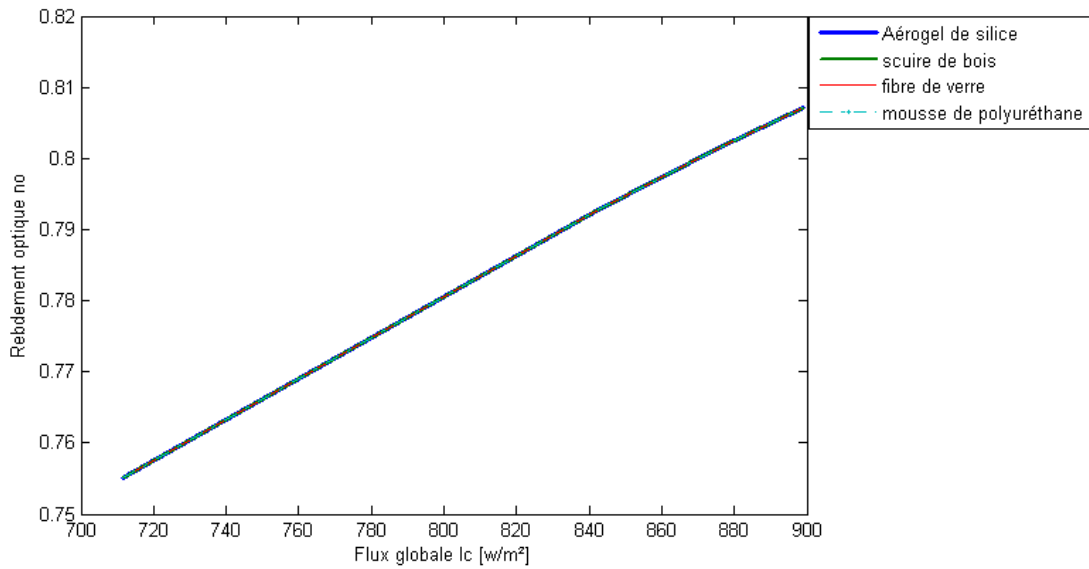
GRAPHE 7 : Influence de la conductivité de l'absorbeur ( $\lambda$ ) sur le rendement optique  $\eta_o$



GRAPHE 8 : Influence de la conductivité de l'absorbeur ( $\lambda$ ) sur le rendement instantané  $\eta_i$

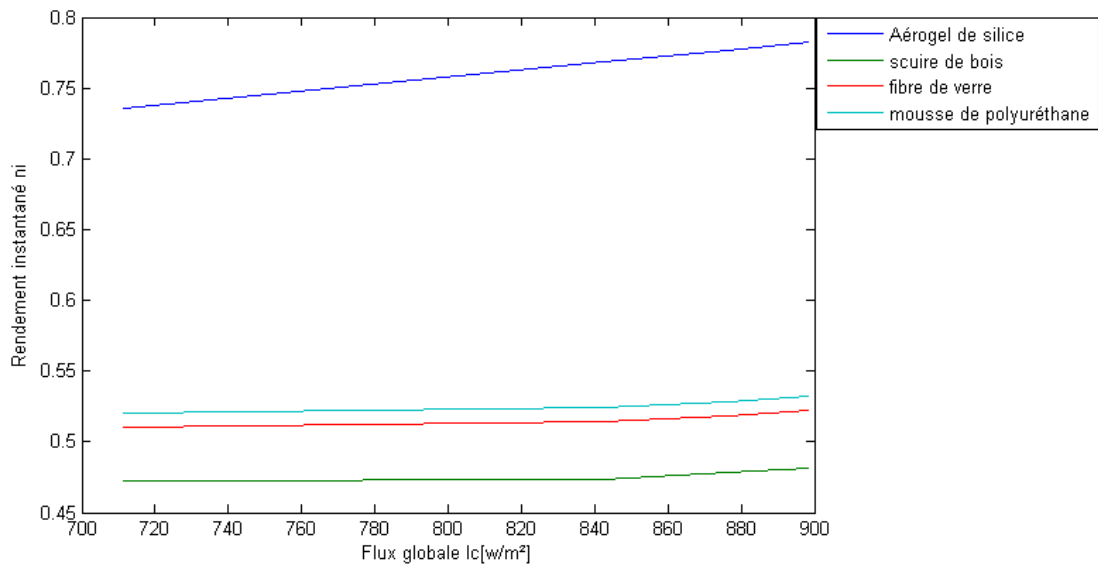


GRAPHE 9 : Influence de la conductivité de l'absorbeur ( $\lambda$ )  
sur le coefficient de perte global (UI)

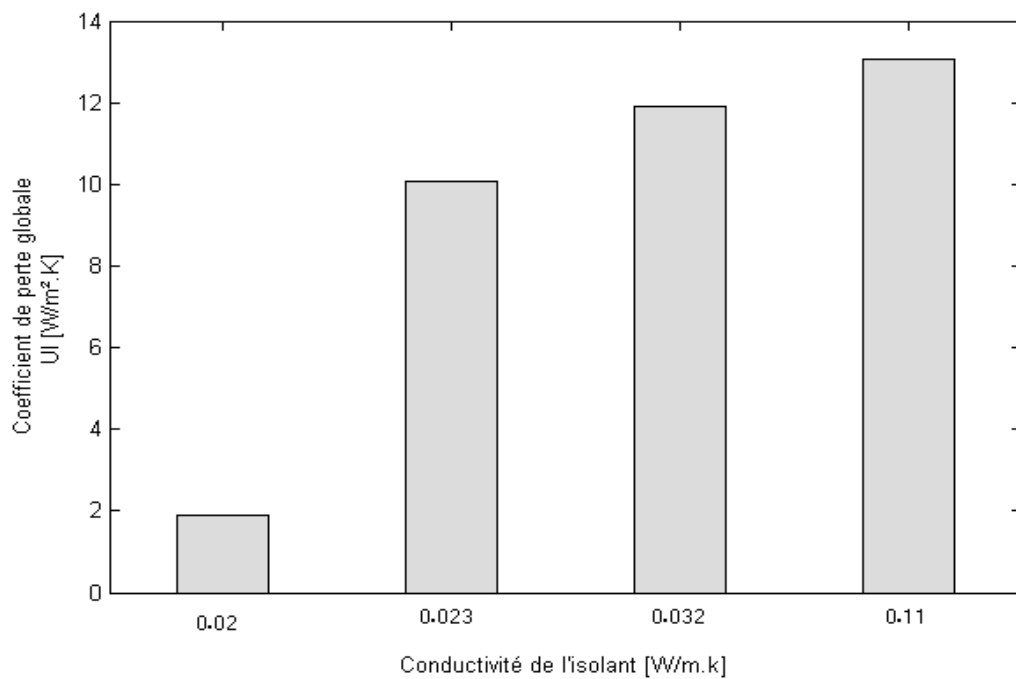


GRAPHE 10 : Influence de la conductivité de l'isolant (K)  
sur le rendement optique  $\eta_0$

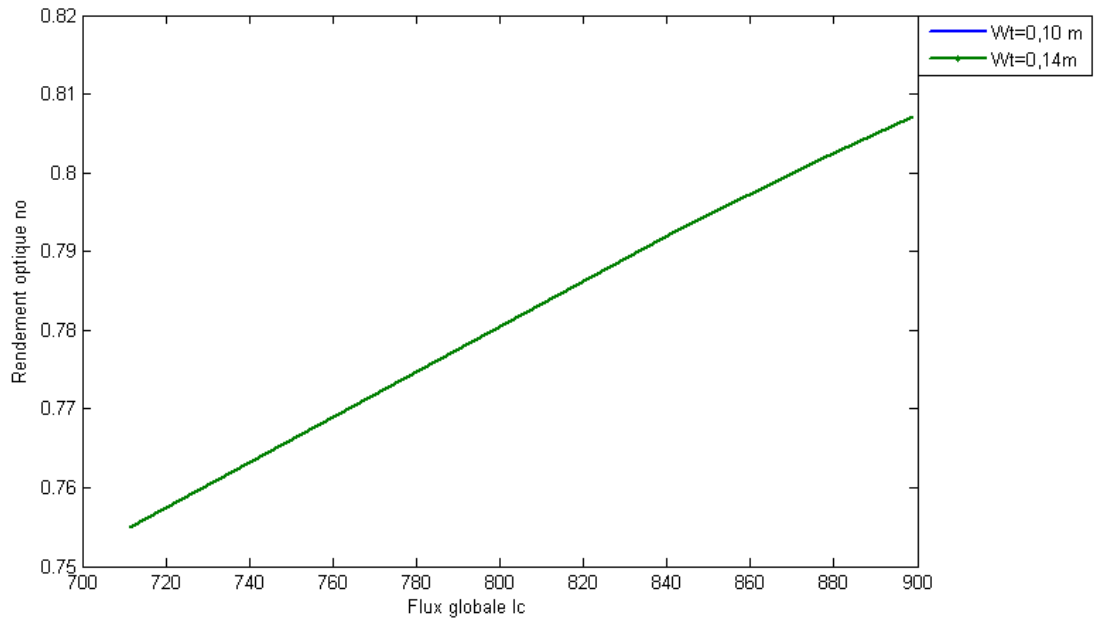




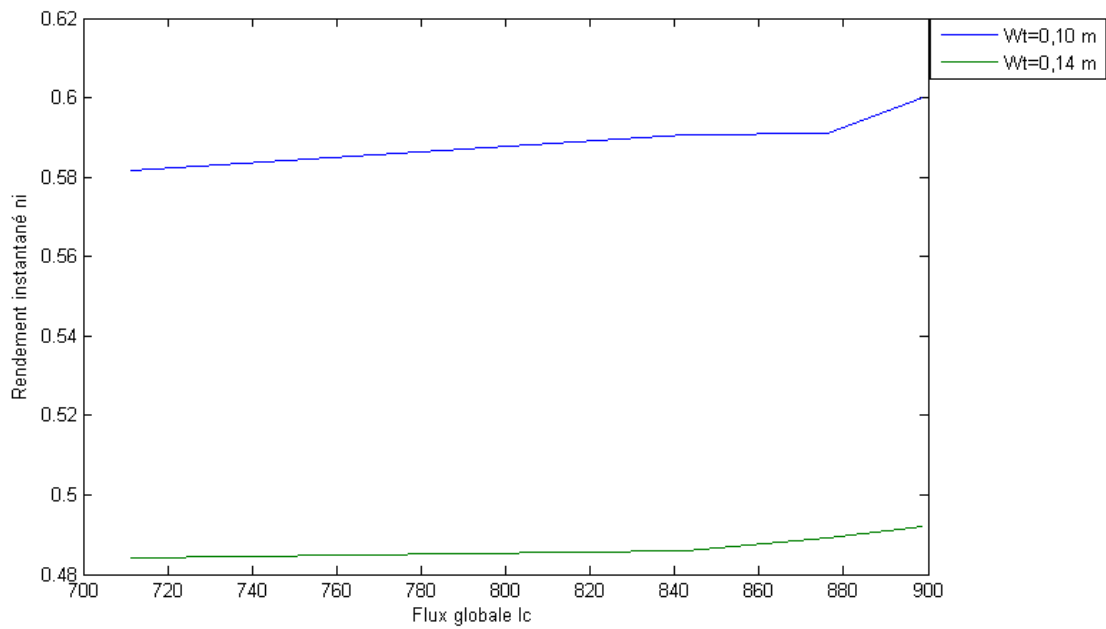
GRAPHE 11 : Influence de la conductivité de l'isolant (K) sur le rendement instantané  $\eta_i$



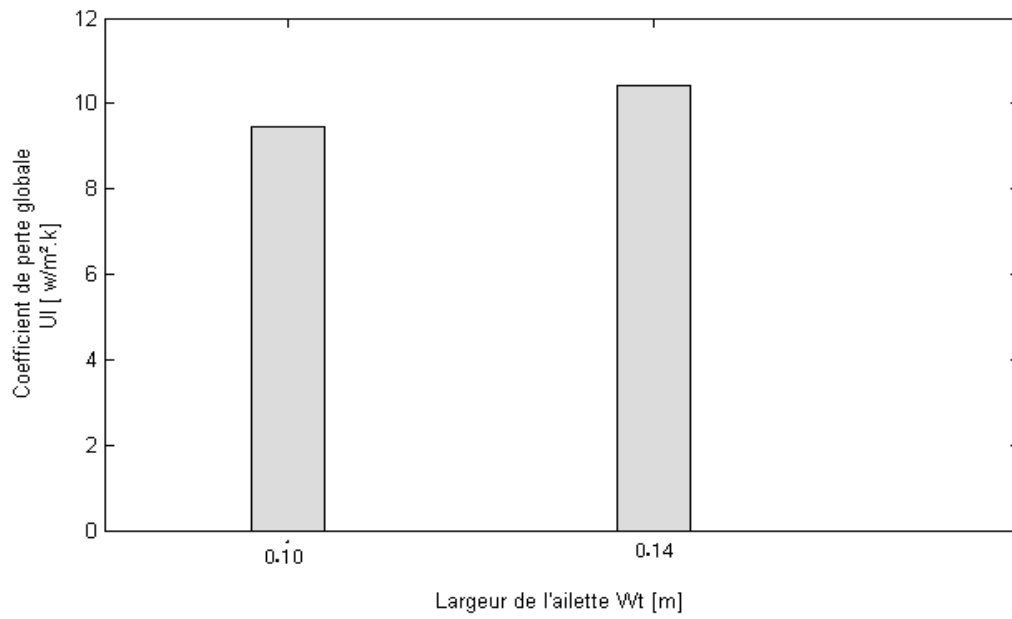
GRAPHE 12 : Influence de la conductivité de l'isolant (K) sur coefficient de perte globale (UI)



GRAPHE 13 : Influence de largeur des ailettes (wt) sur le rendement optique  $\eta_0$



GRAPHE 14 : Influence de largeur des ailettes (Wt) sur le rendement instantané  $\eta_i$



GRAPHE 15 : Influence de la largeur de l'ailette ( $W_t$ )  
sur coefficient de perte globale ( $UI$ )

### 3. Interprétation des résultats :

#### ➤ Influence des types des couvertures:

Sur le (GRAPHE 1),(GRAPHE 2) sont portées les évolutions du rendement optique et instantané en fonction du flux global. Les rendements optique et instantané diminuent lorsque le coefficient d'extinction de la couverture (verre blanc ( $k_e=4\text{m}^{-1}$ ), plastique ( $k_e=32\text{m}^{-1}$ )) augmente. (GRAPHE 3) montre que le coefficient d'extinction de vitrage n'a pas une influence importante sur le coefficient de perte globale. Nous remarquons que le capteur à couvercle de verre blanc ( $k_e=4\text{m}^{-1}$ ) est le plus performant.

#### ➤ Influence du nombre de vitrage $N_v$ :

Dans un capteur plan sans vitrage ( $N_v=0$ ) le rendement optique est plus élevé qu'un capteur plan avec un seul vitrage ( $N_v=1$ ) et le rendement dans ce dernier est plus élevé que pour un capteur double vitrages ( $N_v=2$ ) (GRAPHE 4). Contrairement quand le nombre des vitres augmente le rendement instantané diminue (GRAPHE 5).

Sur le (GRAPHE 6) nous remarquons que lorsqu'on augmente le nombre de vitrage le coefficient de perte globale diminue. Nous estimons que le capteur à double vitrages ( $N_v=2$ ) est le plus performant.

#### ➤ Influence sur les types des absorbeurs :

L'évolution de la conductivité d'absorbeur dans un capteur solaire plan n'a pas d'influence sur l'évolution du rendement optique (GRAPHE 7), par contre le rendement instantané augmente (GRAPHE 8) quand la conductivité d'absorbeur augmente.

Sur le (GRAPHE 9) nous remarquons qu'on augmente la conductivité de l'absorbeur le coefficient de perte globale diminue. Nous distinguons que le capteur à absorbeur de cuivre ( $\lambda=380\text{W/m.k}$ ) est plus performant que l'absorbeur en aluminium ( $\lambda=204\text{W/m.k}$ ) et acier ( $\lambda=45\text{W/m.k}$ ).

➤ **Influence sur les types des isolants:**

Le rendement optique n'est pas influencé par l'évolution de la conductivité de l'isolant (GRAPHE 10).

L'utilisation de la forte conductivité de l'isolant entraîne une augmentation du rendement instantané de capteur (GRAPHE 11).

Sur le (GRAPHE 12) nous remarquons qu'on augmente la conductivité de l'isolant (K) le coefficient de perte globale augmente.

Nous estimons que le capteur dont la plus faible conductivité de l'isolant (mousse de polyuréthane  $k=0.023\text{W/m.k}$ ) est le plus performant.

➤ **Influence sur la largeur des ailettes:**

Le rendement optique n'est pas influencé par l'évolution de la largeur des ailettes ( $W_t$ ) (GRAPHE 13). **Lorsque la largeur des ailettes augmente le rendement instantané diminue (GRAPHE 14).**

Sur le (GRAPHE 12) nous remarquons quand la largeur des ailettes augmente le coefficient de pertes globales augmente aussi, donc le capteur plan qui a la plus faible largeur des ailettes ( $w_t=0.1\text{m}$ ) est le plus performant.

### *Conclusion générale*

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Un choix centralisateur nous amène souvent à privilégier plusieurs sources énergétiques, sans véritablement analyser le bien-fondé de cette attitude. Dans ce mémoire, nous avons utilisé l'énergie la plus appropriée à l'usage. (Le solaire). Cette source énergétique a des avantages planétaires, on cite à titre d'exemple:

- ✓ le coût de son extraction (le soleil est gratuit !).
- ✓ le caractère renouvelable.
- ✓ l'impact sur l'environnement

Ces études montrent qu'il est possible d'exploiter le soleil dans plusieurs applications notamment dans l'habitat, le chauffage de l'eau et le séchage solaire. C'est pourquoi elles se sont plutôt focalisées sur quelques dispositifs solaires. En ce qui concerne les systèmes thermiques à eau, des modèles simplifiés de capteur solaire plan à eau ont été sélectionnés. On peut dire que le chauffe-eau solaire valorise en toute sécurité une énergie naturelle, propre, et inépuisable et évite le rejet dans l'atmosphère de l'oxyde de carbone:

- ✓ l'eau produite à bonne température (de l'ordre de 45 à 60°)
- ✓ Son coût est très abordable.

Les résultats de notre étude montrent que l'efficacité du capteur solaire plan à eau est importante quand on a une diminution de coefficient d'extinction de vitrage et une amélioration de la conductivité de la plaque absorbante, une réduction de la conductivité de l'isolation et une bonne étanchéité pour **démin** les pertes thermiques (pertes latérales et pertes vers l'arrière), le nombre de vitrage joue un rôle très important à la diminution des pertes par rayonnement (pertes vers l'avant).

Enfin, nous estimons atteindre les objectifs qui nous ont été assignés à savoir : étudier, analyser, modéliser et valoriser un capteur solaire plan à eau avec les connaissances acquises, et il reste à d'autres étudiants de tirer le meilleur de nos résultats et de l'utiliser comme base de départ pour d'autres sujets.

- [1] **Saadi Souad** : effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan ;Thèse de magistère;UniversitéMentouri de Constantine ; (2010).
- [2] **Z.Sen** :Solar energy fundamentals modeling techniques ; Springer ; (2008).
- [3] **R.Bernand ;G.meugry ;Schwartz** :Le rayonnement solaire ; conversion thermique et applications techniques et documentation;(1979).
- [4]**J.A .Duffie;A.Beckman**: solar engineering of thermal processes; John Wiley and Sous; (1980).
- [5] **A.Sefeir ;G.Guarracino**: Ingénierie des systèmes solaires; Technique et documentation; paris; (1981).
- [6]**CH.perrin de Brichambant; C.Vauge** : Le gisement solaire ; technique et documentation paris; (1982).
- [7] **Legault; Jaun-luc** : chromosphère; les éditions CEC p.127 ; (2008).
- [8]**J.Bonal ; P.Rouse Hi** : les énergétiques alternatives omnisciences; (2007).
- [9] **Centre de Calcul Des Energies Renouvelables Bouzeriah (CDER)**.
- [10] **P, H, Communay**; Héliothermique : le gisement solaire; méthodes et calculs; Groupede Recherche et d'Edition;France ; (2002).
- [11] **N, Bellel** : Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau typecollecteur; thèse de magistère; Université de Constantine ; (1989).
- [12] **O, Sotehi**: Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère; Université de Constantine ; (2009).
- [13] **MajidGhassemi;Alma Cota andRobert Fosteréb**; " Solar Energy:Renewable Energy and the Environment"; (2010).
- [14]**Michel Capderou** : Atlas Solaire de l'Algérie; EPAU; Tome (I, II); (OPU, 1985,1988).
- [15]**Azzi. A** : cours de TEC 324 : Energie solaire; université de Tlemcen; faculté de Technologie; département de génie mécanique; (1990-2000).
- [16]**Korti Abdel Illah Nabil**, Transfert de chaleur (cours et exercices corrigés);Université Abou BakrBelkaid Tlemcen; Faculté de technologie, Département de Génie mécanique;Première Edition (2012).

[17] **Mamouri Mohamed;GoualAbdessamad**: Elaboration d'un logiciel en vue d'une contribution aux calculs des performances d'un capteur solaire plan à air; Mémoire de l'ingénieur;Université Abou BakrBelkaid Tlemcen;(1999-200).

[18] **D, K, Edwards** : Capteurs solaires; Edition SCM; paris ; (1979).

[19] **Association Gaïa-Energie, Site web sur Internet** :  
<http://perso.orange.fr/f5zv/AMIS/GAIA/GA04/GA04A07.html>.

[20] **Raytek (société) Site web sur Internet** :  
<[http://www.raytek.fr/cat.html?cat\\_id=4.4](http://www.raytek.fr/cat.html?cat_id=4.4)>

[21] **Saint Gobain Glass**

[22] **J.P. Carbonnel, Octobre 1995, Site web sur Internet** :  
<<http://www.cig.ensmp.fr/~hubert/glu/FRDIC/DICSTATI.HTM>>

[23] **J, Desautel** : Les capteurs héliothermiques; Edisud; (1979).

[24] :**C.RIGOLLIER ,O.RAVER and L.WALD**:,'on the clear sky model of ESRA –European solair Radiation Atlas-with respect of the HELIOSAT method ' solair energy 12(3), 333-345-(1969).

[25]**N.MOUMMI**,''prévisions systématiques et optimisation des performances des capteurs solaires plans à air dans divers sites de climat méditerranéen ou sahariens et avec ou sans altitudes'' Thèse de doctorat ;(1994).

[26] **P.CHOUARD,H.MICHEL et M.F.SIMON** ''Bilan thermique d'une maison solaire'' Edition Eyrolles ;(1979).

[27]**R.MARCHAL**,'' Transmission de la chaleur par convection dans les tubes'' Edition Eyrolles ;(1979).

[28]**M.DAGUENET**, ''les séchoirs solaires thermiques et pratiques'' U.N.I.S.C.O, Edition ;(1986).

[29]**JOHN.A.DUFFIEet WILLIAM.A.BECKMAN**, ''Solarenergy thermal process'' WILEY-interscience-Edition;(1980).

[30]**O.NIELSSON, A.FRANSEN et O.SANDBERG** ,''In aerogels'' Edition by J.Frink, springerVerlag/Belin, Heideiberg;( 1986.)



[31] **R.CAPS et J.FRINCKE**, ''Infraredradiative heat transfer in highly transparent silica aerogel'' Solar energy Vol 36,N°0L,pp13-15;(1988 ).

[32] **J.M.Chasseriaux** ''Conversion thermique du rayonnement solaire''

DUNOD, février ;(1984).

[33] **M.Fekkar et C.Merad**, ''Etude comparative des performances instantanées de trois types de capteur solaire plans à eau'' Mémoire d'ingénieur d'état;(1998).