

## I. Introduction :

Dans ce chapitre en voie bien que selon la source du gisement dont on dispose, on peut répertorier toutes formes d'énergies en quatre grandes catégories : « les énergies fossiles, les énergies renouvelables, les énergies nouvelles et les énergies fatales ». Les premières ne sont pas des énergies renouvelables on a le pétrole, le gaz naturel, et le charbon, et fossiles non renouvelables qui se sont accumulées dans l'écorce terrestre au cours des ères géologiques, du fait de processus biologiques ou physico-chimiques.

Et les énergies Renouvelables ; Comme leur nom l'indique ce sont des sources inépuisables d'énergies offertes par la nature Elle-même et dont la maîtrise garantirait largement l'autonomie de la planète. On y trouve l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie géothermique, l'énergie marémotrice, l'énergie de la biomasse. la première source peut trouver 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

On trouve qu'il ya des systèmes de captation pour récupérer cette forme d'énergie, et leurs applications de différentes sortes.

L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est à l'origine de la quasi-totalité des sources d'énergies utilisées par l'homme.

Lorsque l'énergie lumineuse (photons) rencontre de la matière, celle-ci transforme une partie en chaleur. C'est ce qu'on appelle la conversion photo thermique, et c'est sur ce principe que sont basés les procédés de capteur plan solaire

L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photothermique
- Capteur solaire photovoltaïque

### I.1. Caractéristiques du soleil :

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de sépare de Cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1], [3].

Sur le plan humain, le soleil a une importance primordiale car il est à l'origine de la vie sur terre, en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie, qui permet la présence de l'eau à l'état liquide et la photosynthèse des végétaux. Le rayonnement solaire est aussi responsable du climat et des phénomènes météorologiques [1].

**I.1.1. Présentation générale :**

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chauds qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus [1], [4].

Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil [1], [4].

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

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$2.10^{30}$
Surface (km <sup>2</sup> )	$6.09.10^{12}$
Volume (km <sup>3</sup> )	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$

**Tableau I.1.** Caractéristiques principales du soleil

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

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25.10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes [5], [6] :

- Une température de  $15.10^6$  °C.
- Une densité est de 1015 kg/m<sup>3</sup>.
- Une pression de 109 ATM.

- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [6], [7] :

- Une épaisseur de 244160 km.
- Une température variant de  $10.10^6$  °C à  $50.10^4$  °C.

- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection Turbulente, elle présente les propriétés suivantes [5], [6] :

- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [8] :

- La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
- Une épaisseur de 500 km.
- Une pression de 1/100 ATM.

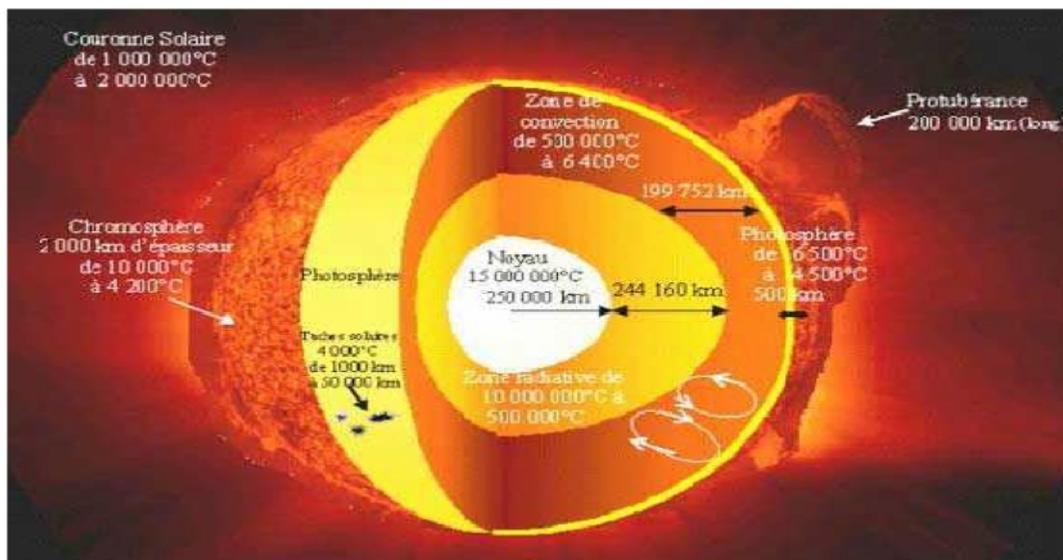
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [7], [8] :

- Une épaisseur 2000 km.
- Une température augmentant de 4200 °C à 10<sup>4</sup> °C.

- La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [6] :

- Elle est sans limite précise.
- La température augmente de 10<sup>6</sup> °C à 2.10<sup>6</sup>°C.

La figure I.1 montre la structure du soleil.



**Figure I.1.** Structure du soleil

a) **L'intérieur** : est un réacteur de fusion nucléaire continue. La principale réaction considérée la plus importante est la fusion de quatre atomes d'hydrogènes qui fournissent une molécule d'hélium ; la masse de l'hélium est inférieure à la masse de quatre atomes d'hydrogène, de la masse donc perdue dans la réaction et converti en énergie. C'est dans cette région qu'est créée l'énergie qui est ensuite totalement absorbée par les couches extérieures. La température atteint des millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphères [12].

La réaction de fusion s'écrit :



### I.1.2. Evolution :

Pendant les cinquantes premiers millions d'années de son existence, le soleil s'est contracté jusqu'à atteindre approximativement sa taille actuelle. L'énergie gravitationnelle libérée par ce mouvement a chauffé l'intérieur de l'astre et, lorsque le noyau s'est révélé suffisamment chaud, la contraction a cessé pour laisser place à la réaction de fusion thermonucléaire [4].

La durée de vie du soleil dépend de la quantité d'hydrogène qui reste à consommer, on estime qu'il existe depuis environ 4.5 milliards d'années, et subsistera, tel qu'il est, pendant au moins encore 5 milliards d'années [4].

Lorsque le soleil aura épuisé ses réserves d'hydrogène, il changera de structure. Sa surface externe s'étendra au-delà de l'orbite actuelle de la terre ou il se transformera en une géante rouge, légèrement plus froide en surface qu'actuellement, mais 10 000 fois plus brillante en raison de sa taille gigantesque. Le soleil demeurera une géante rouge, brûlant l'hélium dans son noyau, pendant un demi-milliard d'années seulement, après ce stade, le noyau résiduel du soleil s'effondrera pour former une étoile naine blanche petite de la taille de la terre environ, il se refroidira alors lentement pendant plusieurs milliards d'années [4].

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



Figure I.2. Cycle de vie du soleil

**I.1.2.A. Géométrie solaire :**

**I.1.2.A1.Le système terre-soleil : [1]**

Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d’hydrogène et D’hélium, dont le diamètre atteint environ 1.4 million de km.

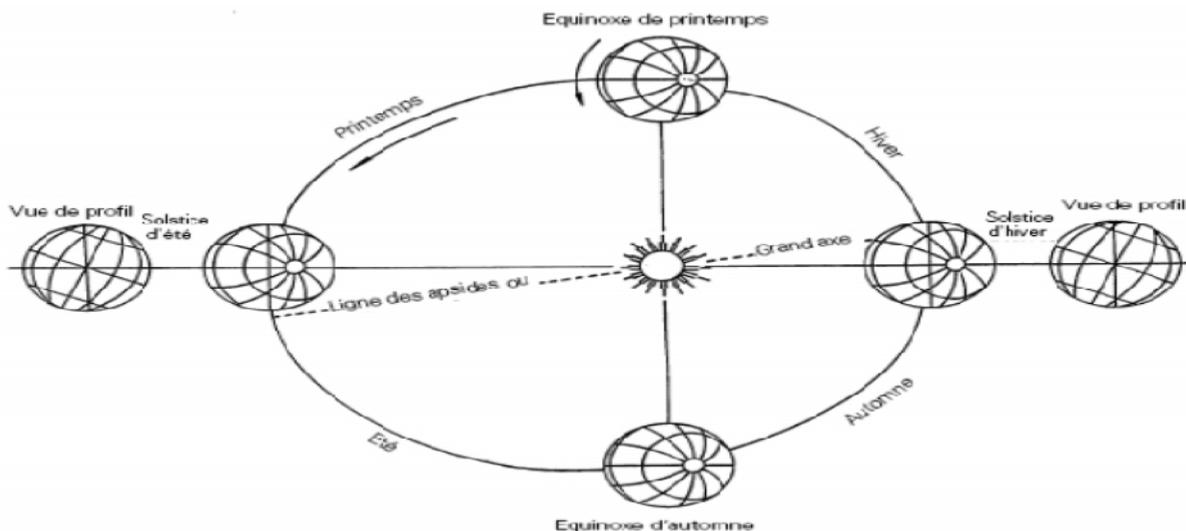
La terre décrit autour du soleil une trajectoire légèrement elliptique dont le soleil Occupe l’un des foyers. Sa distance moyenne est de 149.6 millions de km, avec une variation De  $\pm 1.7\%$ .

La terre traverse le grand axe de l’ellipse le 2 janvier (position la plus proche) et le 2 juillet (la plus éloignée du soleil). Depuis la terre, le diamètre apparent du soleil est vu sous un angle de  $0.5^\circ$ .

L’axe de rotation de la terre sur elle-même est incliné de  $23^\circ 27'$  par rapport au plan de l’écliptique (plan de l’orbite terrestre). On appelle déclinaison l’angle formé par l’axe terre soleil, avec le plan de l’équateur à un moment donné de l’année. La déclinaison ‘d’ vaut donc  $+ 23^\circ 27'$  au solstice d’été,  $- 23^\circ 27'$  au solstice d’hiver, et est nulle aux équinoxes. Dans L’approximation d’une trajectoire circulaire, la déclinaison s’écrit, pour chaque jour de L’année :

$$\sin \delta = 0,4 \cdot \sin t \tag{2}$$

Où : t désigne la coordonnée angulaire de la terre en prenant l’équinoxe de printemps pour Origine.



**Figure. I.2.a:** Plan de l’écliptique L’orbite terrestre et les saisons

**I.1.2.A2. Unités utilisées :**

**a/ L'éclairement :** est défini comme une puissance reçue par une surface. Il s'exprime en  $W/m^2$  (watt par mètre carré). Le S.I. (système international d'unités) recommande d'utiliser le symbole E.

**b/L'irradiation ou rayonnement :** est l'énergie reçue par une surface. Elle s'exprime En  $J m^{-2}$  (joule par mètre carré). L'ISES (International Solar Energy Society) recommande le Symbole H. D'autres unités plus courantes sont le  $Wh/m^2$  (wattheure par mètre carré).

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne Terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à  $1367 W/m^2$ .

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de  $1000 W/m^2$  et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à  $1000 W/m^2$ .

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de  $45^\circ$  par rapport au zénith).

Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct. [2]

**C/Constante solaire :**

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance solaire-terre. Cette distance varie quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même de la puissance reçue par la surface en Question. [3][10]

On appelle la constante solaire noté  $C^*$ , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère terrestre.

Ou :  $C^*$  est la quantité d'énergie totale envoyée par le soleil à la limite de l'atmosphère Terrestre sur une surface unité perpendiculaire au rayonnement solaire [10].

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [6]:

$$C^* = C^* + 0.033 \times \cos (0.948 \times n) \tag{3}$$

$C^*$  : la constante solaire.

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

$n$ : le numéro du jour de l'année.

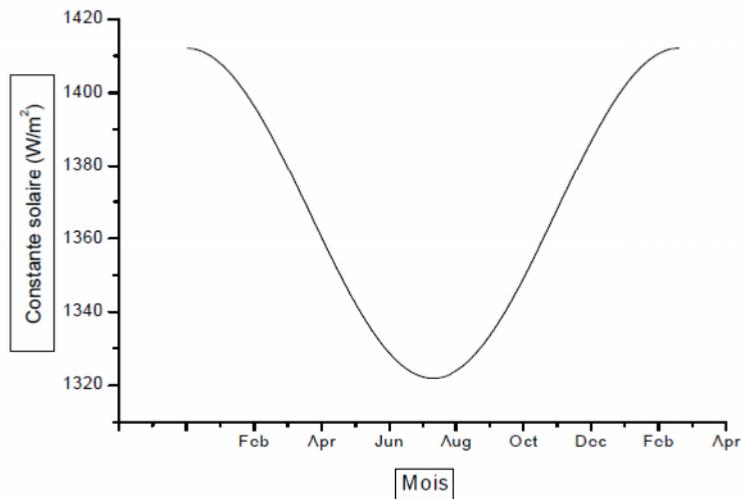


Figure I.3. Variation mensuelle de la constante solaire [6]

Date le 1 <sup>er</sup>	Puissance surfacique W/m <sup>2</sup>	écart relatif en % / C*
janvier	1399	+3.40
Février	1394	+3.03
Mars	1379	+1.92
Avril	1354	+0.07
Mai	1333	-1.48
Juin	1312	-3.03
Juillet	1308	-3.33
Août	1312	-3.03
septembre	1329	-1.77
Octobre	1350	-0.22
Novembre	1373	+1.48
Décembre	1392	+2.88

Tableau I-3.a : Valeur du flux solaire à la limite de l'atmosphère terrestre. Ecart relatif Par rapport à la constante solaire  $C^* = 1353 \text{ W/m}^2$ .

### I.1.3. Données astronomiques

#### 1. La latitude du lieu : [4]

L'angle de latitude est l'angle entre une ligne tracée d'un point sur la surface de la terre avec le centre de cette dernière, et le cercle équatorial de la terre. L'intersection du cercle Équatorial avec la surface de la terre forme l'équateur, est indiquée en tant que latitude de  $0^\circ$ , le pôle nord par latitude  $+90^\circ$  et le pôle sud par la latitude  $-90^\circ$ .

Cette convention de signe affecte le signe (+) à tous les lieux de l'hémisphère nord et le signe (-) tous les lieux de l'hémisphère sud. La latitude sera désignée ici par lettre ( $\varphi$ ), et peut ainsi être composée entre  $-90^\circ$  et  $+90^\circ$ .

Pour la ville de Tlemcen la latitude est environ  $35^\circ 28' N$ .

#### 2. Longitude :

La longitude d'un lieu correspond à l'angle formé par deux plans méridiens (passant par l'axe des pôles), l'un étant pris comme origine (méridien de Greenwich  $0^\circ$ ) et l'autre déterminé par le lieu envisagé.

La longitude d'un lieu peut aussi être comprise entre  $-180^\circ$  et  $+180^\circ$ , à tout écart de  $1^\circ$  de longitude correspond à un écart de 4 minutes de temps.

On affecte du signe (+) les méridiens situés à l'est de ce méridien, et du signe (-) les méridiens situés à l'ouest.

Pour Tlemcen, la longitude est de  $-1^\circ 17'$ .

#### 3. L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer).

Pour la ville de Tlemcen la latitude est environ 750m.

### I.2. L'énergie solaire :

#### I.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.

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  $3.7.10^{26}$  j/s.

### I.2.2. Caractères particuliers :

L'énergie solaire est la seule source d'énergie externe de la terre, elle présente les propriétés suivantes [9]:

- 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  $10^4$  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.

### I.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 :

La 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 [9], [19].

Trois types principaux de centrales sont utilisés [9]:

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

#### • L'énergie solaire photovoltaïque :

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque [9].

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 onéreux [9].

### I.3. Le rayonnement solaire :

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10 les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et 8µm [7].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [8].

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

Longueur d'onde (µm)	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Pourcentage (%)	6.4	48	45.6
Energie (W/m <sup>2</sup> )	87	656	623

**Tableau I.3.b.** Répartition spectrale du rayonnement thermique [6]

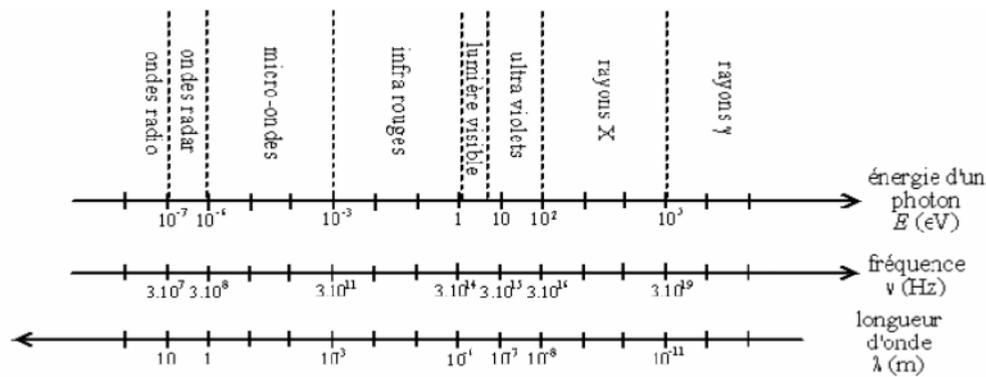


Figure I.5 Spectre Solaire [6]

### I.3.1. Composante du rayonnement solaire

Le rayonnement qui nous parvient du soleil est émis par sa surface extérieure dont la température est d'environ 6000 °K. A une telle température, 40% de l'énergie est émise dans le domaine visible, c'est-à-dire dans une gamme de longueur d'onde allant de 0,3 μm (violet - bleu) à 0,7 μm (rouge). La décomposition du rayonnement solaire peut être réalisée en projetant un faisceau lumineux sur un prisme de verre ou sur un réseau de diffraction. Tout un éventail de couleurs apparaît, du bleu au rouge en passant par le vert et le jaune.

Chacune de ces couleurs est associée à un rayonnement d'une certaine longueur d'onde. William Herschell (Vers 1800) qui étudiait le rayonnement solaire, avait placé un thermomètre derrière un tel prisme. Il s'aperçut qu'il indiquait une élévation de température (et donc qu'il recevait de l'énergie) non seulement dans le domaine visible mais également dans la région au de là du rouge. Ce fut la découverte du rayonnement infrarouge qui représente 50% du rayonnement émis par le soleil. Les 10% restant du rayonnement solaire total sont émis à l'opposé du domaine visible, à des longueurs d'onde plus petites que celles du violet (l'ultra violet). [17]

Tableau Emission du rayonnement solaire

Longueurs d'onde constituant le rayonnement solaire température 6 000 K		
domaine ultraviolet inférieure à 0,3 μm (violet-bleu)	domaine visible de 0,3 μm (violet-bleu) à 0,7 μm (rouge)	domaine infrarouge au delà de 0,7 μm (rouge)
10%	40%	50%

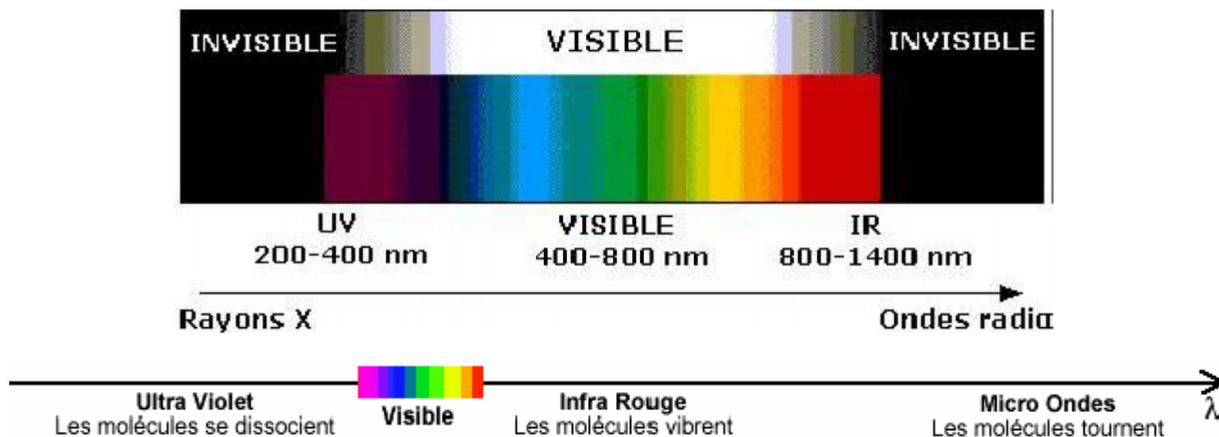
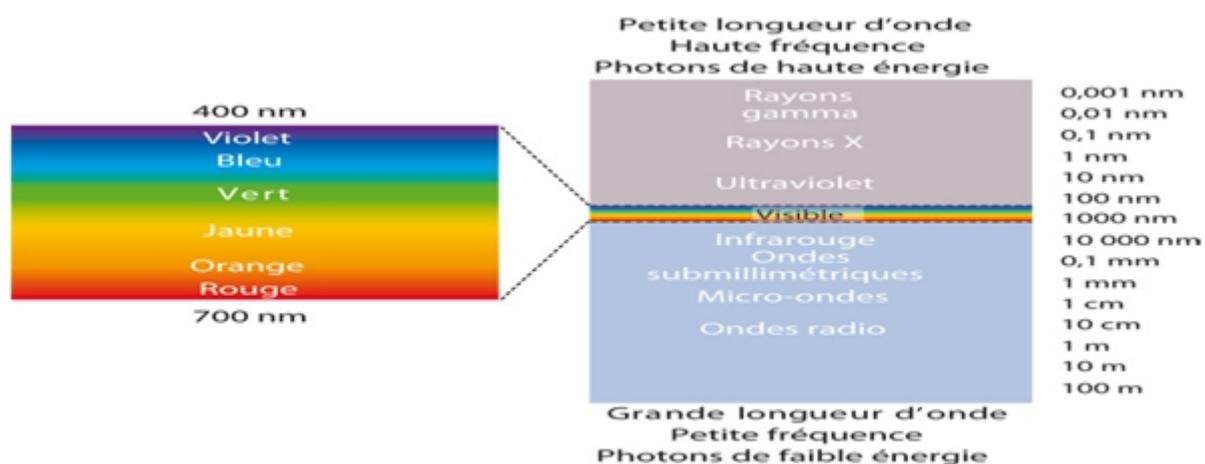


Figure.6. Répartition du rayonnement solaire



Le rayonnement solaire au sol se divise en plusieurs rayonnements, directs, diffus, réfléchis et globale ; a partir des conditions physiques quelque soit l’atmosphère (les caractéristique de l’atmosphère soit massique ou thermique).à travers l’année.

**I.3.1. Le rayonnement solaire direct :**

C’est le rayonnement solaire qui se forme de rayons parallèles provenant du soleil sans avoir été dispersé par l’atmosphère

Le rayonnement direct est le rayonnement incident sur un plan donné en provenance d’un petit angle solide centré sur le disque solaire, il parvient en ligne droite et par temps clair [11].

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

La transmissivité totale de l’atmosphère pour le flux solaire incident direct est donnée par [12]:

$$I_{dir} = a \times \exp\left(\frac{-p \times b}{1000 \times \sinh}\right) \quad (4)$$

Où:

a, b: coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h: hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

**Tableau I.3.c. Valeurs des coefficients du trouble atmosphérique [10]**

Le tableau I.4 donne la variation 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.4. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [10]**

Le rayonnement direct reçu sur un plan horizontal est donné par [8] :

$$G_{dirh} = C^* \times \tau_{dir} \quad (5)$$

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

L'éclairement énergétique  $G_{dir}$  reçu sur un plan incliné est donné par [12]:

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos \theta \quad (6)$$

$\theta$  : angle d'incidence des rayons solaires.

### I.3.2. Le Rayonnement solaire diffus

C'est une partie du rayonnement du soleil qui a subi de multiples réflexions (dispersion) par les molécules et les aérosols de l'atmosphère ; pour un observateur au sol, le rayonnement diffus est un ensemble des directions rayonnées

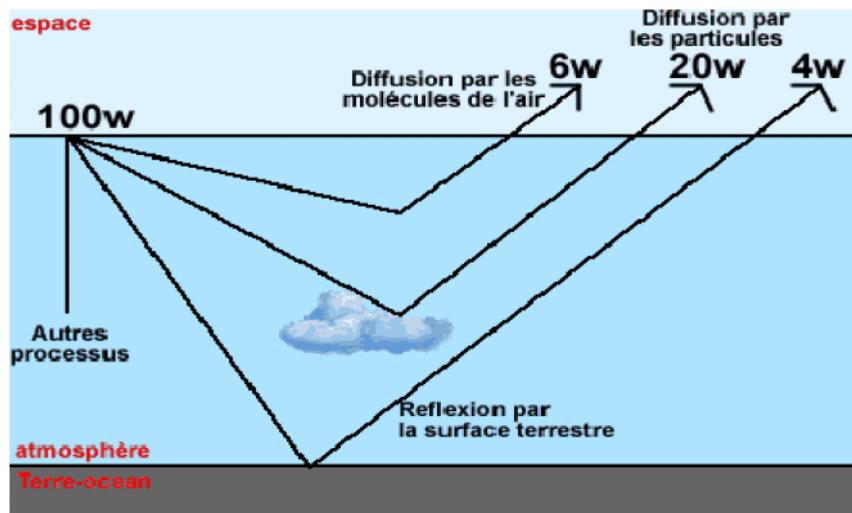


Figure. I.7. représentation des rayons diffus avec la puissance.  
Solaire incidente de 100watts

Le rayonnement diffus résulte de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et de sa réfraction par le sol, il parvient de toute la voûte céleste [11].

La relation entre le coefficient de transmission du flux direct et diffus est [12]:

$$\text{dif} = 0.272 - 0.2939 \times \text{dir} \quad (7)$$

Le flux diffus reçu sur un plan horizontal est défini par [12]:

$$\text{Gdifh} = C^* \times \sin(h) \times \text{dif} \quad (8)$$

Le flux diffus reçu sur un plan incliné est défini par [12]:

$$\text{Gdif} = \text{gdif1} + \text{gdif2} \quad (9)$$

$$\text{Gdif1} = \text{Gdifh} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (10)$$

$$\text{Gdif2} = \text{alb} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \times (\text{Gdifh} \times \sin(h) + \text{Gdifh}) \quad (11)$$

Gdif1, Gdif2: rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

Alb : albédo du sol.

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

➤ **L'albédo :**

L'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

$$\text{Albédo} \quad \text{Alb} = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie recue}} \quad (12)$$

Ainsi pour un corps noir parfait, l'albédo est nul.

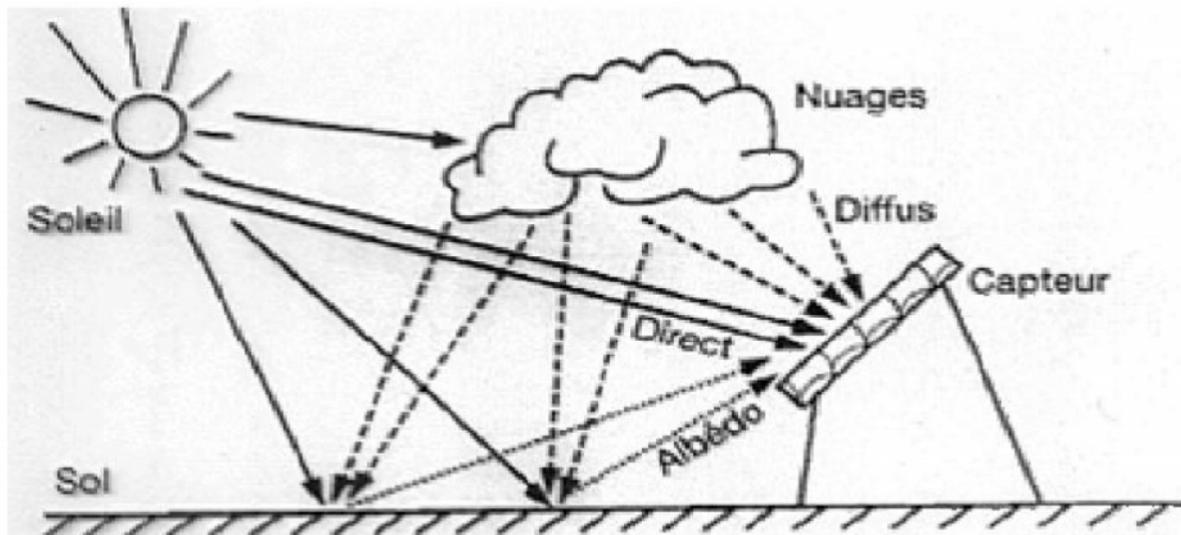


Figure1.7.a.Schéma descriptive

### I.3.3.Le Rayonnement solaire réfléchi

C'est le rayonnement qui provient du sol par suite à la réflexion. Cette composante dépend de la nature du sol et de sa couleur.

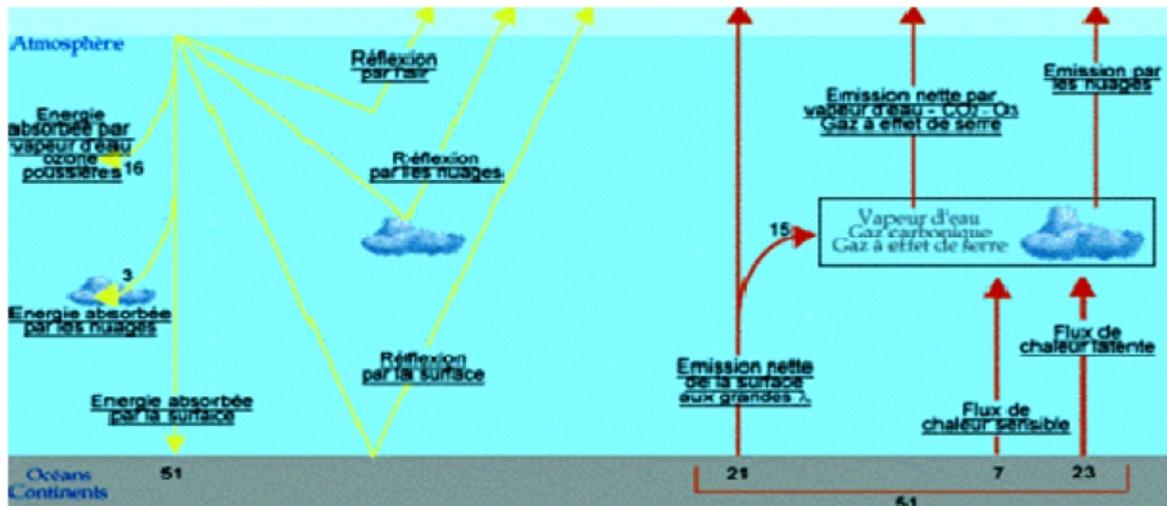


Fig. I.8. Composante du rayonnement solaire incident [12]

### I.3. 4. Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement global (G) est la somme des rayonnements diffus et direct [11]:

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (13)$$

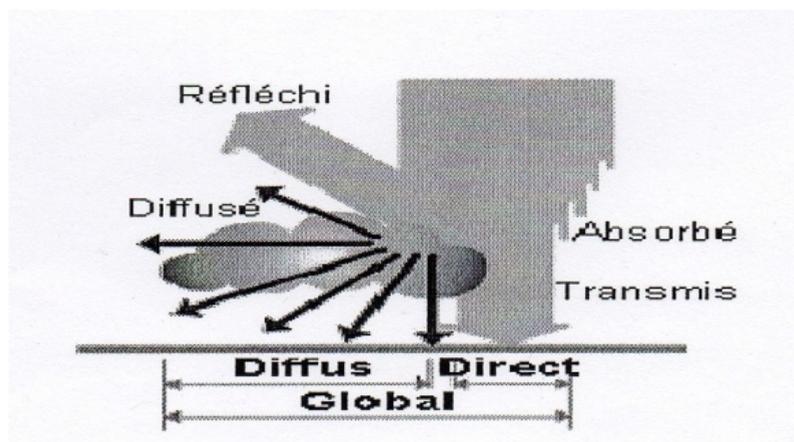


Figure 1.9. Composantes du rayonnement solaire reçu au niveau du sol terrestre.

La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus constitue le rayonnement solaire global.

Le rayonnement solaire global est composé de rayonnement de différentes longueurs d'onde et intensités figure 1.2.

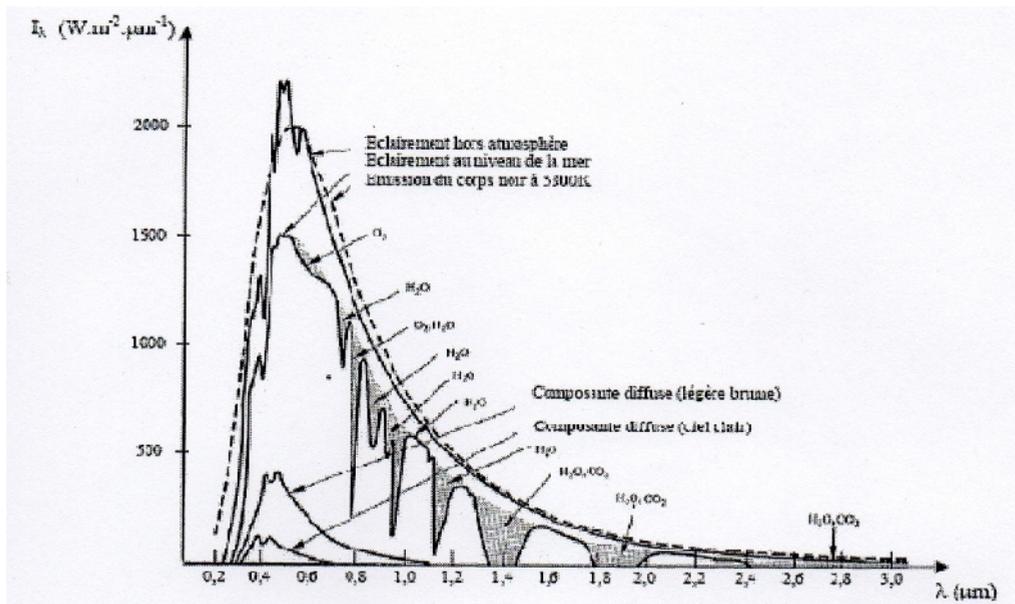


Figure 1.10. Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre [1]

Le maximum d'intensité a lieu dans le rayonnement visible, soit pour une longueur d'onde de 0.5μm.

L'énergie totale est pratiquement émise pour des longueurs d'onde situées entre 0.2 et 3.0μm. La surface située sous la courbe représente la constante solaire.

Cette énergie émise est échangée avec la terre ou avec tout corps au niveau du sol terrestre et se traduit par une sensation de chaleur. L'échange de chaleur attribué à l'émission d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprise entre 0.1 et 100μm, par la matière du fait de sa température, est appelé rayonnement thermique. Il ne nécessite pas la présence d'un milieu intermédiaire matériel et obéit aux lois du rayonnement thermique.

### I.3.5. La transmission :

C'est la soustraction de flux incident et la somme de flux réfléchi, absorbé, t.

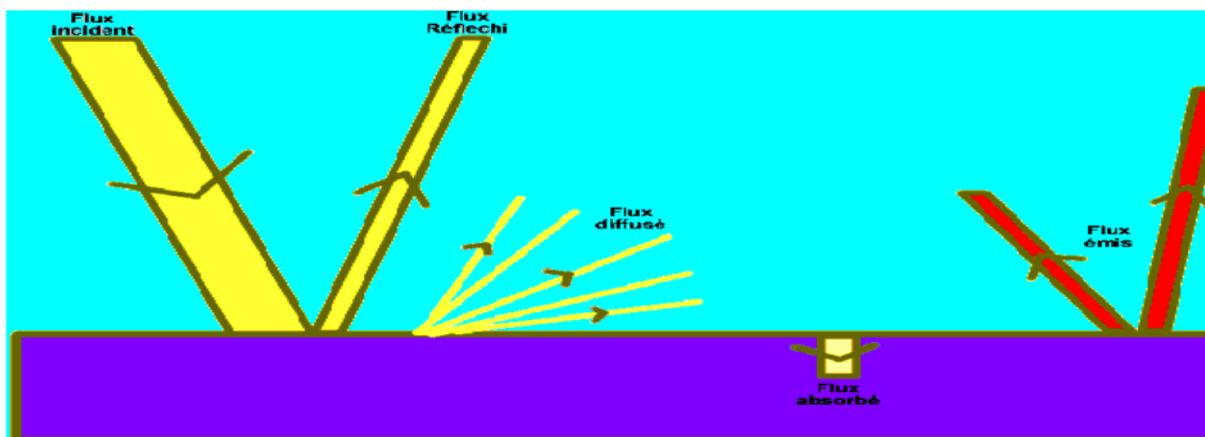


Figure. I.11. Composition du flux rayonnant [19]

**I.4. Calcul de la position du soleil :****I.4.1. Les paramètres de position :****1.4.1. A. Les coordonnées géographiques :**

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques [8],[9], [15]:

- La longitude (  $\lambda$  ) est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu avec la méridienne origine de Greenwich, elle varie de  $-180^\circ$  à  $+180^\circ$  de l'ouest à l'est.
- La latitude (L) est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le Centre de la terre à ce lieu, elle varie entre  $+90^\circ$  au pôle Nord et  $-90^\circ$  au pôle Sud.
- L'altitude (Z) correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de Référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

La détermination de la direction du soleil sur la sphère céleste se fait par des Coordonnées célestes du soleil qui sont :

**1.4.1. B. Les coordonnées célestes horizontales :**

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [8], [15]:

- L'azimut (a) est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (figure I.5). Il est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{Sin (a) = cos (d) \times \frac{sin (w)}{sin (h)}} \quad (14)$$

- La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (figure I.5), elle est donnée par la formule [8], [15]:

$$\mathbf{Sin (h) = sin (L) \times sin (d) + sin (L) \times cos (d) \times cos (w)} \quad (15)$$

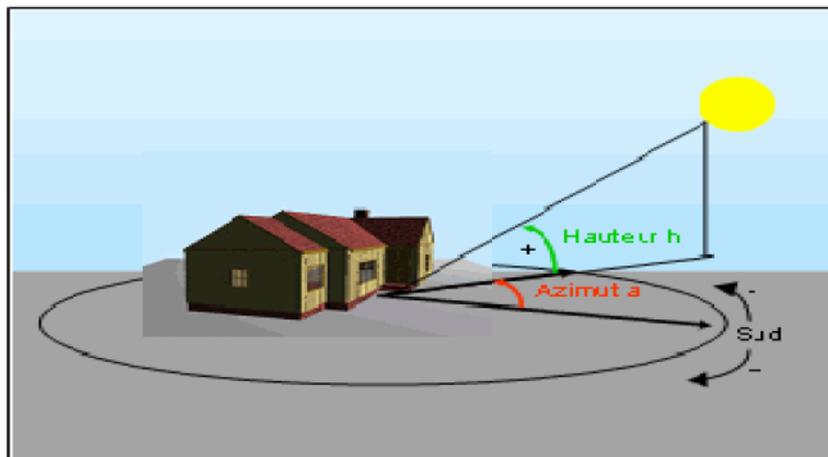


Figure I.12. Les coordonnées célestes horizontales

1.4.1. C. Les coordonnées célestes horaires :

- L'angle horaire ( $\omega$ ) est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de  $15^\circ$  par heure [1], [8], [11].
- La déclinaison ( $d$ ) est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil. Elle varie suivant l'équation de Cooper (figure I.6) [6] :

$$d = 23,45 \times \left( \frac{360}{365} \times (n - 81) \right) \quad (16)$$

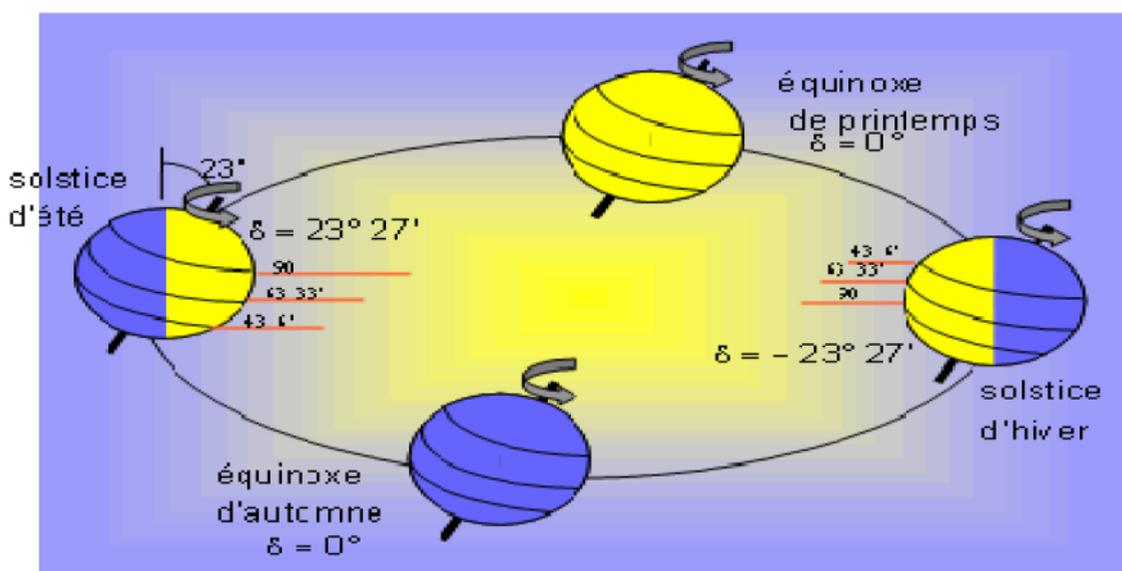


Figure I.13. Variation annuelle de la déclinaison solaire

**I.4.2. Les paramètres de temps :**

On distingue :

- Le temps solaire vrai (TSV) est l'angle horaire entre le plan méridien passant par le centre du soleil et le méridien du lieu considéré, il est donné par l'expression:

$$\mathbf{TSV} = \mathbf{12} + \frac{\mathbf{w}}{\mathbf{12}} \quad (17)$$

- Le temps solaire moyen (TSM) est donné par [1]:

$$\mathbf{TSV} - \mathbf{TSM} = \mathbf{ET} \quad (18)$$

ET : est l'équation du temps qui corrige le TSV par rapport au TSM [1]:

$$\mathbf{ET} = \mathbf{9.87} \times \mathbf{\sin} (2 \times \mathbf{N}') - \mathbf{7.53} \times \mathbf{\cos} (\mathbf{N}') - \mathbf{1.5} \times \mathbf{\sin} (\mathbf{N}') \quad (19)$$

$$\mathbf{N}' = (\mathbf{n} - \mathbf{81}) \times \frac{\mathbf{360}}{\mathbf{365}} \quad (20)$$

- Le temps universel (TU) est le temps moyen de Greenwich [1]:

$$\mathbf{TU} = \mathbf{TSM} - \frac{\lambda}{\mathbf{15}} \quad (21)$$

- Le temps légal (TL) est le temps officiel d'un état, il est donné par :

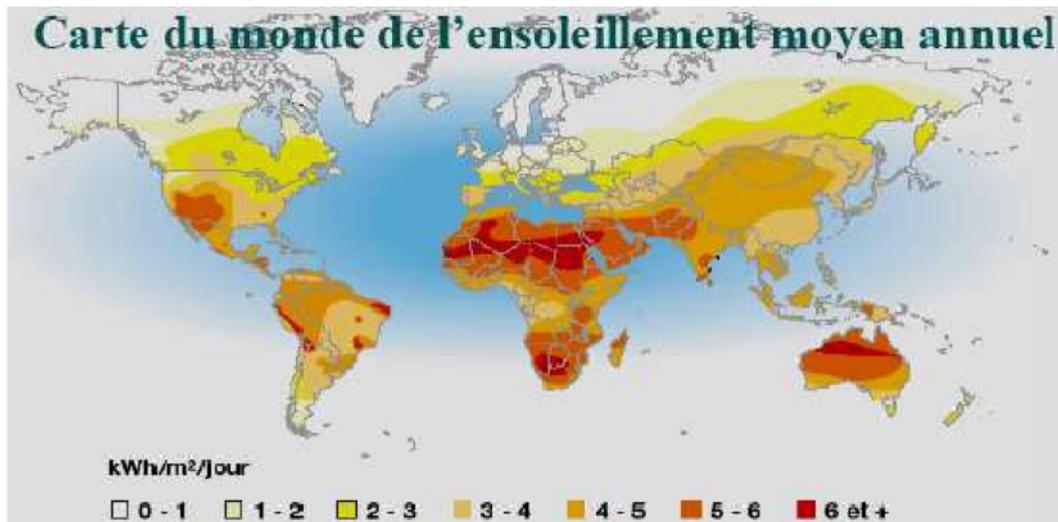
$$\mathbf{TL} = \mathbf{TU} + \mathbf{H} \quad (22)$$

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

**I.5. Le gisement solaire en Algérie :**

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement Solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [16].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.14 :



**Figure I.14.** Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [17]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement [17]:

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2650

**Tableau I.5.** Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [17].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.8).

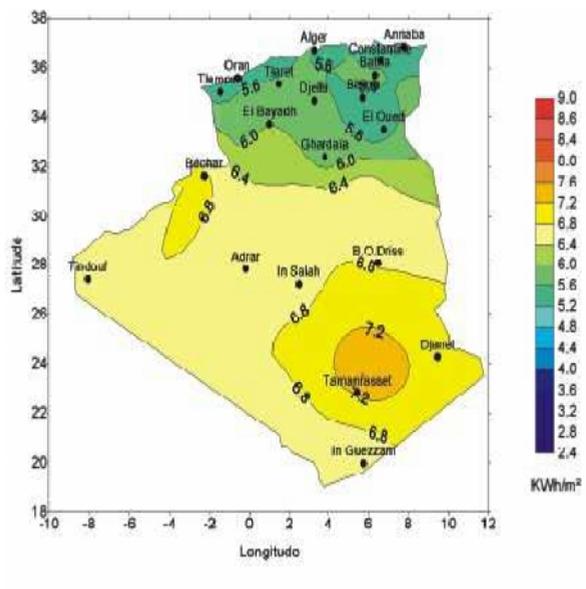


Figure I.15. Moyenne annuelle de l'irradiation Solaire globale reçue sur un plan incliné à la Latitude du lieu [18]

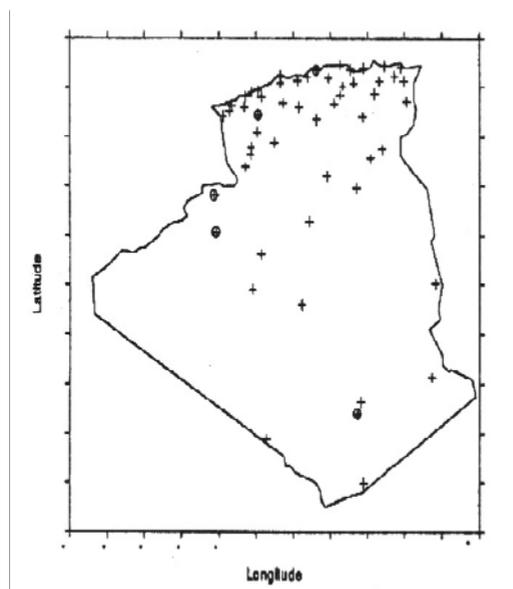
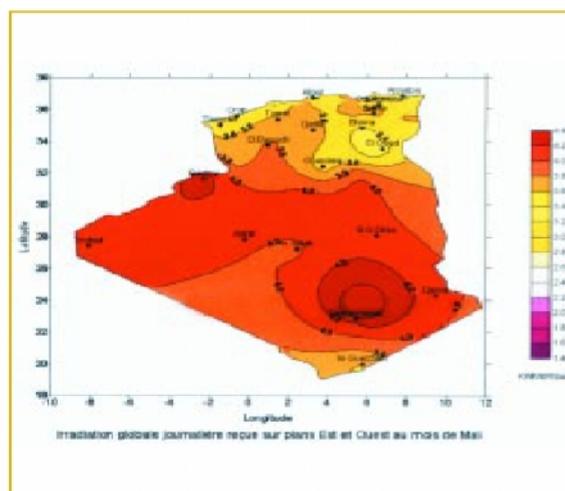
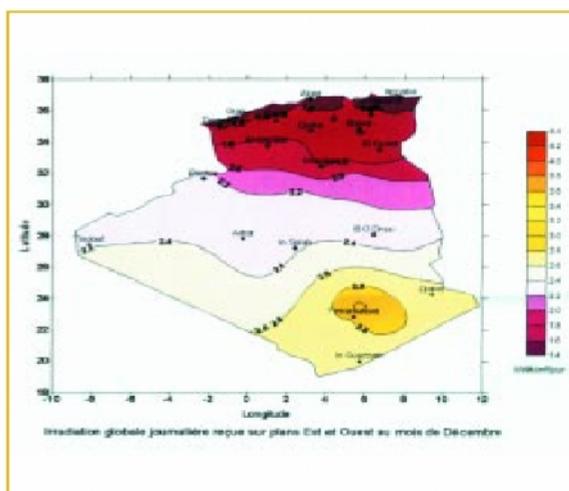


Figure I.16. Répartition territoriale des Station météorologique en A

En Algérie, il existe un réseau de 78 stations de mesure météorologiques de l'O.N.M (annexe D) réparties sur tout le territoire algérien (figure I.9) [16]. Cependant, seules 7 stations météorologiques assurent la mesure des composantes diffuses et globales du rayonnement solaire reçu sur un plan horizontal en raison, soit du manque de fiabilité des appareils de mesure, ou bien, du coût élevé d'un tel appareillage. La durée d'insolation quant à elle, est mesurée par un héliographe dans la majorité des stations de (O.N.M) à cause de la facilité de sa mise en œuvre.



**Potentiel solaire en Algérie : tableau de statistiques des degrés d'ensoleillement par zone**

Régions	Côtières	Hauts-Plateaux	Sahara
Superficie (%)	04	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement par an	2 650	3 000	3 500
Energie moyenne reçue kWh/m²/an	1 700	1 900	2 650

**Conclusion :**

On a présenté dans ce chapitre un récapitulatif de quelques notions de base relatif au gisement solaire, la connaissance de ces notions fondamentales et particulièrement le rayonnement global au sol va nous servir par la suite dans l'exploitation de l'énergie solaire par un capteur solaire et concentrateurs solaires.

L'énergie solaire est disponible sur toute la surface de notre planète qui reçoit plus de 15000 fois l'énergie que l'humanité consomme. L'exploitation de cette énergie peut se faire de trois manières: énergie thermique, énergie thermodynamique et l'énergie photovoltaïque.

L'Algérie dispose d'un gisement solaire important *encore inexploité*. Cette forme d'énergie présente beaucoup d'avantages en conversion thermique pour le chauffage et la production d'électricité principalement. C'est une forme d'énergie disponible, économique, non polluante et nécessite peu d'entretien.

Les mesures solaires sont principalement des mesures au sol du rayonnement direct, diffus et du rayonnement global. D'autres paramètres peuvent également être mesurés et qui sont : les durées d'insolation et le temps horaire.

Les mesures solaires sont effectuées par des appareils tels que l'héliographe, le pyréliomètre qui mesure le rayon incident et les pyranomètres.

**I. Introduction :**

Dans cette partie, une étude théorique des capteurs plans a été avancée en détaillant ses différents composants, son fonctionnement et les différentes corrélations permettant d'évaluer les coefficients des échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur.

Donc on commence par définir les capteurs solaires, description des différents éléments qui les constituent, les types des capteurs et les paramètres et caractéristiques de fonctionnement.

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

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [19].

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par Rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [1], [5].

On trouve aussi d'autres types des capteurs suivant leurs concentrations.

### **I. à. La conversion photo thermique**

La conversion photo thermique est actuellement la plus facile à mettre en œuvre et la plus répandue. Toutes ces applications sont réalisées suivant deux types de procédés ; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration selon la température demandée.

Donc la conversion photothermique consiste à une transformation directe du rayonnement solaire, alors ce type de conversion est la première voie.

L'effet photothermique ou plus prosaïquement " l'effet de serre optimisé" comme le décrit Charles Genaudeau est l'histoire de deux couleurs qui ne figurent pas dans l'arc-en-ciel : le Noir et le Blanc, la première absorbe la totalité de la lumière alors que la seconde la réfléchit.

Lorsque le rayonnement de la lumière du soleil (photons ou grains de lumière) franchit un obstacle transparent (verre ou plastique) et qu'il arrive sur une surface enfermée dans un caisson et si cette dernière aux propriétés physiques d'un corps noir, il est entièrement absorbé. La surface ou "absorbeur" s'échauffe et réémet dans les grandes longueurs d'onde  $2 < \lambda < 10 \mu\text{m}$ . Ce rayonnement ne peut ressortir et se trouve piégé dans le caisson - une serre - Le transparent, alors devient un "corps blanc".

On peut augmenter l'énergie captée par l'utilisation d'un double vitrage et/ou de surfaces sélectives (dépôts de multicouches soigneusement choisies) qui présentent un intérêt surtout pour les surfaces captatrices à haute température, ou encore des structures cellulaires antirayonnantes. Par ailleurs une isolation arrière et latérale est primordiale afin de limiter les pertes par transmission vers l'extérieur. On peut également placer l'absorbeur sous vide.

La conversion thermique est actuellement la plus facile à réaliser et à mettre en œuvre, donc la plus répandue. Elle est réalisée suivant deux types de procédés ; soit les capteurs plans soit les capteurs à concentration. Quant aux utilisations nous serons étonnés de découvrir dans ce qui suit, toutes les potentialités

Que nous offre le soleil et qui touchent à tous les besoins des hommes sur la terre.

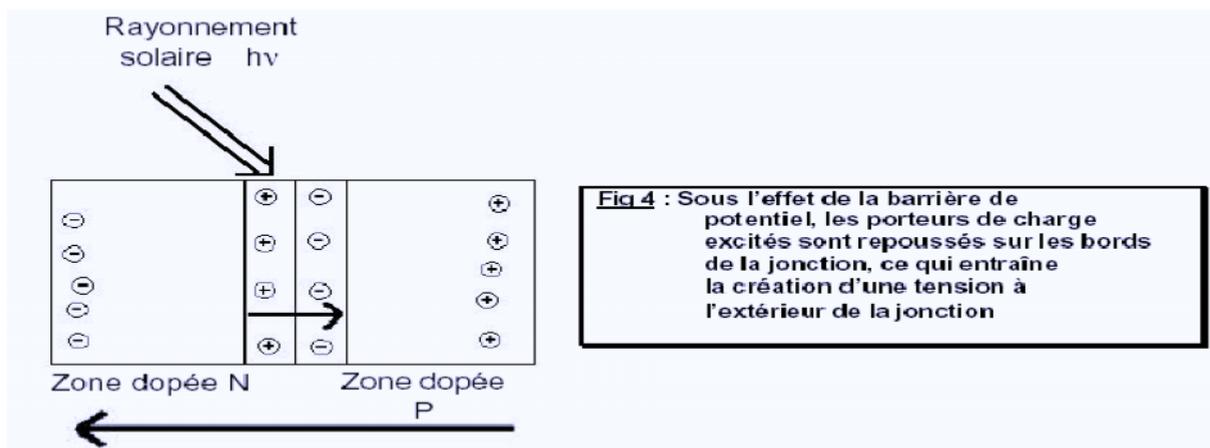
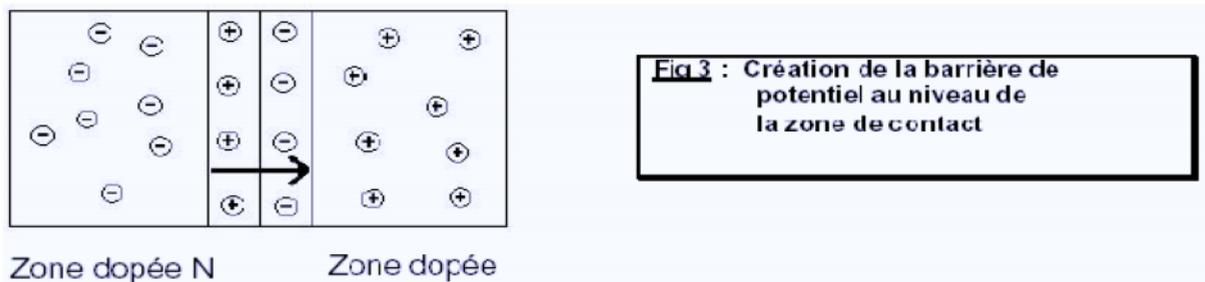
Comme elle peut se faire par :

#### **I.a1. Conversion photovoltaïque**

Les plaques photovoltaïques sont constituées de deux cristaux semi-conducteurs : zone P et zone N. Pour un effet de gradient de charge les électrons excédentaires de N ont tendance à migrer vers P et inversement pour les trous de P vers N.

Mais ce déplacement des électrons ne donne pas une énergie, pour recouvrir tous les trous. Entre deux plaques semi-conductrices il faut créer des combinaisons des charges au niveau du Contact qui permet une barrière de potentielle où les électrons libres ne peuvent pas migrer pour les trous P vers N.

Sous les effets des rayonnements lumineux incidents cette barrière de potentielle détruit  
 Les électrons libres qui peuvent se déplacer de N vers P donnant un courant électrique continu  
 Qu'on peut stocker. (FigureII)



**Fig. II.** Plaque photovoltaïque (Mouvement de déplacement des électrons)

**I.b.Effet de serre :**

Le phénomène de l'effet de serre rappelle celui de la serre du jardinier: l'atmosphère terrestre Laisse passer la lumière du soleil mais emprisonne la chaleur.

Il y a deux phénomènes :

- les rayons ultraviolets du soleil se jettent sur le sol terrestre et la terre en renvoie une partie De cette énergie vers le ciel.
- Or, une couche de vapeur d'eau et de gaz empêche une partie de cette chaleur de repartir Dans l'espace, d'où réchauffement de la planète. Parmi les gaz concernés, la vapeur d'eau, le

Dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère.

Alors on peut pratiquer le même principe sur les capteurs vitrés. Les IR émis par le soleil ou différents objets ont des propriétés différentes.

Des matières telles que le verre ou certain matières plastiques se laissent traverser (elles sont transparentes) par les IR issus du soleil ou de corps très chauds, mais sont opaques aux IR provenant d'objets dont les températures n'est pas très élevés.

Dans le cas de la serre, les IR provenant du soleil traversent le verre et chauffent l'absorbeur dans les capteurs solaires, ce dernier émettent en direction de l'extérieur des IR, mais ceux-ci ne peuvent traverser le verre, ils ont absorbés. La vitre s'échauffe donc et émet à on tour des IR : la moitié vers l'intérieur de la serre, l'autre moitié vers l'espace : c'est une perte de chaleur qui occasionne un refroidissement de la serre, Ainsi, la moitié seulement de l'énergie rayonnée par l'absorbeur de est perdue,

C.-à-d., Certains matériaux laissent passer une gamme étendue de longueurs d'onde, alors que le verre est transparent seulement au visible et au proche infrarouge.

Entourant un corps noir d'une cage de verre, la lumière traversant le verre échauffe le corps noir et la porte à une température de 30° à 100°C environ.

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

A la fin, un corps qui reçoit des IR se réchauffe ; un corps qui émet des IR se refroidit (il perd de la chaleur).

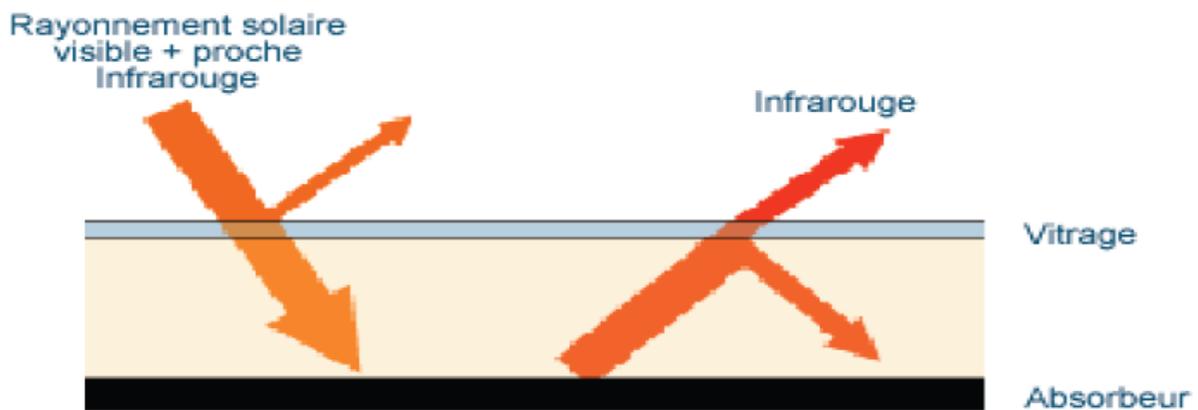


Figure II-1 : L'effet de serre dans un capteur solaire thermique

### I.c. Définition d'un corps noir :

On appelle corps noir toute matière qui absorbe de façon idéale la totalité de la lumière Qu'elle reçoit, c'est la raison pour laquelle nous le choisissons pour capter la lumière solaire [10].

Ou per définition, Un corps noir est un corps idéal totalement absorbant à toute radiation électromagnétique, c'est un absorbeur parfait de radiation, quelques soient la fréquence, ou la direction de l'énergie incidente, elle est totalement absorbée. Le corps noir est un concept idéale, en réalité toutes les substances réelles reflètent et /ou transmettent une certaine

quantité de radiation. Même, si un corps noir vrai n'existe en nature, certains matériaux l'approchent. Par exemple, une large épaisseur de carbone noir peut absorber jusqu'à 99% du rayonnement thermique incident

Le corps noir, c'est aussi un émetteur parfait de rayonnement thermique. Il est défini comme le corps qui émet le maximum de radiation. Pratiquement une surface recouverte de noir fumée

Représente une assez bonne approximation du corps noir.

L'étude du rayonnement nécessite la définition de certaines propriétés principales :

- L'émittance : c'est la quantité d'énergie émise par une source, par unité de temps et par unité de surface de cette source, à travers tout le demi plan délimité par cette surface et s'exprime en  $W/m^2$ .

#### A- Emittance énergétique :

C'est le flux total émis par unité de surface est de la source, la puissance  $d\phi$  émis par un Élément de surface  $ds$  dans l'ensemble de direction :

$$\mathbf{M} = \frac{d\phi}{ds} \quad (II.2)$$

: représente le flux thermique (en w) et  $s$  la surface en ( $m^2$ ).

#### b- Luminance :

C'est le flux d'énergie émis par unité de surface, dans un angle solide  $\Omega=1$  stéradian, normale à cette surface,  $L$  s'exprime en  $W/(m^2.sr)$ .

Pour exprimer la luminance, on définit un élément de surface  $ds$  et élément d'angle solide  $d\Omega$  qui définit un pinceau dans lequel le flux d'énergie est  $d\phi$ . La luminance s'écrit ;

$$\mathbf{L}_{0x} = \frac{I_{0x}}{ds'} = \frac{d^2\phi_{0x}}{dsd\Omega \cos \theta} \quad (23)$$

Quand  $ds$  et  $d\Omega$  tendent vers zéro.

La luminance est la relation fondamentale du rayonnement.

Les applications du rayonnement demandent généralement la distribution de la radiation émise en fonction de la longueur d'onde.

La distribution de cette radiation pour le corps noir en fonction de la fréquence (longueur d'onde) est donnée par la loi de Planck.

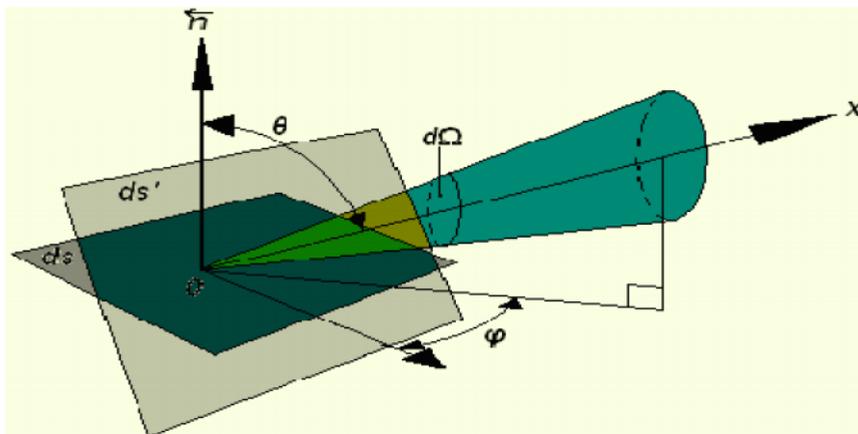


Figure. I.b.définition de la luminance [7]

1- loi de Planck :

$$L_{\lambda T}^0 = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp(C_2 / \lambda T) - 1} \quad (24)$$

$C_1 = 2 \pi^5 h^6 C_0^3 / 15$

$C_0 = 3.741 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$

$C_2 = h C_0 / K = 0.013388 \text{ m} \cdot \text{K}$

$h$  : la constante de Planck ;  $h = 6.6245 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

$K$  : la constante de Boltzmann ;  $k = 1.38033 \cdot 10^{-23} \text{ J/kg}$

$C_0$  : vitesse de lumière ( $2.997930 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ )

2- loi de Planck simplifiée :

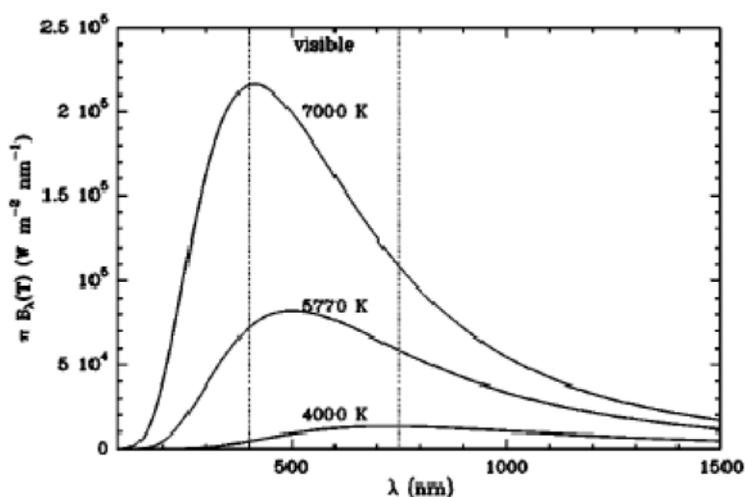


Fig. I.b1. La loi de Planck distribution spectrale du corps noir en Fonction de la température absolue [18]

**3-loi de Wien :**

Première loi de Wien, c'est une loi du déplacement de  $\lambda_m$  en fonction de T, permet de Calculer la luminance spectrale d'un corps noir de température T et de longueur d'onde  $\lambda_m$ .

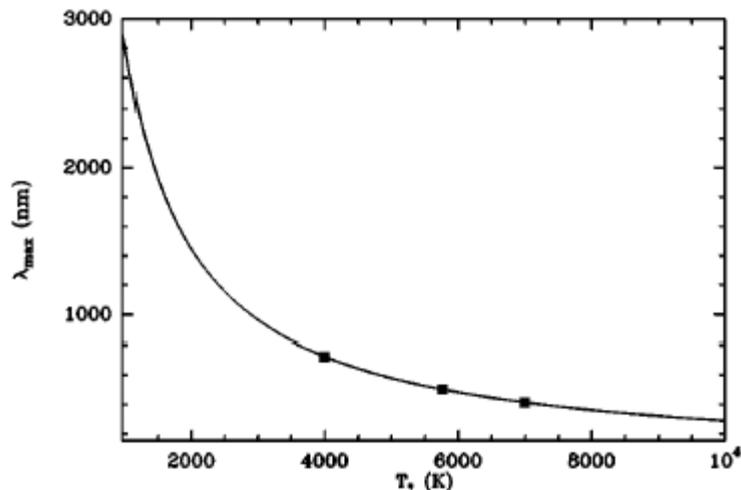


Figure. 1.b2. Déplacement  $\lambda_m$  en fonction de la température [18]

$$\lambda_m T = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{k} \tag{25}$$

Deuxième loi de  $L_{\lambda T}^0$  en fonction cette loi s'exprime sous la formule suivante

$$L_{\lambda T}^0 = B T^5 \tag{26}$$

Avec  $B=1.287 \cdot 10^{-5} \text{ w/ (m}^3 \cdot \text{k}^5)$  la constante de Wien

**4-loi de Stefan Boltzmann :**

Cette loi fournit l'émission totale du rayonnement du corps noir dans le vide en fonction de Sa température absolue. [6]

$$M^0 = T^4 \tag{27}$$

Avec

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{K^4}{C_0^2 h^3} = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ w/ (m}^2 \cdot \text{k}^4) \tag{28}$$

**I.d. Loi d'absorption :**

Considérant un corps qui reçoit de l'énergie rayonnante de longueur d'onde. L'expérience Montre que, d'une façon générale, sur la quantité totale  $\phi_c^{Total}$  d'énergie reçue par un élément donné de surface :

- Une partie  $\phi_c^{Refl}$  est réfléchié suivant les lois de la réflexion.
  - Une partie  $\phi_c^{Diff}$  est diffusée, c'est-à-dire renvoyée dans toutes les directions.
  - Une partie  $\phi_c^{Trans}$  traverse la surface, c'est-à-dire pénètre dans l'intérieur du corps et en  
Ressort : c'est l'énergie transmise.
  - Une partie  $\phi_c^{Abs}$  est absorbée par le corps [11].
- On donc :

$$\phi_c^{Total} = \phi_c^{Refl} + \phi_c^{Diff} + \phi_c^{Trans} + \phi_c^{Abs} \quad (29)$$

### Le rapport A :

Le rapport  $\phi_c^{Abs} / \phi_c^{Refl}$  que l'on désigne généralement par A, est le pouvoir d'absorption du

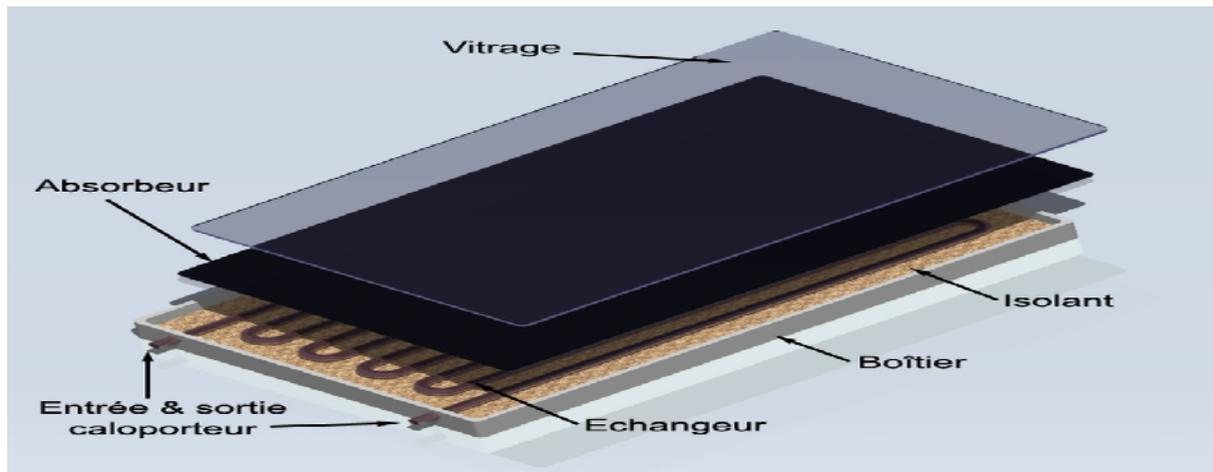
milieu, sa valeur dépend de la longueur d'onde, du rayonnement absorbé, ainsi que la nature De la surface réceptrice. A est un coefficient sans dimension, toujours compris entre 0 et 1.

1- Pour un corps parfaitement réfléchissant ou parfaitement diffusant, on a sensiblement A=0, il en est de même pour un corps ou un milieu qui se laisse traverser par le Rayonnement thermique sans en rien absorber, de tels milieux sont dites diathermanes ; on a également A=0.

2- Pour le corps noir, on a A=1 pour toutes les longueurs d'ondes [11].

### II. Description du capteur plan :

Un capteur plan utilise l'effet de serre et parvient à récupérer environ 50% de l'énergie Incidente. Il se compose des éléments suivants : le vitrage, l'absorbeur l'isolant, le fluide Caloporteur et le boîtier.



**Figure II.2. Les différents composants d'un capteur plan.**

### II.a.Le vitrage (couvercle) :

Le verre laisse passer entre 84 et 92% du rayonnement solaire (sous l'incidence normale) selon le degré de pureté et l'utilité de recouvrir l'absorbeur par une couverture transparente est de retenir les radiations infrarouges émises par l'absorbeur, tout en laissant passer le maximum de rayonnement solaire.

Il existe deux types de vitrages : vitrage simple et vitrage double.

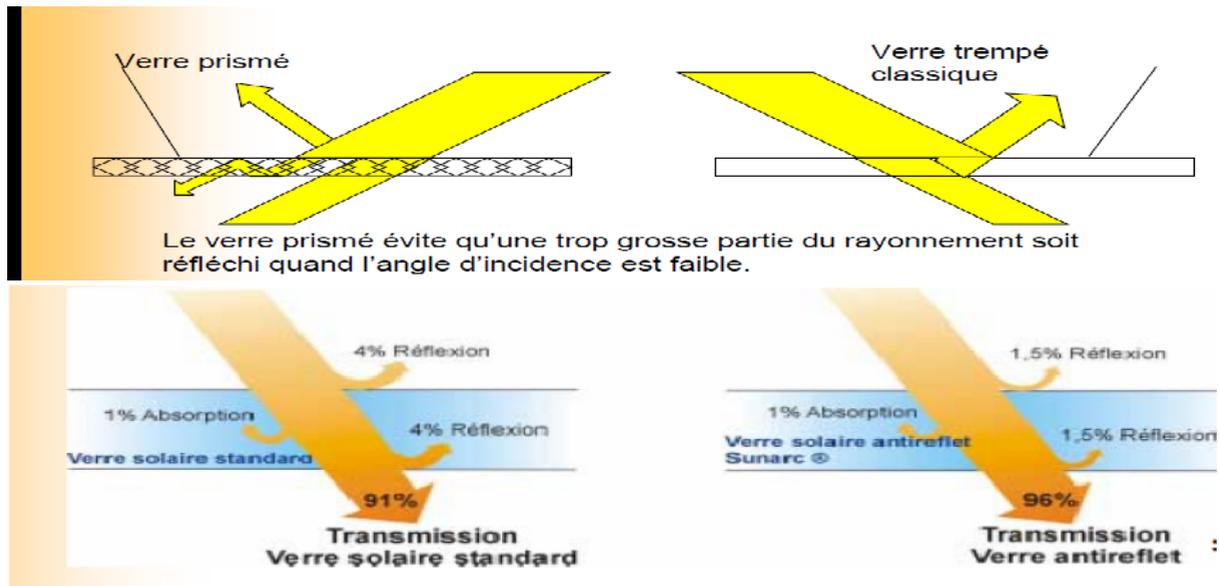
C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre.

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

L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C [9], en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, en effet :

Soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. A la surface de la terre, le Rayonnement solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R pour lequel la transmissivité de la vitre est faible ne pouvant ainsi s'échapper et qui sera en partie absorbé par la vitre qui s'échauffe et en partie réfléchi vers la plaque qui elle-même s'échauffe [1], [3].

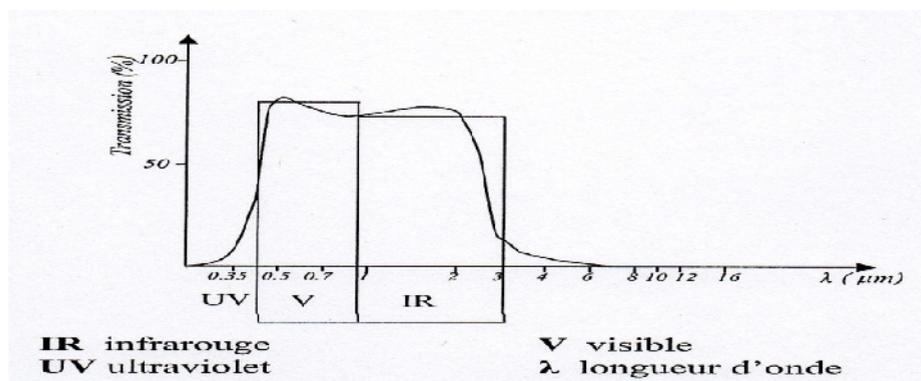
L'utilisation de la couverture transparente évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent.



Donc, La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilise le verre comme couverture transparente.

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de L'absorbeur ; La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.

La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de température ainsi qu'aux températures élevées (figure 2.5).



**Figure II.2.a.** Variation de la transmittance en fonction de la longueur d'onde pour le verre solaire.

Une appellation verre solaire existe et fit l'objet d'exigences toute particulières :

- Le verre doit être trempé pour résister sans risque aux charges thermiques et mécaniques.
- Il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.

- Il doit être d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission qui dépend de la nature et de l'épaisseur de vitrage ainsi que l'angle d'incidence et de la nature du rayonnement (direct ou diffus).

Actuellement, un nouveau type de verre, dit antireflet, équipe certains capteurs. Ce verre à un taux de transmission de l'ordre de 96% et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

### **II.b.L'absorbeur :**

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [1].

C'est une surface parcourue d'un réseau de tubulures, revêtue d'une peinture noire. L'absorbeur a pour rôle de transformer en chaleur le rayonnement électromagnétique qu'il reçoit et de transmettre cette chaleur au fluide caloporteur. Cette surface noire doit avoir les caractéristiques suivantes :

- Une bonne conductivité et diffusivité thermique.
- Un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Une bonne résistance chimique vis-à-vis du fluide.

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique, laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine.

L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [1]:

✓ Les avantages sont :

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

✓ Les inconvénients sont :

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

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm [7].

Les canaux contenant le fluide caloporteur ne doivent pas être trop espacés ; ainsi, la transmission de la chaleur de l'absorbeur vers le fluide caloporteur se fait plus efficacement. Dans la pratique, on choisit généralement un intervalle de 100 à 120 mm entre les tubes. Cela représente un compromis entre une évacuation optimale de la chaleur, une faible inertie thermique et une utilisation réduite des métaux tout en préservant des coûts de fabrication bas [7].

Il est fortement nécessaire d'assurer un bon contact entre les feuilles de l'absorbeur et les tubes du fluide caloporteur afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact [7].

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du Rayonnement I.R ( $\alpha < 0.15$ ,  $\epsilon > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [1].

✓ L'absorbeur peut être [12] :

- En cuivre : c'est le meilleur (bon conducteur), et travaille très bien mécaniquement mais il est le plus coûteux.
- En acier : ayant une faible conductivité thermique et un coût moins élevé. En fait de nombreux capteurs utilisent comme absorbeur des radiateurs extra plats de chauffage central.
- En aluminium : qui nécessite l'emploi d'un fluide caloporteur spécial pour des problèmes de corrosion.

Matière	Conductivité en W/m.°C	Masse volumique kg/m <sup>3</sup>	Coefficient de dilatation en mm pour 1m et 100°C
Aluminium	230	2700	2,38
Cuivre	380	8930	1,65
Zinc	112	7130	2,90
Acier	52	7900	1,15
Inox	52	7900	1,15
Plastiques	0.2-0.4	1000 à 1500	7 à 20

Bonne conductivité



Faible dilatation

### II.c.L'isolant :

L'isolant joue un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire, non seulement au niveau des absorbeurs, dont il faut limiter les pertes, mais aussi pour

calorifuger les tuyauteries chargées de véhiculer la chaleur, et la maison elle même, lorsqu'il s'agit de chauffage solaire.

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

• **Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm [1]. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [1].

• **Parties arrière et latérale**

Si non, il faut s'attendre à voir apparaître un dépôt sur la face intérieure de la couverture. En plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [1], [7], [20].



A



B

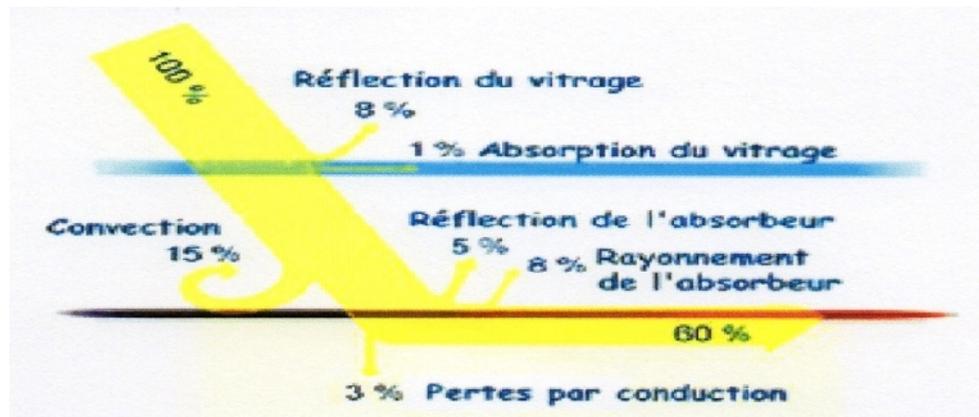


C

A	B	C
<p><b>Laine minérale</b></p>	<p>Isolation d'un champ de capteurs.</p> <p>Avec de la laine de roche semi-rigide.</p>	<p>Mousse de polyuréthane Inflammable si non ignifugé</p> <p>Non inflammable</p>
<p>= 0,041 W/m.°C = 0,029 à 0,033 W/m.°C</p>	<p>= 0,029 à 0,033 W/m.°C</p>	<p>= 0,029 à 0,033 W/m.°C</p>

Généralement on utilise ces derniers comme isolant. Leur Épaisseur varie de 4 à 8 cm.

On présente de manière schématique les différentes pertes générées par les constituants du capteur solaire plan (figure 2.6). On remarque aisément que sur 100% de rayonnement à la surface du vitrage du capteur, seulement 60% du rayonnement arrivent directement à l'absorbeur, quant aux 40% restant sont complètement perdus mais ils vont jouer un rôle par l'intermédiaire de l'effet de serre.



**FigureII. 2.b.** Différents pertes générées par les constituants du capteur solaire plan.

### II.e.Le fluide caloporteur :

Est un moyen de transfert de la chaleur collectée par l'absorbeur à un fluide d'échange Thermique appelé fluide de travail.

- Les fluides caloporteurs utilisés sont :
- L'air : qui est gratuit mais possédant une faible capacité calorifique comparativement à celle de l'eau (1 litres d'eau peut véhiculer une énergie équivalente qui peut Véhiculer 3000 litres d'air).

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.
- 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.
- L'eau : qui possède les avantages suivants :
- Une grande chaleur massique.
  - Une faible viscosité.

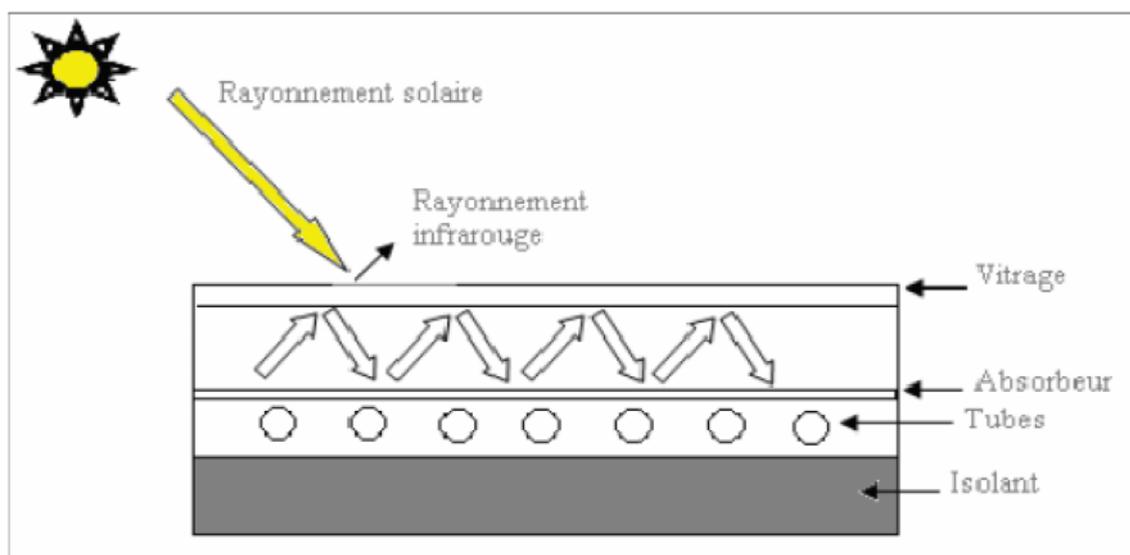
### II.f. Le boîtier :

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques. Destinée à réduire les pertes de chaleur vers l'arrière et les cotés du capteur, celui-ci doit être solide et résistant à la corrosion.

### III. Différents types de capteurs :

#### III.1. Le capteur solaire à eau :

Le capteur solaire thermique à eau est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un conduit permettant à l'eau de collecter l'énergie cédée par l'absorbeur, et d'un isolant. La figure (III-1) représente le principe de fonctionnement d'un tel capteur.



**Figure III-1** : capteur solaire thermique à eau, vue en coupe.  
Les conduits d'eau sont ici intégrés dans l'absorbeur.

Le principe est le suivant : le rayonnement solaire, dont le spectre se situe essentiellement dans les longueurs d'onde du visible (courtes longueurs d'onde), passe à travers la couverture

transparente (constituée ici d'un vitrage), et arrive à l'absorbeur, celui-ci s'échauffe, et transmet de l'énergie thermique par convection à l'eau qui circule dans les conduits, et réémet du rayonnement thermique vers l'extérieur (grande longueur d'onde). L'isolant permet de réduire les

Pertes thermiques du capteur.

On peut distinguer deux types de systèmes : [12]

- Les systèmes à basse pression de circulation très simple, à eau chaude sans pression.
- Les systèmes à haute pression, à eau chaude à haute pression utilisant une pompe.

### III.2. Le capteur solaire à air :

Contrairement au capteur à eau où le fluide passe dans les tuyaux, le conduit d'air est en générale formé par l'espace situé entre la couverture et l'absorbeur. De même que pour le capteur à eau, l'écoulement peut être forcé ou naturel. Le coefficient de transfert de chaleur de l'air est approximativement de deux ordres de grandeurs plus faible que celui de l'eau [12].

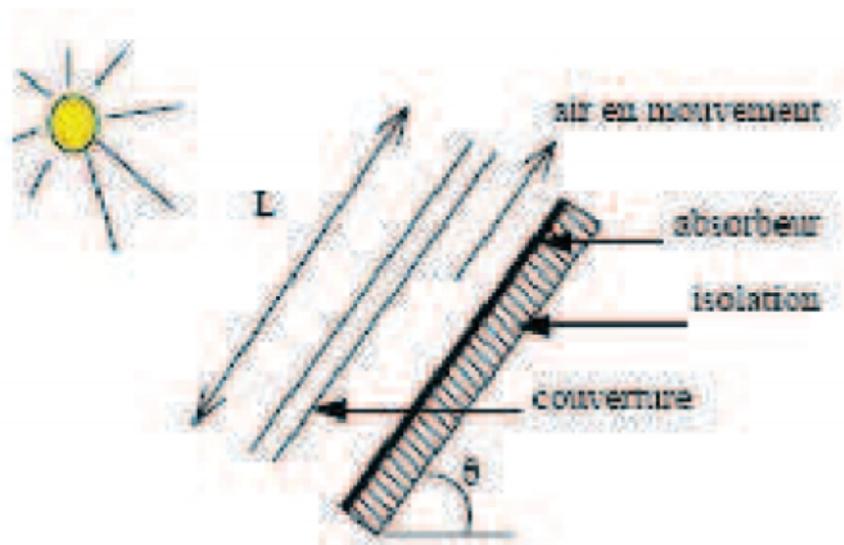


Figure III-2 : Capteur à air.

### III.3. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires :

Le rendement d'un capteur solaire plan est influencé par différents paramètres [5], [19], [21], [28].

On peut les classer en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes [13].

#### III.3.a. Les paramètres externes

1- Les paramètres d'ensoleillement

- Eclairage énergétique dû au rayonnement global.
  - Position du soleil et durée d'insolation.
  - L'heure de la journée et la saison.
  - La position géographique du lieu considéré (latitude).
- 2- Température ambiante.
  - 3- Vitesse du vent.

### III.3.b. Les paramètres internes

#### 1- Les paramètres de position

- Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
- Capteur fixe ou suiveur du soleil.

#### 2- Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

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

- La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

- La surface sélective

- Propriétés optiques.

- Couverture transparente

- Propriétés optiques et thermophysiques.

- Epaisseur.

- Le nombre de vitrage et la forme.

- L'isolant

- Propriétés thermophysiques et optiques.

- Epaisseur.

- Fluide caloporteur

- Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.

- Température d'entrée.

- Propriétés thermophysiques.

### III.4. L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

- **Des capteurs fixes**

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée, ce qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques, et présentent les propriétés suivantes :

- \* La simplicité et la fiabilité.

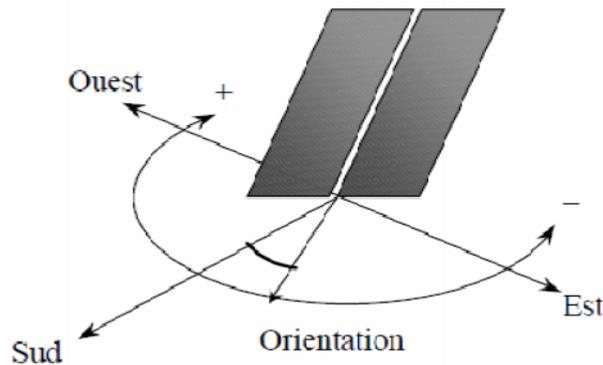
- \* Un faible entretien.

- \* Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).

- \* L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps Chaque jour à son maximum d'efficacité.

- **Des capteurs à poursuite**

Le capteur solaire peut être muni d'un dispositif de guidage automatique dans la direction de provenance du flux lumineux, ce qui va améliorer le rendement du capteur.



**Fig.III.4.**L'orientation et l'inclinaison

### **III.5. Principe de captation du rayonnement solaire.**

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel, mais aussi de tout l'environnement.

Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement aux niveaux de l'absorbeur. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct. La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire [1].

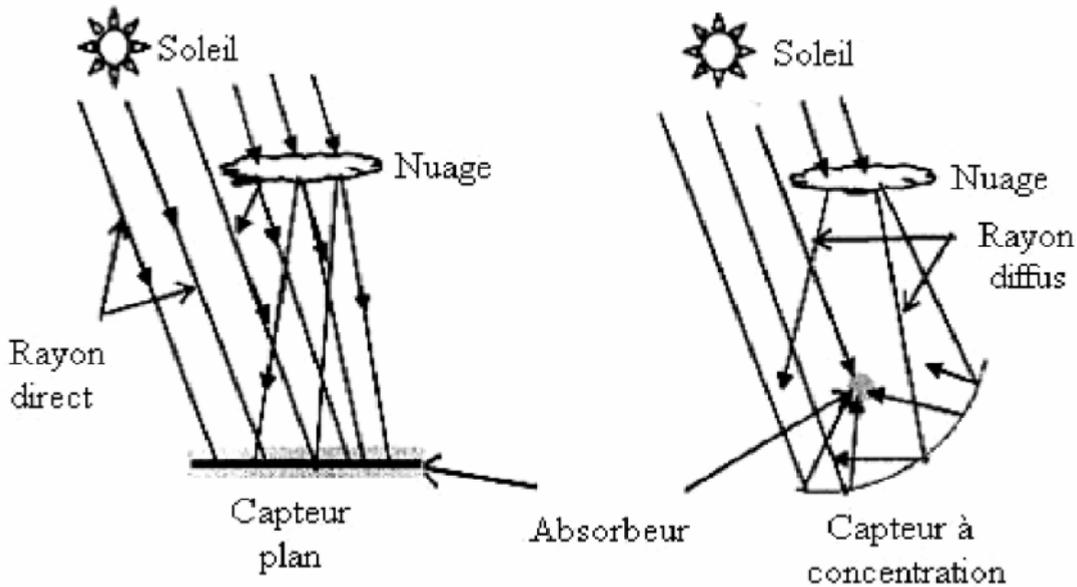
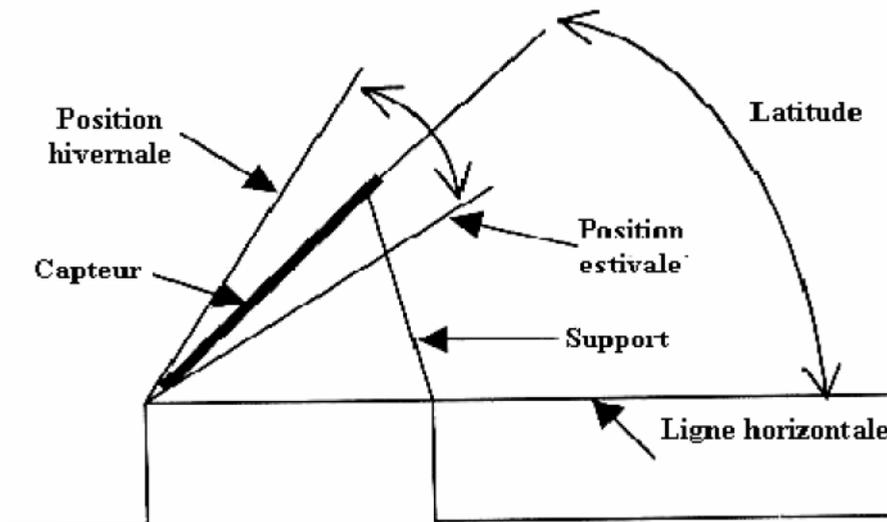


Figure.III.5. Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire.

**III.5.a. Inclinaison optimale d'un capteur solaire**

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permet que la surface du capteur soit perpendiculaire aux rayons solaires et d'être exposés au maximum à la lumière solaire. Le calcul de l'angle d'inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l'emplacement du capteur. En général, il s'agit de la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15 degrés. En hiver (position hivernale), lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (à la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (à la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel (position estivale).



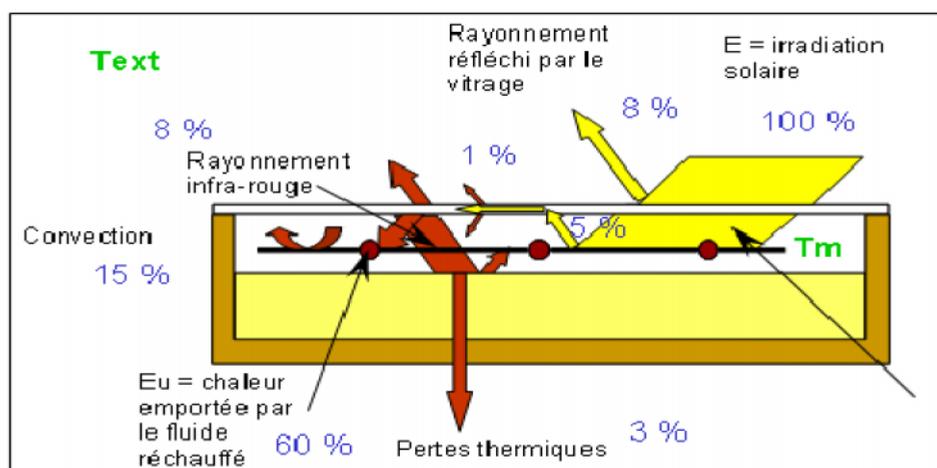
**Fig. 5.1:** Installation d'un capteur solaire**III.5.b. Fonctionnement d'un capteur solaire plan**

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (figure II.2) [21]:

Le rayonnement solaire traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Le fluide caloporteur qui circule dans l'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est Transmise au consommateur.

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 III.5.b.** Principe de fonctionnement du capteur solaire plan

On trouve qu'il y a d'autres types des capteurs qui sont :

➤ **Avantages du capteur plan**

- Cout du capteur relativement bas.
- Le capteur peut être installé au sol comme il peut être aussi intégré architecturalement (toits, balcons,.....).
- Il possède un degré de rendement élevé [8].

➤ **Inconvénients**

- Baisse du rendement d'utilisation en hiver à cause des pertes thermiques élevées.

- Risque de salissement de la surface de l'absorbeur par dépôt de poussière particulièrement dans les régions arides et semi arides.
- Possibilité de condensation au vitrage de capteur.

### III.5.c. Les capteur à tubes sous vide :

Pour ce type de capteur, l'absorbeur est mis dans un tube en verre d'air. Cette série de tubes et de diamètre 5-15 cm. La forme cylindrique permet au tube de mieux résister aux forces de la sous pression, contrairement pour le capteur plan sous vide les parois ont besoin d'être soutenue.

Les pertes de chaleur dues à la différence de température entre le capteur et l'air ambiant sont presque inexistantes. Malgré une température intérieure égale ou supérieure à 120°C, le tube en verre reste froid à l'extérieur.

Pour être efficace le vide doit être poussé  $< 10^{-3}$  Pa.

La technique du capteur sous vide présente des avantages inégalés : une isolation remarquable et une exposition toujours adaptée à la position du soleil.

L'eau chauffe rapidement et ne perd pas la chaleur accumulée.

#### ✓ Principe de fonctionnement du système Heat Pipe

L'irradiation solaire pénètre dans le tube de verre. Une partie de l'énergie est réfléchié avant l'entrée dans le capteur. L'absorbeur représente la « zone thermique » : c'est la que s'évapore le fluide caloporteur (un alcool ayant un point d'ébullition bas). A l'extrémité supérieure du tube se trouve un autre tube mince et courte en acier qui fait fonction de « zone froide » : c'est la ou la condensation a lieu. La chaleur libérée au cours de la condensation est reprise par un bloc d'aluminium (jouant un rôle d'échangeur de chaleur) qui la transmet à l'eau froide à l'aide d'un tube collectif monté sur le circuit du capteur 'figure III.5.c)[8].

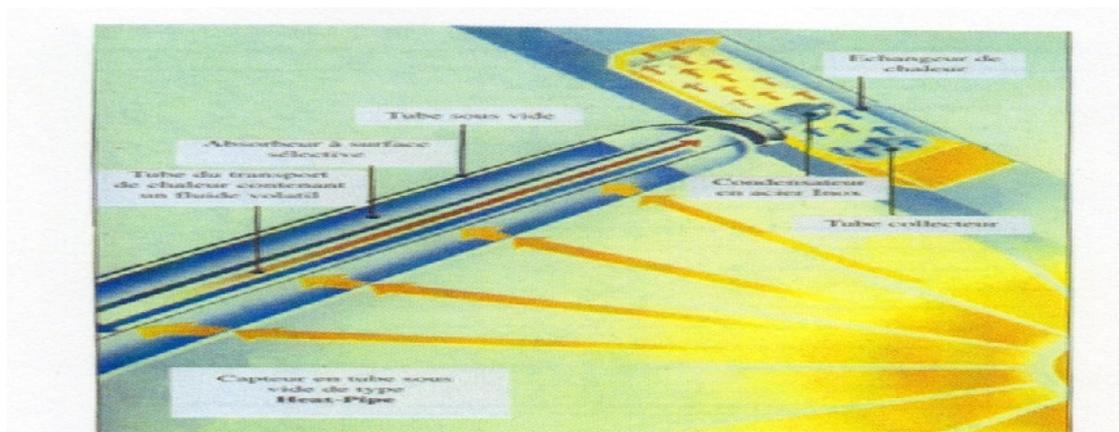


Figure III.5.c. Principe de fonctionnement du système Heat Pipe [8].

#### ➤ Avantage d'un capteur de type Heat Pipe

- Possibilité d'orienter facilement la surface d'absorption vers le sud.
- Pas de saleté et pas de condensation sur le capteur.
- Les tubes défectueux peuvent être remplacés sans problème.
- Le système « Heat Pipe » ne nécessite pas le vide pas le vide.
- Pas de retour de chaleur du stockage au capteur.

➤ **Inconvénients**

- Pour la même quantité d'énergie, le prix du capteur est trop élevé.
- Le montage ne se fait que sur place.
- Le principe « Heat Piper » peut facilement tomber en panne, d'où la nécessité de contrôles répétés.

### III.5.d. Capteur plan sous vide

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U.V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été et assurent des températures relativement basses de l'ordre de 30 à 35°C.

Le principe de construction est le même que le capteur déjà décrit. Hormis que l'absorbeur est sous vide [8].



**Figure.III.5.d.** Capteur plan sous vide

✓ **Fonctionnement**

Pour réduire les pertes de chaleur, le capteur est mis sous le vide, c'est-à-dire que l'air est évacuée à l'aide d'une pompe car le vide est une des meilleures formes d'isolation. Les éléments de soutien doivent contenir les forces dues à la pression atmosphérique et agissant sur le vitrage de la plaque arrière du capteur. Le degré de rendement optique du capteur plan sous vide est environ 0.88 [8], donc plus élevé que celui de capteur plan à plan à la pression atmosphérique.

➤ **Avantages**

- Même avantages d'intégration architecturale que le capteur plan normal.
- Degré d'utilisation élevé en hiver comme en été.
- Une surface de captation réduite pour la même quantité d'énergie .

- Pas de condensation au niveau du capteur.
- 
- ✓ **Inconvénients**
- Cout du capteur plus élevé pour la même quantité d'énergie.
- Investissement supplémentaire à cause de l'achat d'une pompe.
- Problème de la variation de la pression à l'intérieur du capteur due aux gaz restants et à la différence de températures dans l'absorbeur.
- Risque de ne pas être étanche (entrée d'air).

### III.5.e. Comparaison entre les rendements de différents types de capteurs solaires

La figure 2.8 compare, à l'aide de lignes caractéristiques, les degrés de rendement des différents types de capteurs ont le capteur plan, le capteur plan sous vide et le capteur en tubes sous vide à la même irradiation globale.

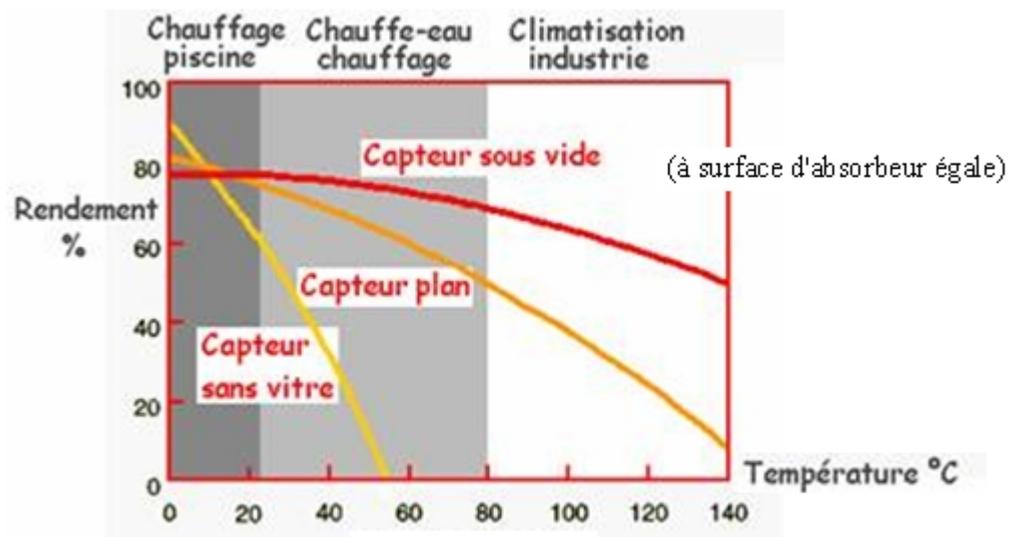
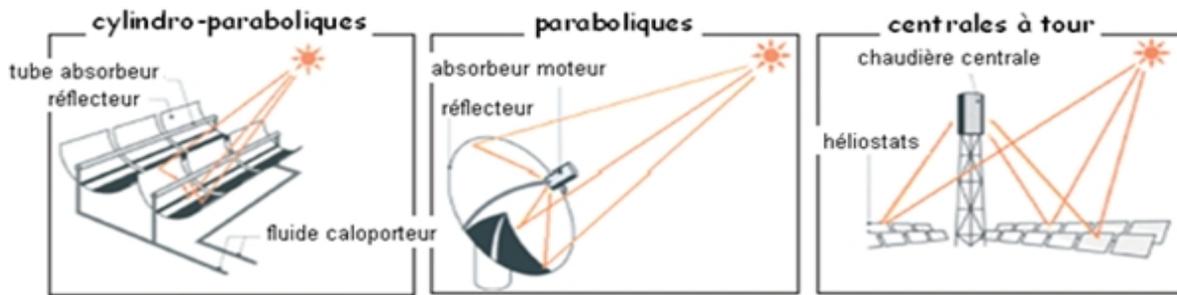


Figure .III.5.e. Lignes caractéristiques du rendement des différents types de capteurs solaires [8].

### III.5.f. Les capteurs à concentration solaire

Ce sont des capteurs solaire comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destiné à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement solaire incident. On distingue figure



### III.5.j. Les capteur cylindro-parabolique

C'est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique.

Le rayonnement solaire est concentré environ 100 fois sur des tubes linéaires, de couleur noire (absorbeurs) pour capter un maximum de rayonnement, contenant un fluide caloporteur, installés le long de la ligne focale des miroirs.

### III.5.k. Le Capteur paraboloidé

Les systèmes paraboliques ( $C = 5$  à  $10\,000$  soleils), réservés aux petites puissances ( $< 50$  kW), utilisent un miroir parabolique mobile qui concentre l'énergie solaire sur un moteur Stirling placé sur le point focal.

La température au foyer peut atteindre de  $500$  à  $1\,000^\circ\text{C}$  [6].

### III.5.l. Le Capteur centrale à tour solaire

Les centrales à tour utilisent un champ composé d'héliostats (miroirs plan ou légèrement concave) qui suivent le soleil dans sa course et concentrent environ  $1000$  fois les rayons sur un récepteur central localisé au sommet d'une tour. Peut atteindre des températures supérieures à  $1000^\circ\text{C}$ .

On voit bien que :

L'obtention des températures  $> 200^\circ\text{C}$  nécessitant un dispositif de concentration du rayonnement solaire [7]

La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus

Élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur avec un rendement supérieur à 70%.

Ce procédé constitue un apport d'énergie dans un grand nombre d'applications thermiques, thermomécaniques et thermochimiques.... à condition que des rendements de conversion élevés puissent être atteints.

Les domaines d'utilisation de ce type de transformation sont fonction des niveaux de température obtenus :

- 20 à 80°C (basses températures) ,

Application: chauffage de l'eau sanitaire, chauffage des piscines...,

- 80°C à 150°C (températures moyennes),

Application: chauffage des habitations, réfrigération, climatisation, dessalement de l'eau de mer, industrie, production d'énergie mécanique...,

- 150°C à 1000°C (hautes températures),

Applications: production d'énergie mécanique, production de vapeur, centrales thermodynamiques, dissociation catalytique de l'eau...,

- > 1000°C (très hautes température),

Applications: dissociation thermique de l'eau, magnétohydrodynamique, thermoélectricité....

Et La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [19]:

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

### **Conclusion :**

Une description physique de différents capteurs a été présentée ainsi que le bilan thermique et le rendement correspondant.

On a vu les différents systèmes et leur rôle très importants pour la conversion de l'énergie solaire et leur utilité, différentes composantes et leurs avantages et inconvénients. On a vu aussi malgré la différence de ces capteurs soit de coter structure, ou coter applications mais ils ont le même but de la conversion de l'énergie solaire, mais la production est les différentes

utilités peut se diffèrentes, alors que la plupart de ces capteurs, on trouve aussi que ces systèmes ils ont le même. Principe de la terre par effet de serre c'est un phénomène très important, aussi l'importance du corps noire dans différentes applications.

## I. Introduction

Le rapport performance / cout du capteur détermine l'intérêt du système de conversion de l'énergie solaire par rapport aux autres sources d'énergies éventuellement disponibles.

Le prix du capteur constitue, en effet, la majeure partie du cout total de l'installation solaire. Les performances du capteur dans un site donné dépendent essentiellement de sa conception et des propriétés optiques et thermiques des matériaux qui le composent. Sans négliger l'importance des systèmes à concentrations, des fluides de transfert et des milieux de stockage de la chaleur ainsi que des problèmes posés par la convection et la conduction, nous nous limiterons dans ce chapitre à considérer les problèmes radiatifs se posant au niveau du capteur. Nous montrons comment on peut accroître ses performances en optimisant les propriétés optiques des matériaux constituant la surface de son absorbeur ou sa couverture, afin d'obtenir un comportement spectral sélectif de ces surfaces.

## II. Modélisation des propriétés optiques d'un absorbeur solaire

### II.1. Longueur d'onde de coupure

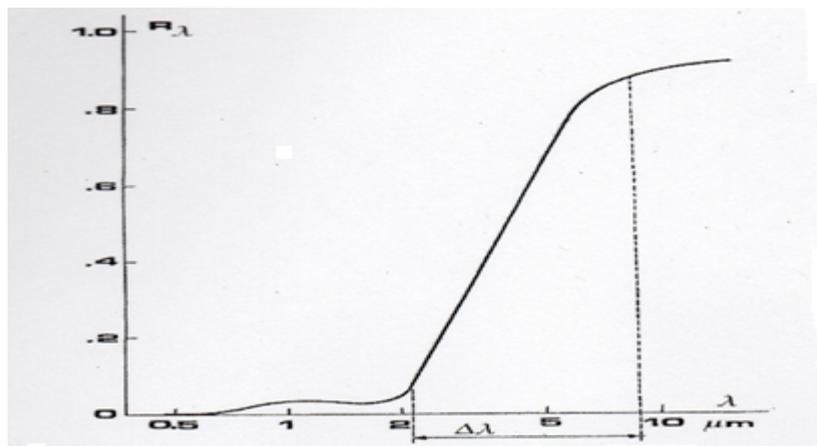
Depuis les travaux Tabor [13] en 1956, l'emploi de surfaces sélectives pour la conversion photo thermique de l'énergie solaire s'est considérablement développé. En effet, dans de nombreuses applications, il est possible de diminuer notablement les surfaces de captation en remplaçant des absorbeurs noirs par des absorbeurs sélectifs.

Considérons par exemple les propriétés optiques d'un absorbeur sélectif réel de la figure 4.1:

Si l'on représente les propriétés optiques d'un absorbeur sélectif réel dans un diagramme  $R(\lambda)$ , On constate une augmentation du facteur  $R$  dans l'infrarouge qui peut être plus ou moins fraie suivant la surface sélectif considérée. La figure 3.1 donne un exemple d'une telle variation, obtenue dans le cas du « chrome » ; cette surface présente deux domaines où  $R$  est tantôt faible, tantôt élevé, la transition entre les deux s'effectuant sur une étendue spectrale compris entre 2 et 9  $\mu\text{m}$ . On modélise ce type de réponse en imposant d'une part,  $R$  constant dans chacun des deux domaines figure 3.2.

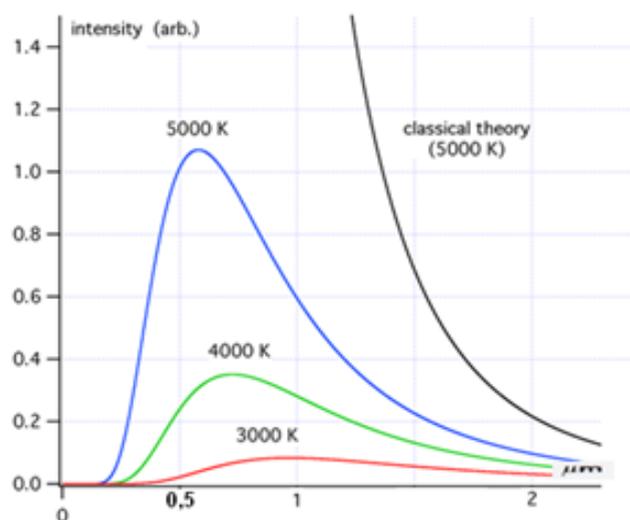
On note  $\lambda_c$ , longueur d'onde de coupure, la valeur de  $\lambda$  pour laquelle la transition a lieu ; de même,  $A$  et  $E$  sont les valeurs de  $1 - R$  de part et d'autre de cette longueur d'onde de coupure. Les propriétés sont supposées constantes en fonction de l'angle d'incidence, ce qui

revient à considérer le matériau comme gris diffus dans chacun des deux régions. Afin de compléter le modèle, on assimilera le soleil à un corps noir, dont la température uniforme de surface est  $T = 5880 \text{ K}$  [11].



**Figure .4.1.** Variation de la réflectance en fonction de la longueur d'onde pour un absorbeur sélectif réel- cas du chrome [11].

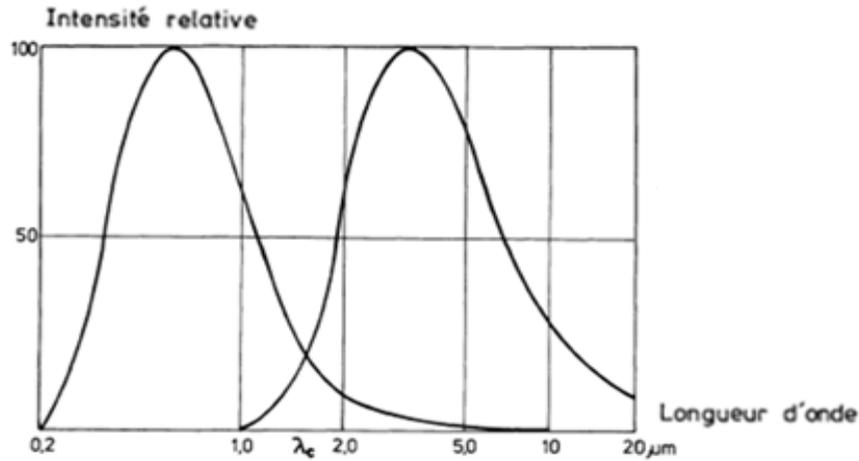
Ainsi le rayonnement thermique émis par un capteur sélectif a la même allure que celui d'un corps noir (à basse température), figure .4.2..



**Figure.4.2.** Spectre de corps noirs en fonction de la longueur d'onde et pour différentes températures

D'autre part, le spectre solaire, en première approximation, s'apparente au spectre d'émission du corps noir de température  $5900 \text{ °K}$ , et comme les températures de conversion

étant dans tous les cas inférieures à 1 000°K, il y a, ainsi que le montre la figure 3, une séparation très nette entre la distribution spectrale du rayonnement solaire et celle du rayonnement thermique émis par le capteur, ce qui permet de définir une longueur d'onde de coupure.



**Figure.4.3.** Intensité spectrale relatives du rayonnement solaire et du rayonnement émis par un corps noirs à 900k.

Les propriétés optiques demandées aux capteurs seront donc en général bien définies pour une température de fonctionnement T par son absorptivité spectrale  $a(\lambda, T) = 1 - R(\lambda, T)$ , et son émissivité spectrale  $e(\lambda, T)$  intégrées dans tout le demi-espace afin de tenir compte de leur anisotropie.

Afin que la sélectivité de la surface se traduise par une absorption maximale dans le spectre solaire et minimale en infrarouge (pour l'intervalle correspondant

à la température de travail), le changement de valeur du coefficient d'absorption doit s'effectuer pour la longueur d'onde de coupure, le capteur sélectif idéal sera alors tel que :

$$\begin{aligned} a(\lambda, T) &= 1 \quad \text{pour } 0 < \lambda < \lambda_c \\ e(\lambda, T) &= 0 \quad \text{pour } \lambda_c < \lambda \end{aligned} \tag{30}$$

La surface de l'absorbeur est alors absorbante ou noire vis-à-vis du rayonnement solaire et réfléchissant ou blanc vis-à-vis du rayonnement infrarouge.

Un tel absorbeur est caractérisé ainsi par le fait qu'il absorbe la quasi-totalité du rayonnement solaire incident comme le ferait un corps noir, mais à la différence de ce dernier, il n'émet que très peu de radiations dans l'infrarouge (Figure 4.4).

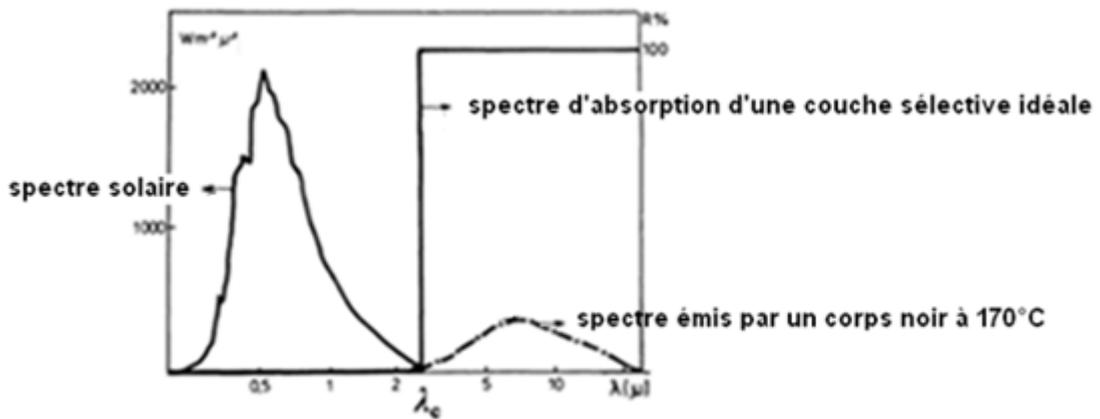


Figure.4.4. Répartition comparatives des spectres.

### III. Influence de la température sur la longueur de coupure

Mais cette propriété optique de sélectivité au électromagnétique dépend de la température [13].

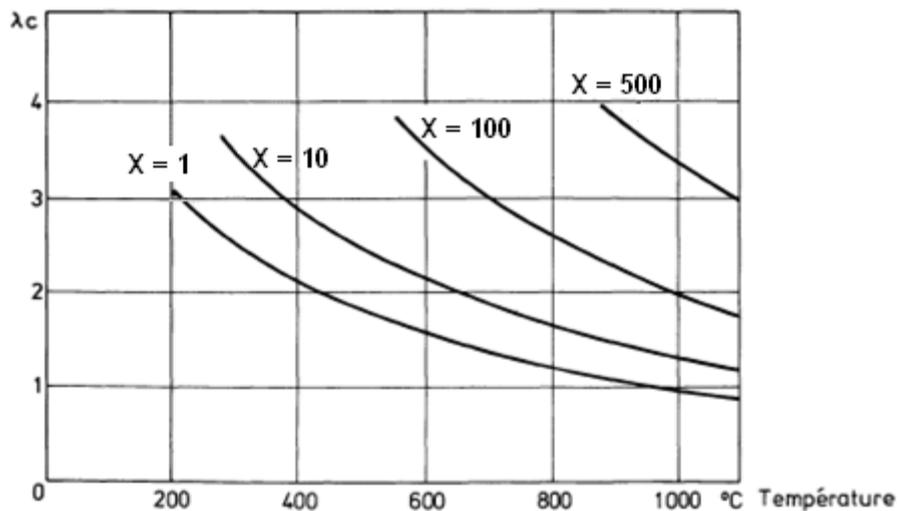


Figure.4.5. Longueur d'onde de coupure optimale  $\lambda_c$  pour un corps parfaitement sélectif en fonction de sa température et pour diverses valeurs du facteur de concentration.

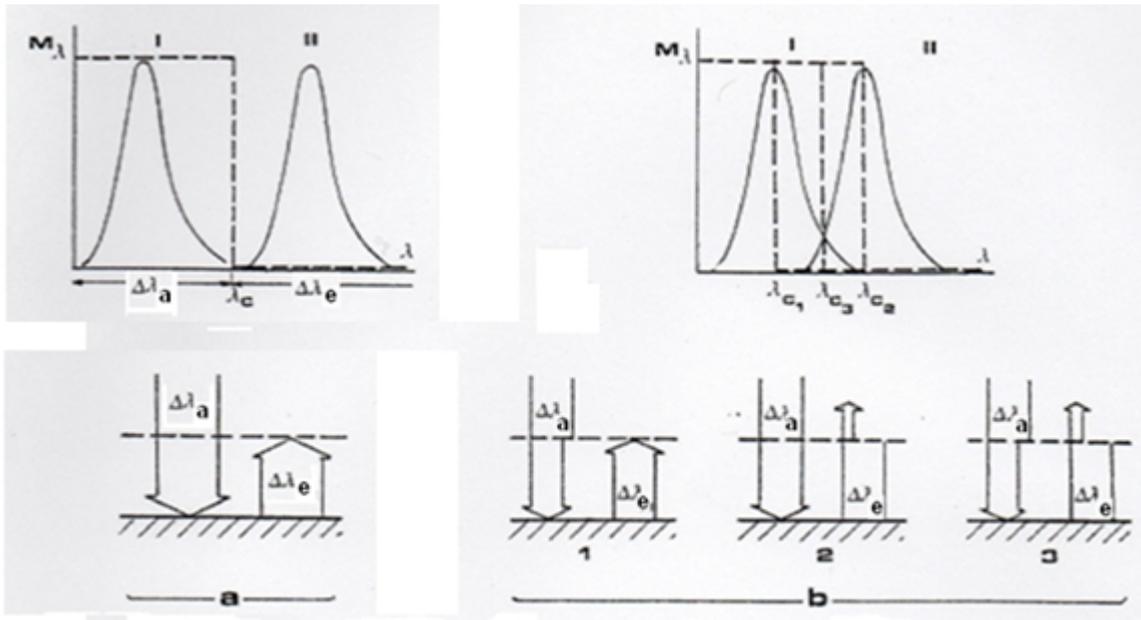
### III. a. Mécanisme de la sélectivité

Des considérations simples sur les échanges radiatifs au niveau du revêtement de l'absorbeur, quel qu'en soit le type, montrent que, suivant la température à laquelle est portée la surface d'absorption, l'établissement des bilans thermiques peut se faire suivant deux schémas distincts, simples dans un cas (basse et moyenne température), plus complexe dans l'autre (haute température). En effet, le revêtement permet au flux solaire d'être absorbé par la surface revêtue, elle doit donc être réalisée avec un matériau transparent pour le domaine spectral  $\lambda_s$  correspondant ( $0.25 < \lambda < 2.5 \mu\text{m}$ ). Si ce revêtement est une surface sélective, elle doit être absorbante pour ce même domaine de longueur d'onde. Par contre, il faut qu'elle s'oppose aux échanges radiatifs avec le milieu environnant. Tant que la température de la surface d'absorption est relativement peu élevée ( $T < 200 \text{ }^\circ\text{C}$ ), les domaines spectraux  $\lambda_s$  et  $\lambda_R$  (domaine spectrale d'émission de la surface absorbante) ne se recouvrent pas (figure 3.a).

On peut donc imaginer l'existence d'un matériau transparent pour  $\lambda_s$  et opaque pour  $\lambda_R$  ou d'une surface sélective absorbante pour  $\lambda_s$  et peu émissive pour  $\lambda_R$ . On voit apparaître, ici aussi, la notion de longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$ , longueur d'onde frontière séparant deux domaines spectraux,  $\lambda_s$  et  $\lambda_R$  à comportement optique différencié.

Il n'en va pas de même à haute température ( $T > 200^\circ\text{C}$ ), car il y a alors recouvrement partiel entre les deux spectres considérés. La longueur d'onde de coupure  $\lambda_c$  ne peut donc plus se trouver dans l'intervalle entre les domaines  $\lambda_s$  et  $\lambda_R$  et, suivant sa position (figure 3.b), il y a amputation d'une partie de rayonnement [9] :

- Soit du spectre solaire incident (et donc diminution du flux solaire pouvant être absorbé par la surface d'absorption) ;
- Soit du spectre d'émission de la surface d'absorption (et donc augmentation des pertes radiatives) ;
- Soit enfin de chacun de ces deux spectres et donc, de manière concomitante, diminution, du flux solaire absorbé et augmentation des pertes radiatives.



**Figure.4.**longueur d’onde de coupure  $\lambda_c$  séparant les domaines spectraux d’absorption et d’émission  $\lambda_a$  et  $\lambda_e$  [9].

Le matériau sélectif recherché devra répondre à cette contrainte de l’effet de la température sur  $\lambda_c$  et être caractérisé par une longueur d’onde de coupure la plus élevée possible de l’infrarouge. Son rendement de conversion sera alors sensiblement augmenté du fait de la réduction des pertes radiatives.

**IV. Surfaces sélectives**

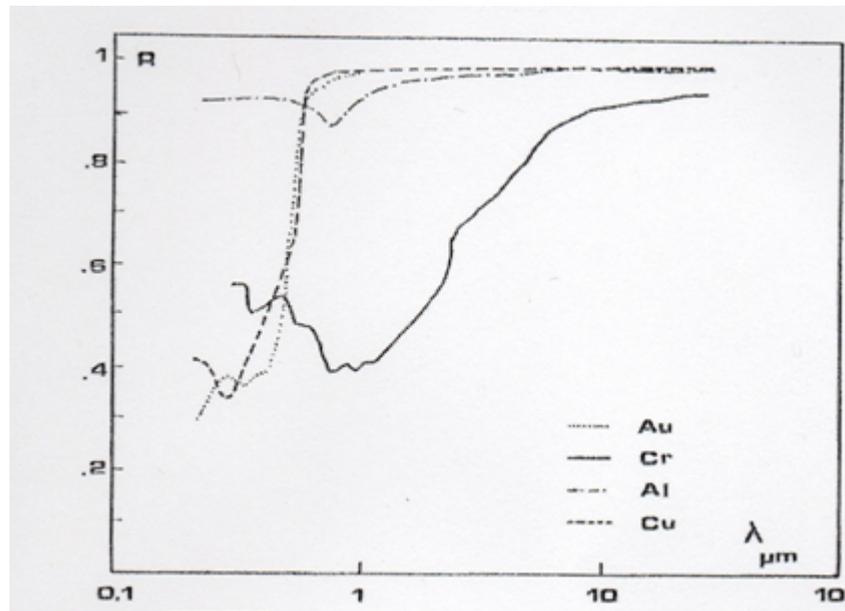
**IV. a. Principes**

Par définition, un matériau sélectif a des propriétés optiques variables avec la fréquence de l’onde électromagnétique qu’il reçoit. Pour exemple, on peut citer verre, quasiment transparent pour le domaine spectral visible et proche infrarouge, opaque pour les longueurs d’onde supérieure à environ  $2.5 \mu m$ . De même, certains organiques comme les plastiques ont un caractère sélectif très marqué, avec de nombreuses bandes d’absorption dans l’infrarouge dues aux rotations et vibration des molécules.

En ce qui concerne la surface absorbante, qui peut être assimilée à un filtre « passe-haut », il n’existe pas de corps, dans la nature, ayant les propriétés optiques idéales requises.

Cependant, quelques matériaux comme le chrome (figure 4.a) a un comportement sélectif favorable pour la conversion thermique de l’énergie solaire, c’est –à-dire qu’ils possèdent une longueur d’onde, plus ou moins bien définie, dans le proche infrarouge. En fait, en générale, toutes les substances présentent des bandes d’absorption plus au moins larges, mais celles-ci

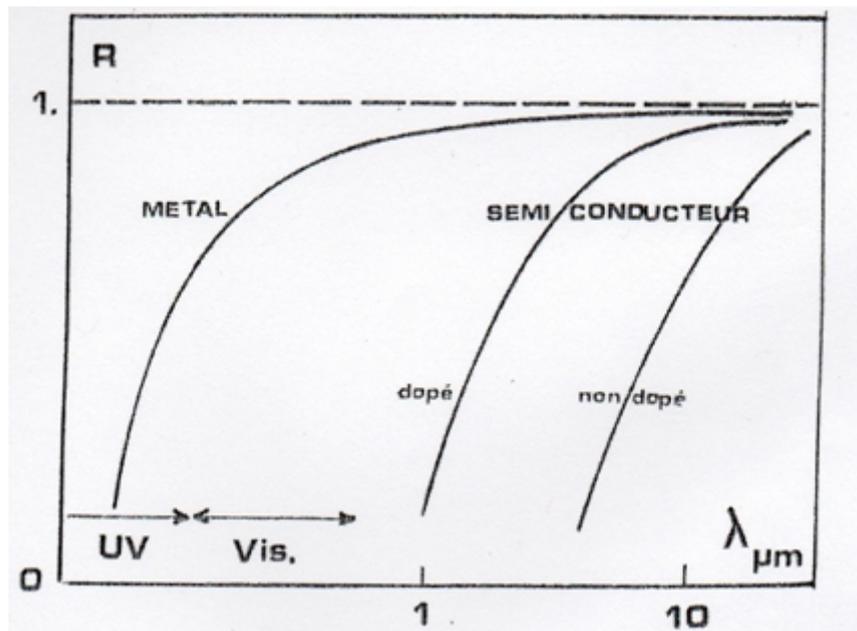
ne sont pas, la plupart du temps, adaptées au problème qui nous intéresse ici, pour les éléments minéraux, on peut, très schématiquement, représenter leurs propriétés optiques par le réseau de courbes de la figure 3.7, où l'on a porté en ordonnée la grandeur  $1 - \alpha$ ,  $\alpha$  étant le facteur d'absorption monochromatique.



**Figure 4.a** Variation de la réflectance en fonction de longueur d'onde pour différents substrats [9].

Cependant, quelques matériaux comme le chrome (figure 1) a un comportement sélectif favorable pour la conversion thermique de l'énergie solaire, c'est -à-dire qu'ils possèdent une longueur d'onde de coupure, plus ou moins bien définie, dans le proche infrarouge.

En fait, en générale, toutes les substances présentent des bandes d'absorption plus au moins larges, figure 4.a. [15], mais celles-ci ne sont pas, la plupart du temps, adaptées au problème qui nous intéresse ici.



**Figure .4.b.** Variation de la réflectance en fonction de longueur d'onde pour les métaux et les semi-conducteurs [9].

On voit que la surface absorbante « chaude » pourrait être obtenue, par exemple, en déplaçant la longueur d'onde de coupure d'un métal vers le proche infrarouge. Il s'agit donc d'élaborer un matériau nouveau. Pour cela, on modifie les propriétés optiques d'un support en déposant sur sa surface une ou plusieurs substances. Ces dernières permettent de réaliser la « sélectivité » désirée, grâce à l'utilisation de phénomènes physiques que l'on peut classer ainsi :

- Interférences constructives ou destructives.
- 
- Effets de rugosités.
- 
- Effets d'inhomogénéités.

Dans les trois cas, les propriétés optiques des matériaux employés interviennent, chacun d'eux pouvant présenter une sélectivité qui lui est propre.

#### IV. b. Mécanisme de la sélectivité spectrale

Le plus souvent, une surface sélective résulte de l'association d'un film et d'un support métallique poli. Le film doit absorber l'énergie solaire et être transparent à l'infrarouge, donc présenter une émissivité thermique faible. Le cuivre, le nickel, l'argent et l'aluminium sont des exemples de métaux à faible émissivité thermique.

L'épaisseur du film absorbant doit rester faible, en générale de quelques dixièmes de microns, car dans ce cas la réflectance du métal de base dans l'infrarouge thermique (c'est-à-dire  $>2\mu\text{m}$ ) n'est que très légèrement modifiée et l'émissivité de la surface est proche de celle de métal de base [10].

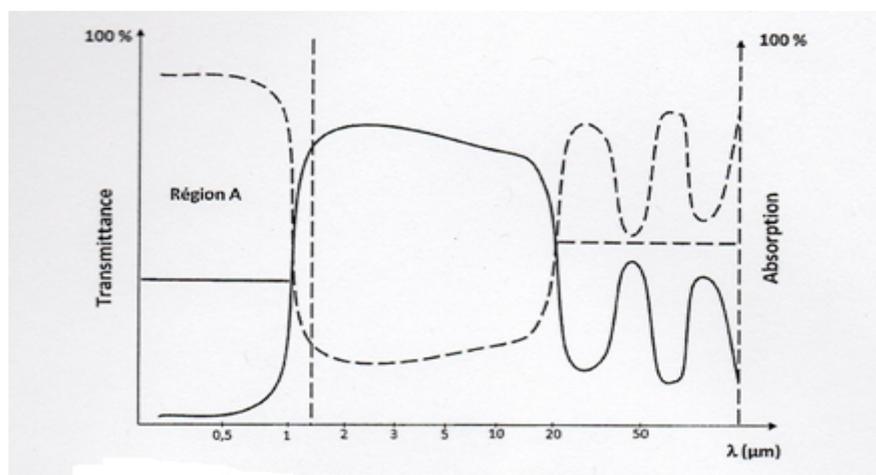
Il existe différentes manières de réaliser de tels films :

#### IV. b.1. Absorption par film semi-conducteur

Un semi-conducteur est caractérisé par la grandeur  $E_g$  appelée gap d'énergie du semi-conducteur est exprimé en électronvolts. Cette quantité  $E_g$  correspond à l'énergie nécessaire pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction ; la zone séparant les électrons de valence des électrons de conduction est appelée bande interdite.

L'énergie des photons diminue lorsque l'on passe de l'ultraviolet à l'infrarouge. Seuls les photons possédant une énergie supérieure à  $E_g$  seront absorbés par le semi-conducteur.

Ceci explique la transition rapide du coefficient d'absorption d'un semi-conducteur dans le proche infrarouge figure 3.8. Le film devient transparent au rayonnement dès que le niveau d'énergie de photons devient inférieur à  $E_g$  [13,14].



**Figure 4.b.1.** Transmission d'un semi-conducteur en fonction de la longueur d'onde. La courbe en pointillé représente l'évolution de l'absorption [10]

Quelques exemples de semi-conducteurs intéressants sont repris au tableau 3.1 [10]

Semiconducteur	$E_g$ (eV)	$\lambda$ (coupure) ( $\mu\text{m}$ )
Si	1,1	1,13
Ge	0,7	1,77
PbS	0,4	3,1
GaAs	1,43	0,88
$\text{Cu}_2\text{S}$	1,2	1,03
$\text{Cu}_2\text{O}$	1,7	0,73
ZnS	3,6	0,34
$\text{MoS}_2$	1,75	0,708

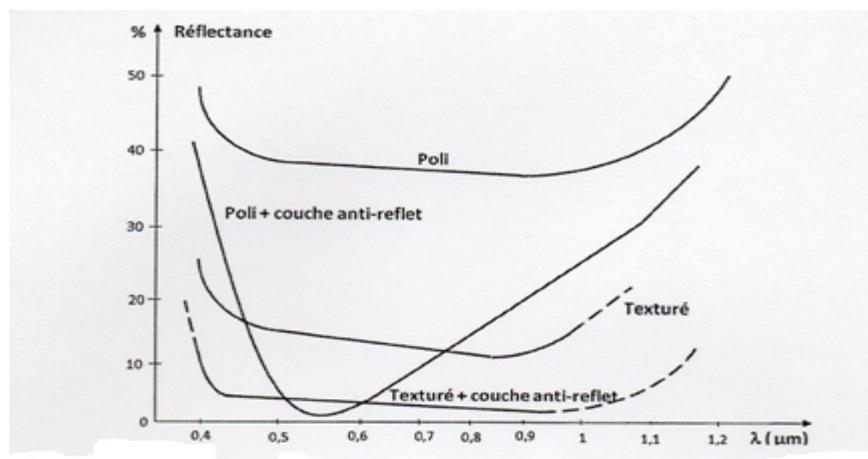
**Tableau 4.1** : longueur d'onde de coupure en fonction de type de semi-conducteur.

Certain semi-conducteur (silicium, germanium, arséniure de gallium...) ont un indice de réfraction élevé avec une réflexion à l'interface semi-conducteur-air importante. Pour diminuer cette réflexion, on peut procéder de deux manières :

- Placer un film anti réflexion mince sur la surface du semi-conducteur poli.
- Texturer la surface du semi-conducteur pour produire des réflexions multiples.

Dans certains cas, on peut produire le passage du semi-conducteur à l'air en plaçant un nombre de couches multiples dont les indices de réfraction diminuent progressivement.

On peut également associer la surface texturée et la couche anti réflexion ; les améliorations obtenues dans chaque cas sont reprises à la figure 3.9 [14].



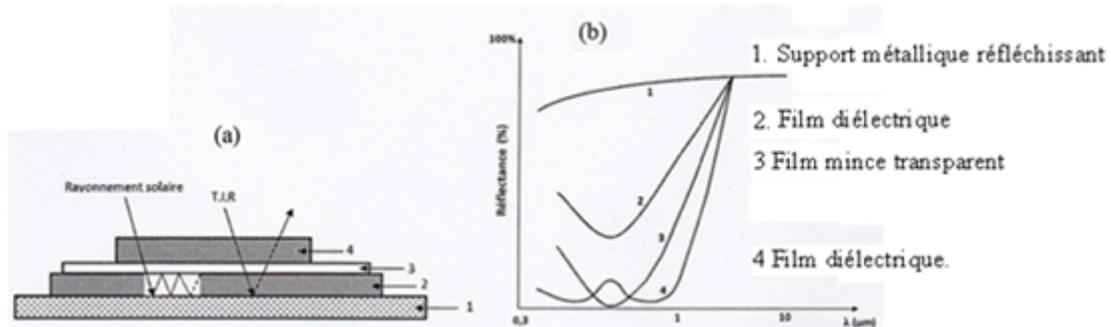
**Figure 3.9** Réflexion à l'interface entre le semi-conducteur (type Silicium) et l'air. Effet d'un film anti réflexion et de la création d'une texture particulière [13]

#### IV. b.2. Absorption dans le film par interférences : film multicouches

Un film mince diélectrique déposé sur un support métallique peut produire une interférence destructive à une longueur d'onde déterminée par l'épaisseur du film son indice. Si le minimum de réflexion se produit vers 0,5-0,6  $\mu\text{m}$ , longueur d'onde correspondant au maximum du rayonnement solaire, une absorption importante de celui-ci pourra se produire [16].

Un film d'interférence efficace est composé de plusieurs couches superposées, P.ex. Quatre couches. La figure 3.10 montre l'effet de chaque couche dans un film à quatre composants. On remarque que :

- La réflexion métallique du support 1 est grande dans l'infrarouge tandis qu'elle décroît légèrement dans le domaine du spectre solaire.
- L'addition d'une couche diélectrique 2 au support métallique diminue nettement la réflexion du métal 1 dans le spectre solaire cette diminution dépend de l'épaisseur du diélectrique.



**Figure.4. (a).**Film d'interférence à quatre composants

**Figure.4. (b).**Rôle des divers parties du films pour l'obtention d'une absorption élevée [16].

L'effet sélectif n'est toutefois pas suffisant, car la réflexion à l'interface diélectrique-air est faible, de sorte que l'effet d'interférence n'est pas très net.

En général, on place au-dessus d'un film d'interférence dans le diélectrique 2 un film métallique 3, mince, transparent ( $\pm 50\text{\AA}$ ) pour pousser au maximum l'effet d'interférence dans le diélectrique 2. La dernière couche 4 de diélectrique permet d'élargir la zone de longueur d'onde à forte absorption + Réflecteur

#### IV. b.3. Absorption par L'empilement Absorbant + Réflecteur

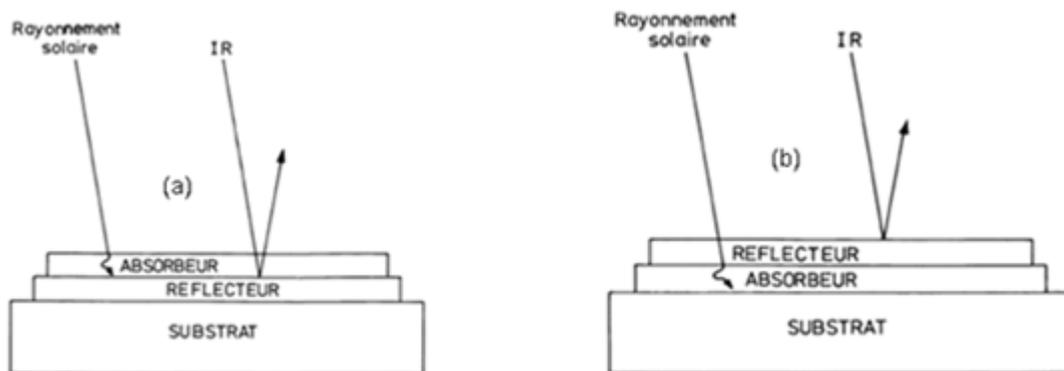
Cette troisième voie consiste à réaliser la surface absorbante par le dépôt successif de deux matériaux dont chacun a une fonction optique bien précise.

L'absorption du rayonnement solaire est obtenue par l'un, et la réflexion dans l'infrarouge par l'autre. Le couplage absorbant + réflecteur peut être conçu de deux manières.

Dans le premier cas (Figure b.a) on dépose sur un matériau réflecteur dans l'infrarouge (argent, cuivre, aluminium, molybdène...) une couche mince d'un matériau absorbant le

rayonnement solaire tout en étant transparent dans l'infrarouge (silicium, germanium, sulfure de plomb...).

Dans le deuxième cas (Figure b) on dépose sur un matériau absorbant au moins le rayonnement solaire une couche d'un matériau transparent pour le spectre solaire et réflécheur dans l'infrarouge (oxydes d'étain ou d'indium dopés...).



**Figure.4.b.** Fonctionnement schématique de l'absorbeur du type réflecteur+absorbeur.

#### IV. b.4. Sélectivité par utilisation de surfaces texturées

Cette dernière voie consiste à utiliser l'influence de la morphologie sur les caractéristiques optiques d'une surface (Figure 4.c.a.).

En réglant la rugosité de la surface absorbante, on peut produire des effets optiques différents dans le visible et dans l'infrarouge thermique.

Lorsque l'amplitude moyenne de la rugosité de surface est comprise entre 2 et 5  $\mu\text{m}$ , le coefficient d'absorption dans le spectre solaire est plus important et la surface a un pouvoir de réflexion élevé pour les radiations thermiques infrarouges, donc une émissivité relativement faible [17].

De telles surfaces texturées peuvent être obtenues par attaque chimique ou électrochimique du support, par sablage ou microbillage, ou par évaporation sous vide.

On peut accroître le coefficient d'absorption solaire d'une surface déjà peu émissive (donc faiblement absorbante) dans l'infrarouge par des réflexions multiples (figure 4.c.b) [21] sur des irrégularités de surface de géométrie et de dimensions convenables, sans pour autant accroître notablement l'émissivité infrarouge.

Le nombre de réflexions multiples dépend de l'ouverture de la macro profil et de l'indice du rayonnement [22].



**Figure. 4. c.**Réflexion multiple sur un macroprofil en dent de scie [9]

Fonctionnement schématique de l'absorbeur sélectif utilisant effets de texture de la surface.

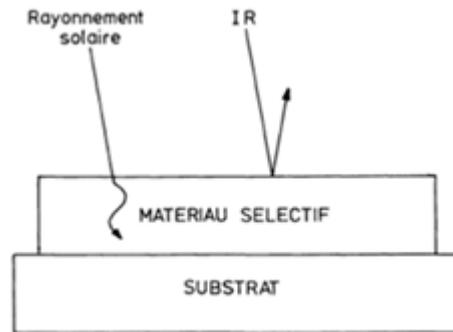
Le nombre de réflexions multiples (Figure b) dépend d'ouverture de la macro profil et de l'indice du rayonnement [14].

#### IV. b.5. Réflecteurs infrarouges (L'empilement absorbeur + réflecteur)

L'effet de serre est un dispositif susceptible de créer une sélectivité. On améliore l'efficacité en utilisant une couverture transparente pour le spectre solaire, réfléchissante dans l'infrarouge. Pour obtenir un tel résultat, on dépose sur le verre, ou un matériau transparent, une couche mince dont les propriétés optiques sont ainsi définies. Le rayonnement solaire atteint la surface d'absorption alors que l'infrarouge émis par cette dernière lui est restitué après réflexion. La principale difficulté réside dans l'obtention d'un facteur de transmission élevé pour les radiations du spectre solaire. Le tableau suivant donne quelques valeurs des facteurs optiques :

Composition	$\tau$ à 0.5 $\mu\text{m}$	R à 10 $\mu\text{m}$
TiO <sub>2</sub> -Ag-TiO <sub>2</sub>	84%	99%
Au (200 Å)	30%	96%
SnO <sub>2</sub> dopé Sb	80%	90%
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dopé Sn	84%	90%
Microgrille In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> dopé Sn	90%	83%

On peut trouver d'autres méthodes pour la réalisation de la sélectivité spectrale sur le vitrage ou sur la surface de l'absorbeur d'un capteur plan ou non, travaillant avec ou sans concentration du rayonnement solaire [18]. En considérant les différents processus physiques mis en jeu.



**Figure4.d.** Fonctionnement schématique de l'absorbeur sélectif intrinsèque.

Ces études approfondies ont été faites pour évaluer les différents phénomènes physiques qui permettent de réaliser des surfaces sélectives [17].

L'obtention de structures de surfaces qui répondent au mieux à la sélectivité est possible avec :

- utilisation d'un matériau ayant des propriétés sélectives intrinsèques ;
- utilisation d'un filtre interférentiel réalisé par l'empilement de couches alternées de deux matériaux ayant des indices optiques différents (en général un métal et un diélectrique) ;
- utilisation d'un empilement absorbeur plus réflecteur.
- utilisation des effets de diffusion de la lumière, soit dans le volume, soit à la surface du matériau;

En considérant les différents processus physiques mis en jeu que nous venons d'observer, on peut décrire les voies correspondantes permettant de réaliser la sélectivité spectrale sur le vitrage ou sur la surface de l'absorbeur d'un capteur plan ou non, travaillant avec ou sans concentration du rayonnement solaire [18].

#### **IV. c. Matériaux intrinsèques**

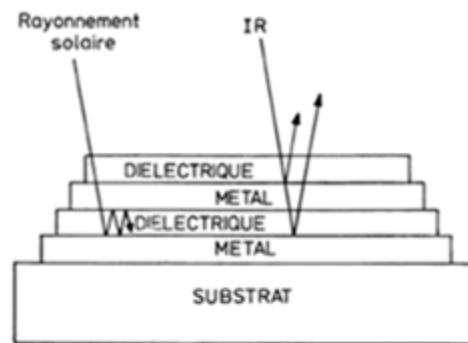
Cette solution consiste à utiliser un matériau qui, par ses propriétés intrinsèques (notamment sa structure électronique) présente un comportement optique spectralement sélectif.

On connaît des matériaux sélectivement absorbants et transparents. Ainsi, les oxydes diélectriques sont transparents dans le visible et absorbants dans l'infrarouge. A l'opposé, des semi-conducteurs dont le gap est bien choisi, par exemple le silicium, sont transparents dans l'infrarouge et absorbants dans le visible. On connaît aussi le cas de matériaux sélectivement transparents et réflecteurs. Ainsi, les oxydes d'indium et d'étain dopés sont transparents dans le visible et réfléchissants dans l'infrarouge et peuvent par conséquent servir de revêtement sélectif pour le vitrage

#### IV. d. Filtre interférentielle

La réalisation d'un filtre interférentiel par empilement de plusieurs couches

Alternées de deux matériaux ayant des indices optiques différents (en général un métal et un diélectrique) et des épaisseurs bien contrôlées peut également conduire à l'effet sélectif recherché (Figure 10) [19]



**Figure.4.c.** Fonctionnement schématique de l'absorbeur sélectif de type interférentiel.

Ce procédé est malheureusement délicat et coûteux à mettre en œuvre.

#### V. Propriétés optiques

Il est plus judicieux de considérer séparément les facteurs d'absorption  $\alpha$  et d'émission  $\varepsilon$  que le rapport  $\frac{\alpha}{\varepsilon}$ , parfois utilisé, et qui ne permet de déterminer que la température de stagnation du capteur, température atteinte lorsqu'une calorie n'en est extraite. Cette température, calculée à partir du bilan énergétique simplifié s'exprime en négligeant les pertes conductrices et convectives par [5] :

Partant de la même forme simplifiée du bilan énergétique on peut également constater qu'une surface sélective dont les caractéristiques optiques locales sont  $\alpha$  et  $\varepsilon$  aura un moins bon rendement, dans les mêmes conditions de fonctionnement qu'une surface dont les caractéristiques optiques sont  $\alpha + \delta\alpha$  et  $\varepsilon + \delta\varepsilon$ , si la relation suivante est satisfaite [5] :

$$\frac{\delta\alpha}{\delta\varepsilon} > \sigma \quad (T_a^4 - T_0^4 / E^s) \quad (31)$$

Cette inégalité signifie que l'accroissement de l'énergie solaire absorbée est supérieur à l'accroissement des pertes radiatives. On peut ainsi évaluer l'intérêt de différents absorbeurs

sélectifs en tenant compte à la fois des propriétés optiques de l'absorbeur et des conditions de fonctionnement du capteur.

## VI. Stabilité physicochimique

La surface sélective devra supporter la température de fonctionnement, des cycles thermiques d'amplitude et de durée très variables, quelques excursions à sa température de stagnation  $T_{max}$  en cas d'arrêt de la circulation du fluide de transfert.

Ces contraintes externes peuvent entraîner un certain nombre de détériorations de la surface sélective. Un premier type de détérioration peut être du à un trop grand écart entre les coefficients de dilatation du substrat (en générale cuivre, aluminium ou acier à faible teneur en carbone) et des matériaux composant la surface sélective. Un second type de détérioration est la diffusion d'une couche dans une autre : diffusion chimique ou par les joints de gains. Ce processus conduit dans les deux cas à une détérioration rapide.

Ce risque est particulièrement grand dans le cas où la sélectivité est obtenue par effet d'interférences.

On peut réduire le risque de diffusion en interposant des barrières de diffusion entre les couches optiquement actives, mais il est bien évident que, plus l'empilement réalisé pour obtenir la sélectivité est complexe, plus grand est le risque de détérioration par inter diffusion.

Enfin, en plus de leur stabilité thermique, les surfaces sélectives doivent être chimiquement inertes, ou pour le moins présenter une cinétique de réaction extrêmement lente afin de résister aux divers types de corrosion auxquels elles peuvent être soumises.

## VII. Traitement de surface

Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductivité thermique et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés en plaques de cuivre ou en aluminium de 0,2mm d'épaisseur et leurs surfaces sont traitées

Le rôle de l'absorbeur est de capter le maximum de rayonnement et d'en réfléchir le moins possible. Ces types de surfaces absorbant le maximum et réémettant le minimum sont nommés « surfaces sélectives ».

La sélectivité de l'absorbeur est très importante ; elle est améliorée au moyen de traitement de surface qui ajoute à la plaque absorbante (support) des caractéristiques de telle sorte que le rayonnement solaire soit très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis ( du à l'échauffement) soit limité .

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

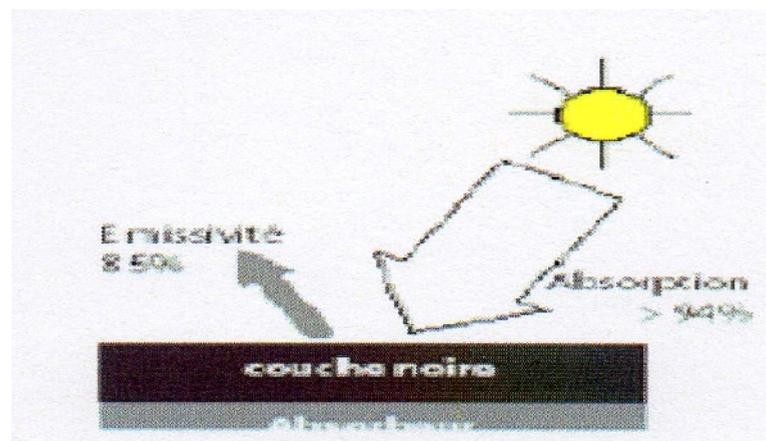
- $\alpha$  : coefficient d'absorption (0 à 1, optimum : 1)

-  $\varepsilon$  : coefficient d'émission (0 à 1, optimum : 0)

Un tel traitement de surface peut être obtenu par des procédés électrochimiques ou électro physiques. De nombreux progrès ont été réalisés dans ce domaine. Les plus importants, classés par ordre d'apparition, seront présentés et comparés par rapport à la peinture noire. Est de 0.95 et son coefficient d'émission  $\varepsilon$  est de 0.85.

### VIII. Quelques revêtements possibles

- A. La peinture noire :** la peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption compris entre 0.9 et 0.95, mais son degré d'émission est très élevé (0.85) (figure 8.1).



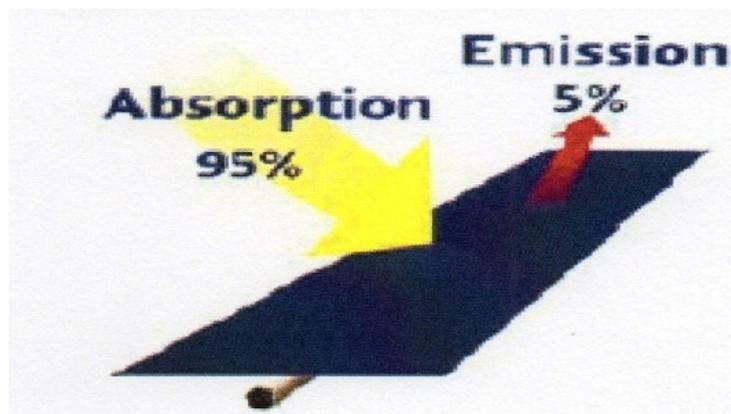
**Figure 8.1.** Interaction du rayonnement solaire avec une couche de peinture noire [7].

**B. Oxyde de chrome :** le revêtement en « black chrome » (couleur noir) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique. Son coefficient d'absorption est de 0.95 et son coefficient d'émission  $\varepsilon$  varie entre 0.12 à 0.18 (figure 8.2).



**Figure 8.2.** Absorbeur revêtu par une couche d'oxyde de chrome.

**C.Traitement sous vide :** ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par couleur bleu marine. Ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane,.....) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption obtenu est supérieur à 0.95 et le coefficient d'émission, inférieur à 0.05 (figure 8.3).



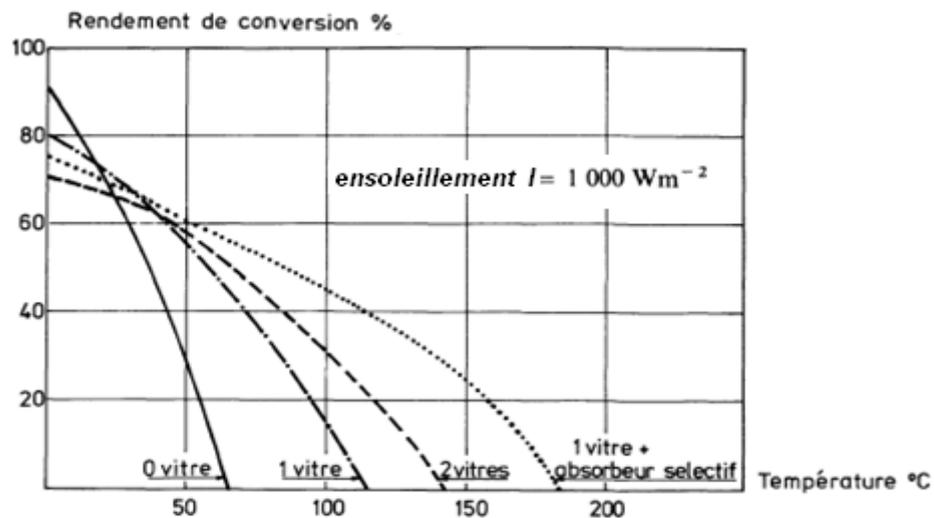
**Figure 8.3.** Interaction du rayonnement solaire avec un absorbeur traité sous vide.

### VIII. Critères de choix d'une surface sélective

Trois facteurs devront être pris en considération avant de choisir une solution à un problème donné [8] :

- La stabilité des propriétés optiques.
- La stabilité physicochimique.
- Le coût de réalisation des surfaces sélectives.

### VX. Intérêt des surfaces sélectives



**Figure.8.4.** Rendement de conversion en fonction de la température pour différents types de capteurs.

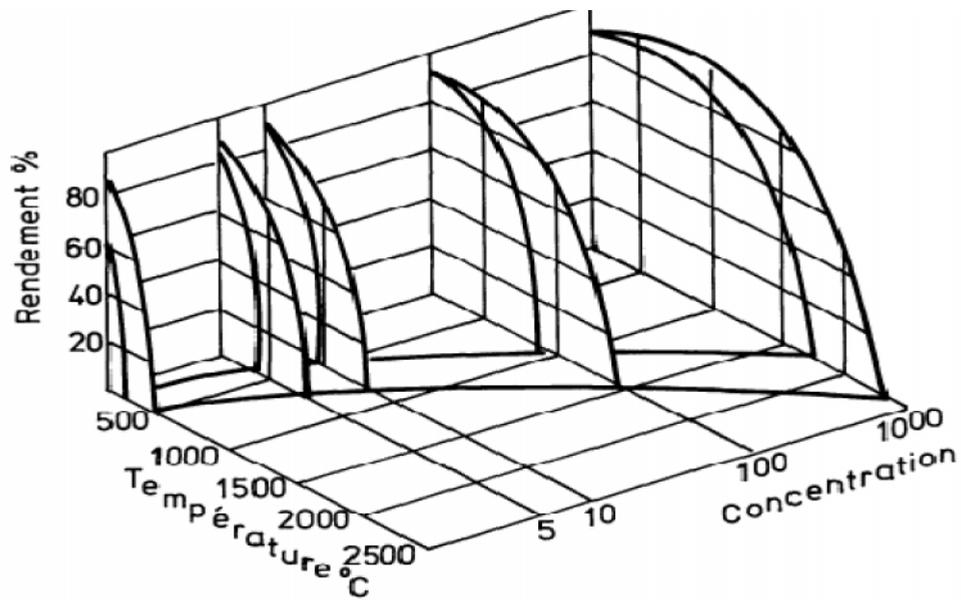
Le gain est appréciable à toutes les températures et particulièrement au-delà de 60 °C. On remarque aussi que le rendement d'un absorbeur sélectif recouvert d'un simple vitrage est supérieur à celui d'un absorbeur non sélectif équipé d'un double vitrage.

L'utilisation simultanée d'un vitrage sélectif et d'un absorbeur sélectif ou d'un double vitrage non sélectif et d'un absorbeur sélectif ne conduit pas à une amélioration sensible des performances tout en entraînant un surcoût important. Il convient de noter que des températures supérieures à 100 °C peuvent être obtenues avec des capteurs plans sélectifs avec un rendement de conversion acceptable. Ce type de capteur peut donc être utilisé avec efficacité pour toutes les applications aux moyennes températures : réfrigération, conditionnement d'air, dessalement de l'eau.

Pour les hautes températures solaires, il est nécessaire d'utiliser des systèmes concentrateurs du flux solaire et dans ces conditions on a vu que les pertes par convection et conduction pouvaient être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives.

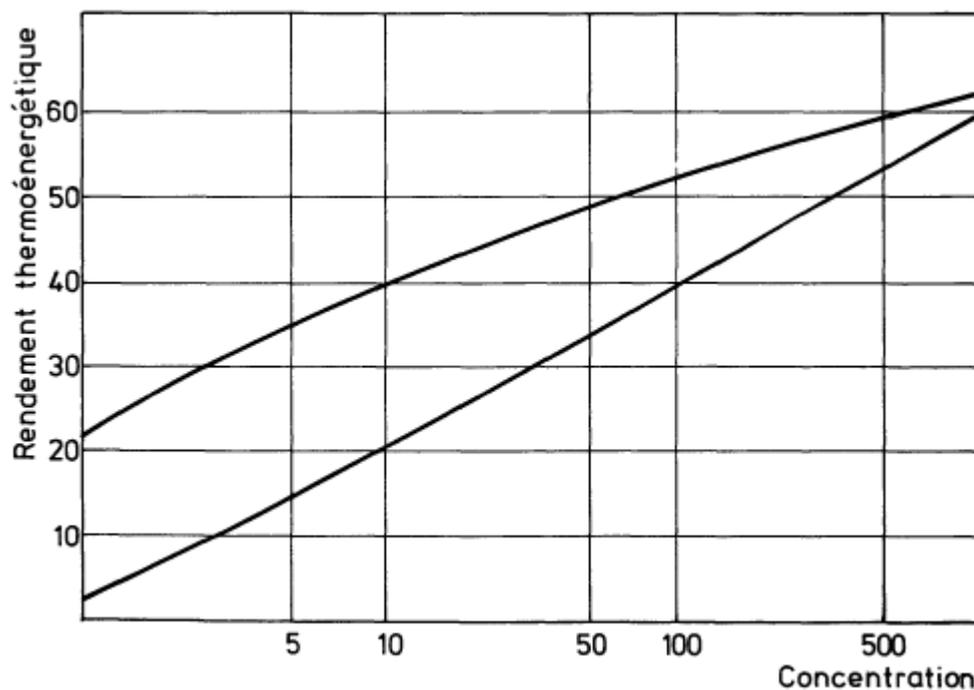
- Sur la figure 4 on peut comparer les rendements de conversion d'un capteur sélectif à ceux d'un capteur se comportant comme un corps noir.

On constate que dans tous les cas la sélectivité conduit à une augmentation de rendements mais que ce gain n'est vraiment intéressant que pour des facteurs de concentration inférieurs à 100 et pour des températures inférieures à 1 000 K.



**Figure.8.5.**rendement de conversion d'un capteur sélectif ( $a=1 ; e=1$ ) et d'un capteur non sélectif ( $a=1 ; e=1$ ) en fonction de la température et pour diverses valeurs du facteur de concentration.

La figure .8.6. Nous représente le rendement d'un capteur sélectif et d'un capteur non sélectif à la température de conversion optimale en fonction du facteur de concentration.



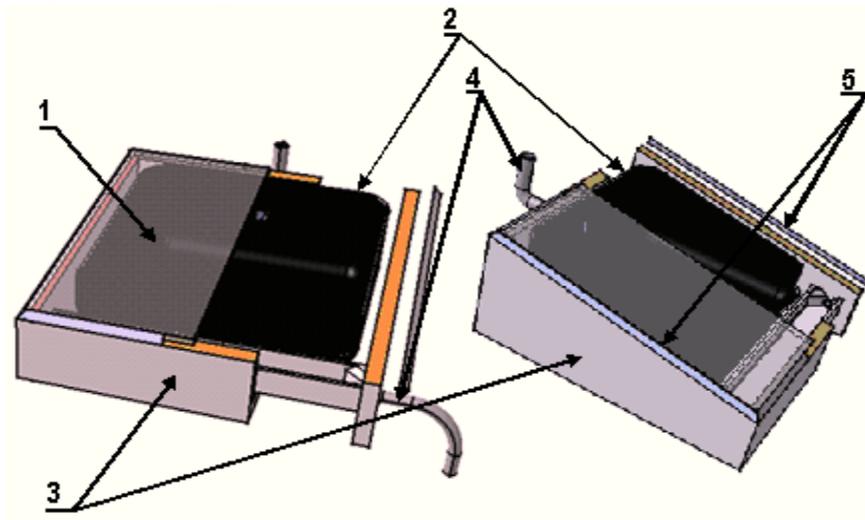
**Figure8.7.** Rendement thermo-énergétique d'un capteur sélectif ( $a=1, e=1$ ) et d'un capteur non sélectif ( $a=1, e=1$ ) à la température de conversion optimale en fonction du facteur de concentration.

On remarque que le gain introduit par la sélectivité est équivalent à celui produit par une multiplication par 10 du facteur de concentration.

On observe bien une amélioration significative du rendement de conversion des capteurs sélectifs comparés aux capteurs non sélectifs.

Ceci confirme bien l'intérêt des surfaces sélectives dans la conversion photo thermique particulièrement haute température.

- Expérimentalement on a utilisé quelques matériaux sélectifs comme le (peinture noire, polymère noir, et l'aluminium gris mate pour la surface absorbante, et l'aluminium brillant, et peinture noire pour l'isolation extérieure, pour avoir des résultats en réalité en va voir c'est résultats dans le chapitre suivant, pour le vitrage on a utilisé un simple verre transparent, donc la conception et le choix des matériaux des éléments constitutifs des distillateurs solaires sont faits sur la base d'une étude tenant compte de plusieurs paramètres techniques et économiques. On distingue



**Figure.8.8.** schéma descriptif du distillateur simple effet en verre incliné.

- 1-couvercle transparent en verre
- 2-matériau absorbant en polymère noir
- 3-boîtier en bois avec matériau isolant intégré
- 4-tuyaux de collecte et d'admission de l'eau distillée et de l'eau salée
- 5-joint d'étanchéité du système

### ***1\_La Couvertures :***

L'utilisation des couvertures transparentes permet de réduire les pertes thermiques par rayonnement et par convection il y a trois types de matériaux des couvertures:

- le verre le plus utilisé,

- polymère plastique avec ou sans traitement peut être utilisé pour piéger les rayonnements. Les caractéristiques thermiques de chaque matériau donnent des résultats différents.

### *1. A. Film en verre :*

Ce type de matériau laisse traverser 84% à 92% du rayonnement solaire sous une incidence normale pour un film en verre de 2 à 3 mm d'épaisseur. La transmission du Rayonnement solaire dépend de la position de distillateur solaire, l'inclinaison du verre et la contenance de ce matériau, qui absorbe les rayonnements de grandes longueurs d'onde de lumière solaire. La composition du matériau est à base d'oxyde de fer ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) qui additionné à de faible quantité permettra d'obtenir une bonne transmission de rayonnement qui peut dépasser 90%.

Mais le verre présente l'inconvénient d'être fragiles aux chocs mécaniques, de présenter un faible transfert thermique par conduction et une meilleure viscosité sur les Parois par rapport au matériau plastique normal.

### *1. B. Film plastique :*

Le film plastique contient les mêmes caractéristiques que le verre pour laisser passer Les rayonnements solaires et minimiser les pertes thermiques par convection. Le coefficient de transmission de rayonnement solaire est de 80% avec incidence normale.

Le film plastique ne peut être utilisé pour un simple distillateur solaire en raison du prix de renouvellement après usage où ses performances diminuent avec le temps. Il présente l'avantage de résistance aux chocs mécaniques, et aux agents chimiques et une faible densité et inertie Thermique.

**Tableau 1** : Transmissivité de différents types de matériaux de couverture des distillateurs solaire dans la bande de visibilité et infrarouge.

Matériaux	Transmissivité à incidence normale	
	$\lambda = 0.4-2.5\mu\text{m}$	$\lambda = 2.5-10\mu\text{m}$
Le verre	0.83-0.91	0.0-0.03
Les plastiques en feuilles	0.76-0.92	0.02-0.06
Les plastiques en films	0.85-0.87	0.20-0.26

### 1. C.Absorbeur :

Le matériau absorbeur a pour rôle d'absorber tous les rayons solaires qui sont Transformés en chaleur pour chauffer l'eau salée dans le fond du distillateur. L'absorbeur est un élément principal dans le distillateur à simple effet. Les recherches sur les matériaux absorbeurs ont pour but de rechercher une absorbance maximale des Rayonnements solaires, d'augmenter l'efficacité et le rendement.

L'absorption idéale qui absorbe tout les rayonnements solaire (direct, diffuse et Réfléchi), doit avoir une émissivité de l'ordre de l'unité ( $\epsilon = 1$ ).

La conception et le choix d'un absorbeur sont basés sur trois facteurs

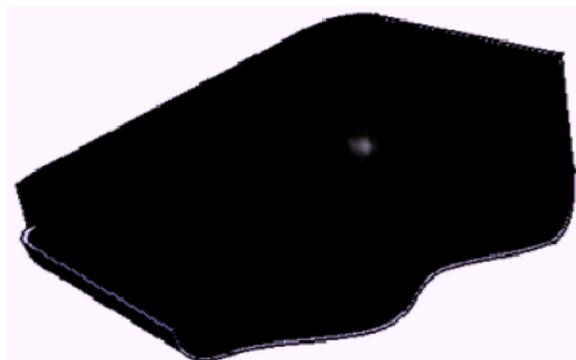


Figure8.9 plaque de l'absorbeur en matériau polymère

- : facteur d'absorption

- : facteur de transmission (corps noir)
- : facteur de puissance total

Et

- un facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- un pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible
- une bonne conductibilité et diffusivité thermique
- une faible inertie thermique
- une bonne résistance chimique vis-à-vis de l'eau qui le baigne

Pour avoir une absorption complète, le matériau choisi ne doit pas présenter de *Couleurs brillantes* ce qui augmentera le rayonnement des rayons réfléchis. Le facteur d'absorption varie suivant la couleur de la surface utilisée, le tableau suivant donne quelques valeurs.

**Tableau 2** : Absorption des différentes couleurs de surface

Couleur	$\alpha$	$\rho$	$\varepsilon$	$\alpha/\varepsilon$
Peinture blanche	0.2	0.8	0.91	0.22
Peinture verre	0.5	0.5	0.9	0.56
Peinture noir	0.96	0.08	0.9	1

Les matériaux des absorbeurs les plus utilisés sont des matériaux métalliques : aluminium, cuivre ou fer et des matériaux polymères tels que le polypropylène, le polyphényloxyde (P.O.P)...

#### 1. d. Matériaux métalliques

*L'aluminium* c'est un matériau léger, inoxydable grâce à sa structure métallique ( $Al_2O_3$ ) la conductivité est moyenne parmi les autres matériaux. Sa surface qui reçoit les rayonnements solaires est grise, elle doit être recouverte d'une couche mince de peinture noire pour augmenter le pouvoir d'absorption de la plaque.

*Le cuivre* est un matériau meilleur absorbeur et plus coûteux, mais le plus oxydable ( $CuSO_4$ ). *Le fer* est un matériau le plus utilisé dans l'industrie lourd possédant des propriétés oxydables. La conductivité est faible, ce type de matériau nécessite un traitement de surface pour éviter la corrosion et améliorer la conductivité par recouvrement avec une peinture noir non brillante. Les caractéristiques d'absorption de la plaque sont augmentées.

**1. e. Matériaux plastiques**

Les matériaux plastiques peuvent remplacer le métal qui présentent des caractéristiques tel que : matériaux légers, moins cher et insensibles à la corrosion. Parmi les matières plastiques utilisées on a le polypropylène, le polyphényloxyde (P.O.P) qui résiste a la température de 150°C malgré sa conductivité thermique très faible par rapport aux métaux. Le tableau suivant donne quelques valeurs de conductivité thermique de différents absorbeurs à 20°C.

**Tableau 3** : propriétés d'absorption de quelque solide à 20°C**Tableau 2** : Absorption dede quelques matériaux solides à 20°C

Nature a corps	Masse volumique $\rho(\text{Kg/m}^3)$	Chaleur massique $C_p(\text{J/Kg.K})$	Conductivité $\lambda$ w (m.K)	Diffusivité a $\text{m}^2/\text{s}$
Argent	10500	$0.23 \times 10^3$	418	$1.71 \times 10^{-4}$
Cuivre	8940	$0.38 \times 10^3$	389	$1.14 \times 10^{-4}$
Aluminium	2700	$0.86 \times 10^3$	200	$0.86 \times 10^{-4}$
Acier (0.1 C)	7850	$0.49 \times 10^3$	46	$0.12 \times 10^{-4}$
Acier inox	7900	$0.51 \times 10^3$	16	$0.04 \times 10^{-4}$

**1. f. Matériaux isolants**

L'isolation joue un rôle important dans le domaine des applications thermiques pour limiter les pertes par conduction vers extérieur au niveau du bassin et les cotés du distillateur solaire. Les caractéristiques demandées du matériau isolant sont:

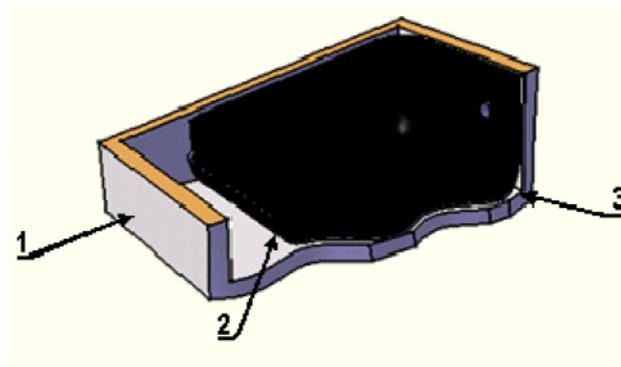
- Bonne isolation avec un bon rendement en eau distillée
- Faible inertie thermique, faible densité
- Faible convection thermique
- Une résistance thermique dans l'écart des températures

Le tableau suivant donne quelques caractéristiques de matériaux isolants et le choix tiendra compte des critères techniques mais aussi économiques.

**Tableau 4** : conductivité thermique de quelques matériaux isolants

Désignation	$\kappa$ (w/m.k)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Température Maxi D'utilisation	Observation
<b>Laine de verre</b>	<b>0.034 à 0°C</b> <b>0.053 à</b> <b>200°C</b>	<b>70</b>	<b>150</b>	Sensible à l'humidité
<b>Mousse de verre</b>	<b>0.057</b>	<b>123</b>	<b>150</b>	Sensible à l'humidité
<b>Bois</b> <b>Bois aggloméré</b> <b>Sciure de bois</b>	<b>0.13 à 0.4</b> <b>0.1</b> <b>0.11</b>	/	/	
<b>Liège expansé</b>	<b>0.045</b>	<b>100</b>	<b>110</b>	
<b>Polystyrène</b>	<b>0.042</b> <b>0.04</b>	<b>15</b> <b>17</b>	<b>85</b> <b>85</b>	Moulé comprimé
<b>Polyuréthane</b>	<b>0.035</b> <b>0.027</b>	<b>35</b> <b>35 - 40</b>	<b>85</b> <b>110</b>	Moulé comprimé

Notons en particulier, que le vide est le meilleur isolant, mais sa réalisation technique est délicate.



**Figure.8.11.** représentations du boîtier avec isolation

1. support de boîtier en bois, 2. Absorbeur, 3. Isolation par air.

## X.Principe de fonctionnement du distillateur simple effet

Le rayonnement solaire incidents sur le verre traverse ce dernier et est absorbé par l'absorbeur. L'absorbeur réémet à une température dont le spectre se trouve décalé vers les fortes longueurs d'onde pour lesquelles le facteur de transmission de la vitre est faible . La majeure partie de l'énergie incidente se trouve donc emprisonnée à l'intérieur du système, ce phénomène constitue « l'effet de serre » .Si l'on verse une nappe d'eau d'épaisseur faible sur l'absorbeur, l'énergie émise par ce dernier l'échauffe en provoquant ainsi son évaporation.

L'eau évaporée vient en contact de la vitre qui ayant un coefficient d'absorption très faible se trouve donc à une température plus basse par rapport à la vapeur d'eau, d'où la condensation de la vapeur, recueillie ensuite sous forme d'eau distillée.

### **Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a essayé de toucher les différents matériaux utilisés et méthodes appliquées pour la réalisation de ces surfaces sélectives, est de voir leur importance pour l'amélioration du rendement et l'absorption de ces surfaces, et la diminution des pertes radiatives, on verra aussi les différentes propriétés optiques et physico-chimiques qu'elles doivent avoir dans ces matériaux, ensuite on a cité quelques matériaux possibles comme : 'la peinture noire, oxyde de chrome, est le traitement sous vide, est de voir leur rôle dans cette opération, et à la fin noter quelques critères de choix d'une surface sélective, c.-à-d., il faut que c'est condition trouvée dans ces surfaces. Et finalement voir le coût.

On a vu aussi l'intérieur des surfaces sélectives pour l'amélioration des rendements des différents capteurs, plan ou concentrés.

Et on a parlé sur la partie expérimentale, le type de système de captation solaire utilisé, et les différents matériaux sélectifs qui ont été appliqués dans notre travail expérimental (peinture noire, polymère noire, aluminium, peinture blanche), et on a cité notre bilan énergétique du travail, et à la fin on a parlé sur le principe de fonctionnement de ce système.

## **I. Introduction**

Dans ce chapitre on va voir, les différents modes de transfert thermique, et les principaux effets intervenant dans un capteur, la détermination des pertes thermiques et leur bilan énergétique.

## **II. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire**

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure III.1).

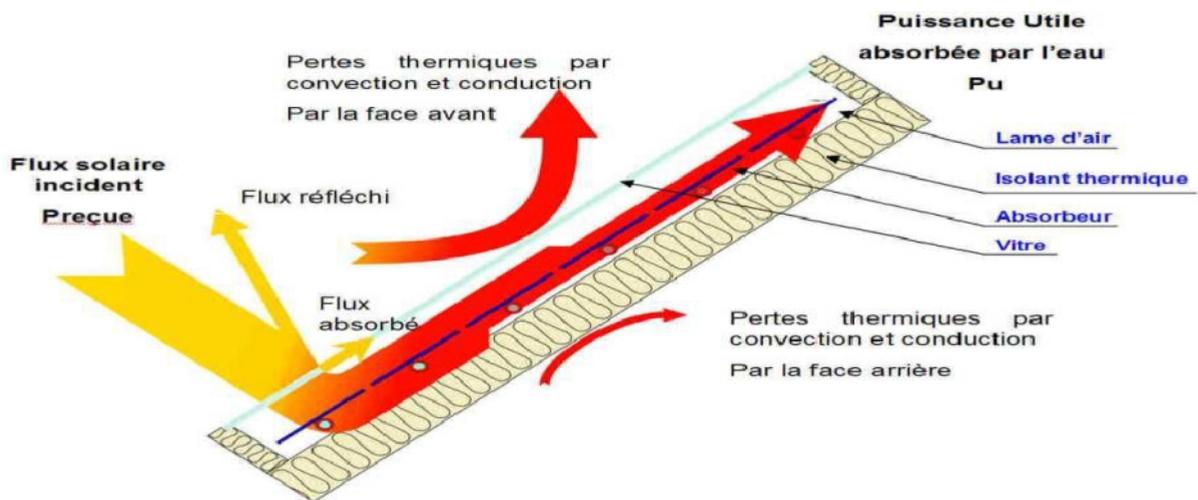


Figure II.1. Les différents échanges thermiques dans un capteur plan

## II-1-Transfert par conduction

La conduction est le mode de transfert de chaleur caractérisé par la propagation de l'énergie thermique dans un milieu matériel sans déplacement de la matière [22].

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation [22]:

$$q = -k \times A \times \text{grad } T \quad (31)$$

q : flux de chaleur.

K : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange

Dans le capteur plan les échanges par conduction existent principalement entre :

- Les faces supérieure et inférieure de la vitre hcv.
- Les faces supérieure et inférieure de l'isolant his.
- L'absorbeur et l'isolant hcvai.

Le flux de chaleur par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par [23]:

$$q_{cdai} = \frac{T_{ab} - T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_2} \quad (32)$$

$\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont exprimés par :

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{s_{abi} \times k_i} + \frac{e_i}{s_{abi} \times k_{ab}} \quad (33)$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{s_{abil} \times k_{il}} + \frac{e_{il}}{s_{abil} \times k_{ab}} \quad (34)$$

$q_{cdai}$  : quantité de chaleur échangée par conduction entre l'absorbeur et l'isolant.

$T_{ab}$  : température de l'absorbeur.

$T_{ii}$  : température de la face intérieure de l'isolant.

Til : température de l'isolant latéral.

eab : épaisseur de l'absorbeur.

sabi : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

ki : conductivité thermique de l'isolant horizontal.

ei: épaisseur de l'isolant horizontal.

eil: épaisseur de l'isolant latéral.

kab: conductivité thermique de l'absorbeur.

Kil: conductivité thermique de l'isolant latéral

## II-2-Transfert par convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques [24]. On distingue deux types de convection :

- **La convection forcée** : le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (Le vent, une pompe, un ventilateur...etc.).
  
- **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de Densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la Thermocirculation.

Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [24]:

$$q = h \times S \times (T_p - T_f) \quad (35)$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

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

T<sub>p</sub> : température de la paroi solide.

T<sub>f</sub> : température du fluide.

Dans un capteur plan l'échange par convection s'effectue entre :

- La vitre et l'ambiance, par convection libre ou forcée par le vent.
- La vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre.
- Le tube et le fluide par convection libre.
- Entre le fluide et l'isolant par convection libre.
- Entre l'isolant et l'ambiance par convection libre ou forcée par le vent.

#### ❖ Détermination du coefficient de convection forcée entre la vitre (ou l'isolant) et le vent

De nombreux travaux expérimentaux ont permis d'établir différentes expressions donnant le coefficient d'échange convectif entre la vitre (ou l'isolant) et le vent, parmi lesquelles on peut citer :

- En 1954, McAdams avait avancé la formule suivante [6]:

$$hc_{va} = 5.7 + (3.8 \times V) \quad (37)$$

$hc_{va}$  : coefficients de convection entre la vitre et le vent.

$V$  : vitesse du vent.

Selon John A.Duffie, William A.Beckman [6] il est probable que cette relation inclut l'effet de la convection et du rayonnement, et n'est applicable que pour les surfaces de 0.5 m<sup>2</sup>.

- Une relation similaire à la précédente est proposée par Ursula Eiker [15].

$$hc_{va} = 4.214 + (3.575 \times V) \quad (38)$$

- Pour des capteurs horizontaux, Liloyd et Moran (1974) ont proposé les relations suivantes [6]:

$$\begin{aligned} Nu &= 0.76 \times Ra^{0.25} & 10^4 < Ra < 10^7 \\ Nu &= 0.15 \times Ra^{0.6} & 10^7 < Ra < 10^{10} \end{aligned} \quad (39)$$

- Pour les capteurs verticaux, MacAdams propose :

$$\begin{aligned} Nu &= 0.59 \times Ra^{\frac{1}{4}} & 10^4 < Ra < 10^9 \\ Nu &= 0.59 \times Ra^{1/3} & 10^9 < Ra < 10^{12} \end{aligned} \quad (40)$$

Le nombre de Nusselt (Nu) est donné par :

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= \frac{hcva \times Lc}{ka} \\ Lc &= \frac{4 \times S}{\text{périmètre}} \end{aligned} \tag{41}$$

c : longueur caractéristique.

Ra : nombre de Rayleigh.

ka : conductivité thermique de l'air.

• Afin de corriger l'expression précédente de MacAdams (1954), Watmuff et al (1977) Avaient présenté la formule suivante [6]:

$$hcva = 2.8 + (3 \times V) \tag{42}$$

D'après John A.Duffie, William A.Beckman [6], cette corrélation n'est applicable que pour une surface de 0.5 m<sup>2</sup>.

• En 1979, Sparrow et al ont étudié la convection forcée sous l'effet du vent pour des orientations différentes, et présenté la relation [6]:

$$Nu = 0.86 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.66} \quad 2 \times 10^4 < Re < 9 \times 10^4 \quad (43)$$

- Pour un écoulement laminaire, Polhanson a proposé en 1980 l'expression suivante [27] :

$$Nu = 0.94 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.6} \quad (44)$$

- Selon Soteris Kalogirou [25], il est préférable d'utiliser la formule de Mitchell pour calculer le coefficient de convection forcée entre la vitre (ou l'isolant) et le vent :

$$hcva = \frac{8.6 \times V^{0.6}}{Lv^{0.4}} \quad (46)$$

$L_v$  : longueur de la vitre (ou de l'isolant).

Dans toutes les corrélations précédentes :

$$h_{cia} = h_{cva}$$

$h_{cia}$  : coefficient de convection entre l'isolant et l'ambiance.

- Ursula Eiker [15] a présenté la relation:

$$hcva = (hcl^3 + hcf^3)^{1/3} \quad (47)$$

$hcl$  : coefficient de convection libre entre la vitre et l'air ambiant.

hcf : coefficient de convection forcée entre la vitre et le vent.

hcl : est donné par :

$$hcl = 1.78 \times (Tve - Tam)^{1/3} \quad (48)$$

#### ❖ Détermination du coefficient de convection libre entre l'absorbeur et la vitre

Le coefficient de convection libre entre la vitre et l'absorbeur, inclinés d'un angle par rapport à l'horizontale est donné en fonction des nombres adimensionnels suivants :

##### • Le nombre de Nusselt (Nu)

$$Nu = \frac{hcav \times eva}{ka} \quad (49)$$

hcav : coefficient de convection entre l'absorbeur et la vitre.

eva : espace entre les deux plaques.

##### • Le nombre de Rayleigh (Ra)

$$Ra = \frac{g \times \gamma \times Pr \times (tab - Tv) \times eva^3}{\nu^2 \times \chi} \quad (50)$$

$g$ : pesanteur.

$\gamma$  : Coefficient d'expansion volumique du fluide.

$T_v$  : température de la vitre.

$\nu$  : viscosité cinématique.

$\chi$ : Diffusivité thermique

- **Le nombre de Prandtl (P)**

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\chi} \quad (51)$$

- **Le nombre de Grashoff (Gr)**

$$\text{Gr} = \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}} \quad (52)$$

Pour deux plaques parallèles, le nombre de Nusselt est donné par :

- La formule de Hollands and al (1976) dans le cas où ces deux plaques sont inclinées d'un angle  $0^\circ < \theta < 75^\circ$  par rapport à l'horizontale [6]:

$$\text{Nu} = 1 + 1.446 \times \left( 1 - \frac{1708 \times (1.8 \times \sin\beta)^{1.6}}{\text{Ra} \times \cos\beta} \right) \times \left( 1 - \frac{1708}{\text{Ra} \times \cos\beta} \right) + \left( \frac{\text{Ra} \times \cos\beta}{5830} \right)^{0.666} - 1 \quad (53)$$

$\beta$  : Angle d'inclinaison du capteur.

- La formule de Shewen et al (1996) dans le cas où ces deux plaques sont verticales [25]:
- Une autre relation proposée est [1] :

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 1.013 & \text{Gr} < 1700 + 47.8 \times \beta \\ \text{Nu} &= 2.5 + (0.0133 \times (90 - \beta)) & \text{Gr} > 80000 \\ \text{Nu} &= (0.06 + (3 \times 10^{-4} \times (90 - \beta))) \times \text{Gr}^{0.33} & \text{autrement} \end{aligned} \quad (54)$$

Dans cette étude, on applique la formule de Hollands considérée la meilleure selon [6].

#### ❖ Détermination du coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

Plusieurs corrélations ont été proposées par divers auteurs pour déterminer le coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et le fluide caloporteur, on peut citer :

- Dans la référence [21], l'auteur a proposé les formules suivantes en fonction du nombre de Reynolds (Re) et de Graetz (Gz) :

\*Ecoulement laminaire ( $\text{Re} < 2100$ ) :

$$\text{Nu} = 1.86 \times \text{Gz}^{0.33} \quad (55)$$

Si  $\text{Re} < 100$  le nombre de Nusselt est donné par :

$$\text{Nu} = 3.66 \quad (56)$$

\*Ecoulement turbulent ( $\text{Re} > 10000$ ) :

$$\text{Nu} = 0.0155 \times \text{Re}^{0.83} \times \text{Pr}^{0.5} \quad (57)$$

Dans la zone de transition ( $2000 < \text{Re} < 10000$ ), où l'écoulement est instable et les valeurs des coefficients de transfert sont mal déterminées, il est recommandé d'éviter de travailler dans cette gamme de nombre de Reynolds [26].

$$\text{Re} = \frac{\rho_f \times d_i \times v_e}{\eta_f} \quad (58)$$

$\mu_f$ : viscosité dynamique du fluide.

$d_i$  : diamètre intérieur du conduit.

$l$  : longueur du conduit.

$\rho_f$  : masse volumique du fluide caloporteur.

$v_e$  : vitesse de l'écoulement.

• Dans la référence [1], l'auteur a proposé les formules suivantes :

➤ Ecoulement laminaire dans la conduite :

La couche limite est supposée développée.

\* Si la paroi du tube est soumise à un flux d'énergie constant :

$$h_{caf} = 3.66 \times \frac{k_f}{d_i}$$

(59)

➤ Ecoulement turbulent dans une conduite :

$$h_{caf} = 0.023 \times \left(\frac{k_f}{d_i}\right) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4}$$

(60)

Avec :

$h_{caf}$  : coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

$k_f$  : conductivité thermique du fluide caloporteur.

• Dans la référence [23], l'auteur a utilisé la formule de Gnielinski pour un régime

Transitoire et turbulent avec:

$0.6 < Pr < 2000$  et  $2300 < Re < 10^6$

$$\text{Nu} = \frac{\Omega}{8} \times \left( \frac{(\text{Re} - 10^3) \times \text{Pr}}{1 + \left( \left( 12.7 \times \frac{\Omega^{0.5}}{8} \right) \times (\text{Pr}^{\frac{2}{3}} - 1) \right)} \times \left( 1 + \left( \frac{d_i}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right) \right)$$

(61)

$\Omega$  : Coefficient de Darcy.

\* Si  $2300 < \text{Re} < 10^5$ , le coefficient de darcy est donné par la formule de Blasius :

$$\Omega = 0.3164 \times \text{Re}^{-0.25}$$

(62)

\* Si  $10^5 < \text{Re} < 10^6$ , le coefficient de darcy est donné par la formule d'Herman :

$$\Omega = 0.0054 + (0.3964 \times \text{Re}^{-0.3})$$

(63)

### ❖ Détermination du coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et la face Intérieure de l'isolant

Pour déterminer le coefficient de convection entre l'absorbeur et l'isolant, une formule similaire aux formules précédentes est utilisée [12]:

Ecoulement laminaire ( $\text{Re} < 2100$ )

➤  $Gz < 100$  (formule de Haussen):

$$\text{Nu} = 3.66 + \left( \frac{0.085 \times Gz}{1 + 0.047 \times Gz^{\frac{2}{3}}} \right) \times \left( \frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14}$$

(64)

➤  $Gz > 100$  (Seider State):

$$\text{Nu} = 1.86 \times Gz^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} + 0.87 \times \left( 1 + 0.015 \times Gz^{\frac{1}{3}} \right)$$

(65)

\* Zone de transition où  $2100 < Re < 10000$  (Hausen)

$$Nu = 0.116 \times \left( Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} \quad (66)$$

\* Ecoulement turbulent ( $Re > 10000$ ) :

$$Nu = 0.013 \times Re^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left( \frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} \quad (67)$$

$\mu_{ii}$  : viscosité dynamique du fluide évaluée à la température de la face intérieure de l'isolant.

### II-3- Transfert par rayonnement

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu lorsque de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques est émise par une surface et absorbée par une autre. Cet échange peut avoir lieu lorsque les corps sont séparés par le vide ou par n'importe quel milieu intermédiaire suffisamment transparent pour les ondes électromagnétiques [27].

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [27]:

$$q = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (68)$$

$q$  : densité de flux de chaleur émis par le corps.

$\varepsilon$  : Émissivité thermique du matériau.

$\sigma$  : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ .

$T$  : température absolue du corps.

Dans un capteur solaire plan le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- La vitre et le ciel.
- La vitre et la plaque chauffante.
- L'isolant et le sol.

❖ **Détermination du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre La vitre et la plaque chauffante**

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur est donné par la relation (II.44) après avoir établi les hypothèses adéquates et les simplifications mathématiques nécessaires

$$h_{rav} = \sigma \times \frac{(T_{ab}^2 + T_v^2) \times (T_{ab} + T_v)}{\frac{1}{\varepsilon_{ab}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1}$$

(69)

$h_{rav}$  : coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la plaque de l'absorbeur et la vitre.

$T_v$  : température de la face intérieure de la vitre.

$\varepsilon_v$  : émissivité de la vitre.

$\varepsilon_{ab}$  : émissivité de l'absorbeur.

❖ **Détermination du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre La vitre et le ciel (ou l'isolant et le sol)**

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel (ou l'isolant et le sol) est donné en fonction de la température du ciel (température du sol) et de la face extérieure de la vitre (face extérieure de l'isolant).

Il existe plusieurs corrélations qui donnent la température du ciel [6] :

- En 1932, Brunt a proposé une relation entre la température du ciel et la pression de vapeur d'eau.

- Dans [34], l'auteur a utilisé les deux relations suivantes :

$$T_c = T_a - 12$$

$$T_c = T_a - 6$$

(70)

- En 1963, Swinbank a proposé une expression qui relie la température du ciel à la température ambiante, cette relation sera utilisée dans le cadre de ce travail :

$$T_c = 0.0552 \times T_a^{1.5}$$

(71)

Cette corrélation a été remplacée par la suivante [15]:

$$T_c = 0.037536 \times T_a^{1.5} + 0.32 \times T_a$$

(72)

$T_c$  : température du ciel.

$T_a$  : température de l'ambiance.

- Ursula Eiker a donné la température du ciel en fonction du point de rosée [15] :

$$T_c = T_a \times \left(0.8 + \frac{T_r - 273}{250}\right)^{0.25} \quad (73)$$

$$h_{rvc} = \sigma \times \varepsilon_v \times (T_{ve} + T_c) \times (T_{ve}^2 + T_c^2)$$

$$h_{ric} = \sigma \times \varepsilon_i \times (T_{ie}^2 + T_c^2) \times (T_{ie} + T_c)$$

(74)

$T_{ve}$  : température de la face extérieure de la vitre.

$\varepsilon_v$  : émissivité de la vitre.

$h_{rvc}$  : coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel.

$\varepsilon_i$  : émissivité de l'isolant.

$T_{ie}$  : température de la face extérieure de l'isolant.

$h_{ric}$  : coefficient de transfert thermique par rayonnement entre.

### III.BILAN ENERGETIQUE

#### III.1. Principaux effets intervenant dans un capteur

Le bilan énergétique d'un capteur solaire dépend de plusieurs processus de pertes. En effet, seule une fraction de l'énergie incidente est transmise au fluide de transfert circulant dans l'absorbeur.

Une part de l'énergie incidente est perdue par réflexion sur la couverture du capteur (s'il en possède une) et sur la surface de l'absorbeur.

- Ce sont les pertes optiques.

Une autre part d'énergie thermique produite par l'absorption des photons incidents est perdue par transfert vers l'environnement du capteur par pertes thermiques. Ainsi, le bilan thermique d'un convertisseur de l'énergie solaire dépend de deux processus de pertes de chaleur qui sont :

- les pertes par rayonnement,
- les pertes par convection et conduction

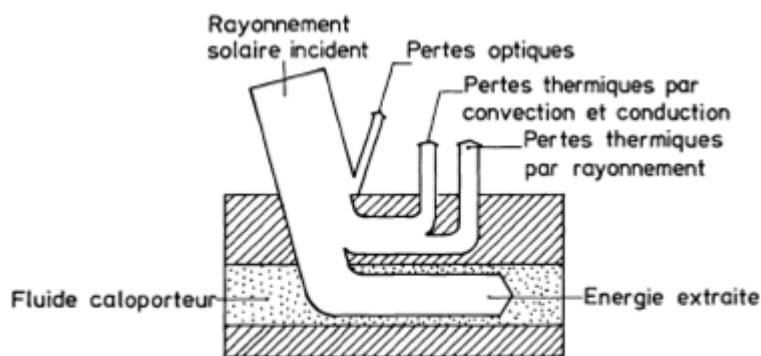


Figure II.2. Bilan énergétique d'un capteur.

Pour l'essentiel, ces pertes ont lieu par la face avant du dispositif, c'est-à-dire celle qui reçoit le rayonnement solaire incident (figure 1).

La connaissance de ces phénomènes est donc nécessaire pour établir, prévoir, ou améliorer le bilan énergétique ; le convertisseur idéal étant bien sûr celui pour lequel les pertes sont nulles.

### III.2. Déterminations des pertes énergétiques d'un capteur solaire

#### III.2.1. Les pertes optiques

Un capteur pointé vers le soleil reçoit un rayonnement incident d'intensité  $I$  (ensoleillement en  $W/m^2$ ) sur une surface de captation du réflecteur  $S_c$  donc une puissance captée  $P_c$  par le réflecteur :

$$I_{Sc} = P_c \quad (75)$$

Cette même puissance est réfléchi (concentrée) sur la cavité réceptrice  $S_a$  (foyer ou récepteur ou point focal du dispositif de concentration appelé aussi absorbeur) :

$$P_a = P_c \eta_o = \eta_o I_{Sc} \quad (76)$$

Avec:

$P_a$  = puissance thermique de la cavité réceptrice.

$\eta_o$  = Puissance absorbé par le récepteur.

ET

$\eta_{opt}$  = rendement optique du concentrateur.

$$\eta_o = \Gamma \alpha \tau \rho \quad (77)$$

$$\eta_o = \Gamma \alpha \tau \rho \quad (78)$$

Avec :

$\Gamma$  : Rapport de captation (fraction de l'énergie reflétée par le réflecteur) .

$$\Gamma = (S_c - S_a) / S_c \quad (79)$$

$\alpha$  : Facteur d'absorption de la surface de l'absorbeur.

$\tau$  : Facteur de transmission de l'absorbeur.

$\rho$  : Facteur de réflexion de surface de réflecteur (miroir du concentrateur).

### III.2.2. Les pertes thermiques

La production de chaleur, Nous nous intéressons aux pertes thermiques conséquentes dans l'absorbeur, principal composant de ce type de convertisseur, et qui a pour fonction de récepteur le rayonnement solaire incident (concentré), de le convertir en chaleur et de transmettre celui-ci à un fluide caloporteur.

La puissance thermique  $P_t$  transmise par la cavité réceptrice à l'échangeur (fluide caloporteur) est alors la puissance utile :

$$P_t = P_u = P_a - P_p \quad (80)$$

Avec :

$P_a$  = puissance absorbée

$P_p$  = Puissance correspondant aux pertes thermiques.

En effet, la différence de température importante entre celle de la cavité réceptrice (absorbeur) source chaude  $T_a$  et l'ambiance  $T_0$  provoque un processus naturel de pertes de chaleur. Ce sont les pertes thermiques :

Par convection, par rayonnement et par conduction :

$$P_p = P_{cv} + P_r + P_c \quad (81)$$

#### III.2.2.a. Les pertes par convection :

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

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

- La convection naturelle : le mouvement du fluide est engendré par les variations de Densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la Thermocirculation.

Ce type de transfert thermique convectif est liée à la vitesse et la direction du vent sur le site. Le transfert thermique convectif est régi par la loi de Newton [13] et permet d'établir que Ces pertes sont alors proportionnelles à la surface du récepteur et la différence entre la température de surface d'absorbeur et l'air ambiant :

$$P_{cv} = h_{cv} S_a (T_a - T_0) \quad (82)$$

Avec :

**S<sub>a</sub>** : surface d'ouverture de l'absorbeur (récepteur)

**T<sub>r</sub>** : température du récepteur.

**T<sub>a</sub>** : température ambiante.

$$h_{cv} = Nu \lambda_{air} / d \quad (83)$$

**h<sub>cv</sub>** Coefficient de transfert thermique par convection.

**λ<sub>air</sub>** : conductivité thermique de l'air.

**d** : diamètre du récepteur.

**Nu** : nombre de Nusselt

$$Nu = 0,664 (Re)^{1/2} (Pr)^{1/3}. \quad (84)$$

Et :

**Pr** : nombre de Prandtl.

Re : nombre de Reynolds

$$Re = V d / \nu_{air} \quad (85)$$

Tq :

V = vitesse du vent ;  $\nu_{air}$  = viscosité cinématique de l'air.

### III.2.2.b. Les pertes par conduction :

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

La loi correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier [22]. Qui permet d'établir que ces pertes sont liées à la nature du matériel utilisé et se présente sous la forme :

$$P_c = \lambda S_a (T_a - T_0) \Delta x \quad (86)$$

Avec

$\lambda$  : Conductivité de l'absorbeur.

$\Delta x$  : épaisseur de l'absorbeur.

### III.2.2.c. Les pertes par rayonnement :

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

Ces pertes dépendent de la forme du récepteur mais plus particulièrement de la température du récepteur.

Elles sont importantes aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante mais deviennent dominante à températures élevées.

Elles sont aussi proportionnelles à l'émissivité de l'absorbeur. C'est La loi fondamentale du rayonnement de Stefan-Boltzmann [27] qui a permis d'établir ces pertes :

$$Pr = e \sigma Sa (T_a^4 - T_0^4) = hr Sa (T_a^4 - T_0^4) \quad (87)$$

Avec :

**e** : facteur émissivité de l'absorbe

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

**hr** : Coefficient de transfert thermique par rayonnement

$$h_r = e \sigma \quad (88)$$

Mais, les pertes par conduction reste petites comparées aux pertes par convection ou par rayonnement, et sont ainsi généralement combinées avec les pertes par convection dans la plupart des cas.

Alors, on peut utiliser comme relation de la puissance thermique perdu :

$$P_p = Sa h_{cv} (T_a - T_0) + Sa hr (T_a^4 - T_0^4) \quad (89)$$

D'où:

$$P_t = \eta_0 I Sc - Sa h_{cv} (T_a - T_0) - Sa hr (T_a^4 - T_0^4) \quad (90)$$

### III.3. Analyse des pertes thermiques :

Nous avons vu que les pertes thermiques par convection et conduction sont en première approximation proportionnelles à la température.

Et que les pertes thermiques par rayonnement sont proportionnelles à la puissance quatrième de la température.

L'expression du rendement de conversion est alors :

$$\eta_c = \frac{P_t}{P_c} = \frac{\eta_0 I S_c - S_0 h_{cv} (T_0 - T_0) - S_0 h_r (T_0^4 - T_0^4)}{I S_c}$$

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{h_{cv}}{\chi I} (T_0 - T_0) - \frac{h_r}{\chi I} (T_0^4 - T_0^4)$$

(91)

La figure II.3 représente le rendement de conversion en fonction de la température selon les différents types de pertes [25].

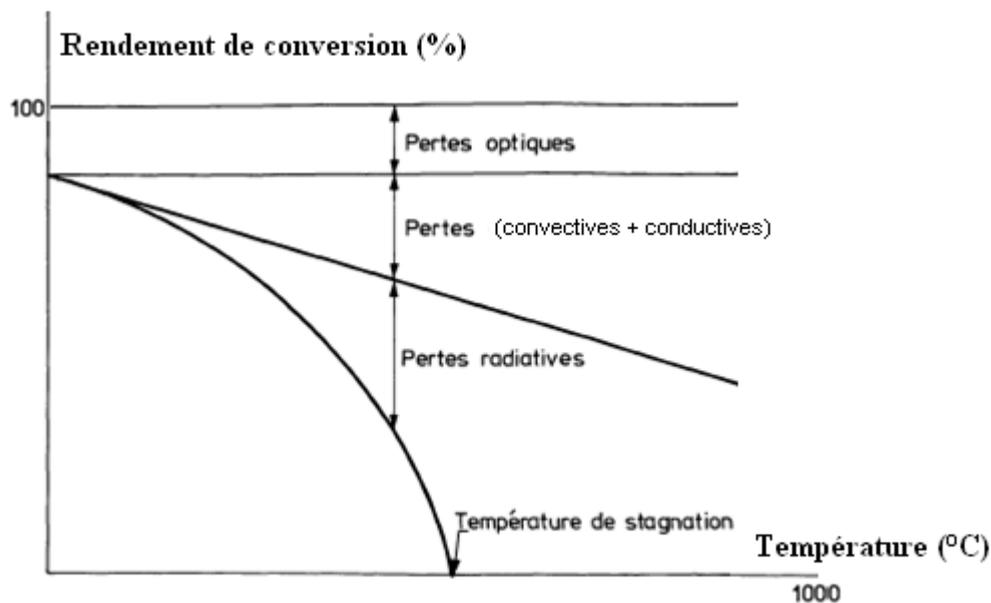


Figure II.3.évaluation des pertes d'un capteur en fonction de la température.

On observe que :

- Dans la variation des pertes optiques avec la température peut être considérée comme faible par rapport aux variations des autres pertes.
- Aux basses températures les pertes par convection et conduction, plus particulièrement liées à la conception du capteur, sont prépondérantes.
- L'effet des pertes radiatives, plus intrinsèquement lié aux propriétés optiques des matériaux de l'absorbeur et du vitrage, devient plus important puis prépondérant aux moyennes puis aux hautes températures (donc pour les systèmes de captage avec concentration du rayonnement solaire).

Ainsi pour les hautes températures solaires, il est nécessaire d'utiliser des systèmes concentrateurs du flux solaire et dans ces conditions les pertes par convection et conduction peuvent être négligées en première approximation par rapport aux pertes radiatives.

#### III.4. Rendement radiatif

L'accroissement de la puissance transmise du capteur au fluide caloporteur, à une température donnée, peut être obtenu

- d'une part sur la réduction à une valeur acceptable des pertes thermiques par convection et conduction en agissant sur la géométrie et l'isolation thermique du capteur.
- et d'autre part puisqu'on s'intéresse aux pertes radiatives, l'expression du rendement de conversion donné par :

$$\eta_c = \eta_0 - \frac{h_{cv}}{\chi I} (T_o - T_0) - \frac{h_r}{\chi I} (T_o^4 - T_0^4) \quad (92)$$

Peut s'écrire sous la forme

$$\eta_c = K - \eta_R \quad (93)$$

Avec :

$$\eta_R = \frac{h_r}{\chi I} (T_o^4 - T_0^4) = \text{rendement radiatif} \quad (94)$$

**K** : facteur traduisant l'effet des pertes optiques, conductrices et convectives

**X** : facteur de concentration du flux solaire incident.

Ou :

$$X : Sc/Sa$$

(95)

Dans ce cas, cette expression nous suggère deux orientations possible pour obtenir un accroissement du rendement de conversion à une température donnée:

- soit augmentation du facteur de concentration par action sur la conception du capteur, moyennant un effort technologique non négligeable et la perte de la quasi-totalité du rayonnement diffus arrivant sur le capteur dès que  $X > 1$ ,

- soit diminution du coefficient de transfert thermique  $h_r = \epsilon \sigma$  par rayonnement par action sur les propriétés optiques des matériaux composant la couverture et la surface de l'absorbeur de façon à augmenter l'absorption de l'énergie solaire incidente et simultanément diminuer ses pertes radiatives à la température de fonctionnement. C'est le but de l'utilisation des surfaces sélectives.

Donc dans cette partie, on ne parlera d'une manière générale de ce que trouvent les chercheurs, soit pour les différentes pertes et leurs influences sur les performances du capteur, et de ce qu'ils voient sur le rendement thermique, par l'application de ces matériaux sélectifs.

### III.5. Bilan énergétique d'un distillateur solaire sous vide (Etude expérimentale).

On a travaillé sur une expérience sur les matériaux sélectifs (peintures noire, polymère noir, aluminium) Appliqués sur l'élément principale (l'absorbeur) et sur la surface extérieure de du système comme isolant, pour avoir une idée bien définie sur ces matériaux pour diminuer les pertes et absorber le maximum des rayonnements solaires. En travaillant avec des moyennes de bord, Donc voilà notre bilan expérimental :

#### III.5.1. Schéma descriptif de la conversion énergétique :

Le bilan énergétique a été calculé en considérant le distillateur sans eau saumâtre à distiller

Pour pouvoir déterminer les variations de température et la quantité de chaleur échangée par

Rayonnement solaire.

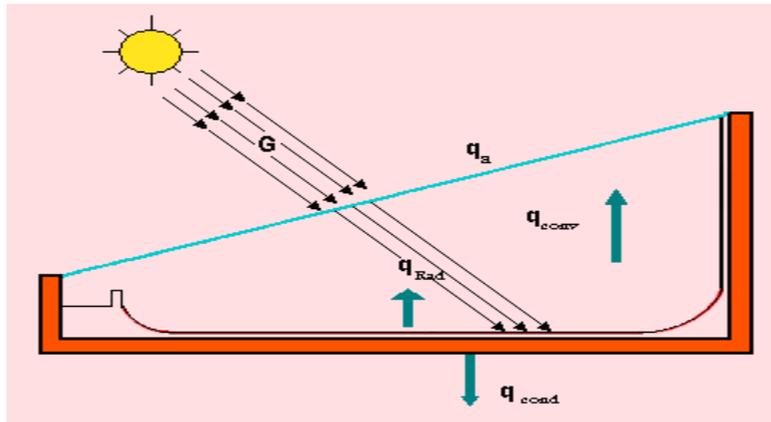


Figure II.4. Paramètres d'échange thermique par rayonnement du distillateur à vide

- L'énergie stocké dans le vitrage, c'est l'absorption maximale d'énergie solaire pour atteindre des températures maximales est comme suit :

$$E_S = E_s - q_{v.a} + q_{v.b} \tag{96}$$

Tq :

$E_S$  : Energie Stocké (w).

$E_s$  : Energie sortie(w).

$q_{v.a}$  ;  $q_{v.b}$  : le flux solaire entre le vitrage et l'atmosphère ; et le vitrage et l'absorbeur par unité de surface (w/m<sup>2</sup>).

Tq :

$$q_{v.a} = h_{v.a} \cdot A_v \cdot (T_v - T_a) \tag{97}$$

ET :

$h_{v.a}$  : Coefficient d'échange thermique par convection et par rayonnement entre deux surfaces W/m<sup>2</sup>. °C.

$A_v$  : surface de l'absorbeur (m<sup>2</sup>).

$T_v$  : Température du vitrage.(°C).

$T_a$  : Température de l'atmosphère (°C).

Donc pour déterminer les coefficients d'échanges thermiques par convection et rayonnement

On a:

$$h_{v,a} = h_{v,a,r} + h_{v,a,cv} \quad (98)$$

- Détermination de coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur par la relation suivante :

$$h_{v,a,cv} = 5.8 + 3.8 \quad (99)$$

- Détermination de coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitre et l'absorbeur par rayonnement on à la relation suivante :

En générale la relation du flux solaire du vitre et :

$$q = A_v \cdot h_{v,a} (T_v - T_a) \quad (100)$$

Et par rayonnement :

$$q = a \sigma \epsilon_v (T_v^4 - T_a^4) \quad (101)$$

Pour faire sortie le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'atmosphère (ciel), on à :

$$q = A_v h_{v,a} (T_v - T_a) \quad (102)$$

$$q = A \sigma \epsilon_v (T_v^4 - T_a^4) \quad (103)$$

On usurpé les q et en fait sortie le (h).

Et en à :

$$Q = \dot{m} C_p \frac{dT}{dt} \text{ donc ;}$$

$$(MX : Sc/Sa \cdot Cp)_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot A \cdot G - q_{v,a} + q_{v,b} \quad (104)$$

Q : le fus solaire stocké par le vitre.(w/m<sup>2</sup>)

G : rayonnement globale (incident). (w)

$\alpha_v$  : Coefficient Absorption ou pouvoir absorptive de vitrage(-).

A : surface de la vitre (m<sup>2</sup>).

$\dot{m}$  : Masse d'un corps (Kg).

$\dot{C}_p$  : Chaleur massique à pression constante j/kg. °C.

A-Equation de l'absorbeur :

$$(M \cdot Cp)_b \cdot \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b \tau_v \cdot A \cdot G - q_{v,b} - q_{b,a} \quad (105)$$

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre(-)

$$q_{v,a} = A \cdot h_{va} \cdot (T_v - T_a) \quad (106)$$

$$q_{v,b} = A \cdot h_{vb} \cdot (T_b - T_v) \quad (107)$$

$$h_{va} = h_{va,r} + h_{va,v} \quad (108)$$

$$h_{vb} = h_{vb,r} + h_{vb,v} \quad (109)$$

$$h_{ba} = \left( \frac{e}{\lambda} + \frac{1}{h_{is,a}} \right)^{-1} \quad (110)$$

$h_{ba}$  : Coefficient d'échange thermique entre l'absorbeur et l'atmosphère (w/m2. °C).

$h_{isoa}$ : Coefficient d'échange thermique entre l'isolant et l'atmosphère (w/m2. °C).

$\lambda$  : Conductivité thermique.

e : épaisseur de l'absorbeur(m).

- Pour calculé le coefficient d'échange de chaleur entre l'isolant et l'atmosphère, en à une autre équation qui :

$$h_{is,a} = h_{va,v} = 5,7 + 3,8 \cdot V \quad (111)$$

- Cette relation pour déterminer le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage et l'atmosphère.

$$h_{va,r} = \frac{\epsilon_v \sigma (T_v^4 - T_{sky}^4)}{(T_v - T_a)} \quad (112)$$

Tq :

$T_{sky}^4$  : Ou la température de l'atmosphère (ciel).

$\sigma$  : Constante de Stephan Boltzmann.

- Deuxième relation, pour trouver le coefficient d'échange thermique par rayonnement entre le vitrage, et l'absorbeur.

$$h_{vb,r} = \epsilon_T \sigma (T_v^2 + T_r^2) \cdot (T_v + T_r) \quad (113)$$

- Détermination de

$$\epsilon_T = \frac{\epsilon_v \epsilon_r}{\epsilon_v + \epsilon_r} \quad (114)$$

- Le nombre de Nulsset :

**A-La 1<sup>er</sup> équation :** et après on à développé l'équation de la vitre comme on à montrer dans la première étape, pour l'utilisation dans une matrice.

$$(M.Cp)_v \cdot \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot A \cdot G - A \cdot h_{va} \cdot (T_v - T_a) + A \cdot h_{vb} \cdot (T_b - T_v)$$

$$(M.Cp)_v \cdot \frac{T_v(i) - T_v(i-1)}{t} = \alpha_v \cdot A \cdot G - A \cdot h_{va} \cdot (T_v - T_a) + A \cdot h_{vb} \cdot (T_b - T_v)$$

Alors

$$\left( 1 + \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot (h_{va} + h_{vb}) \right) T_v(i) - \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot h_{vb} \cdot T_b(i) = \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot (\alpha_v G + h_{va} \cdot T_a) + T_v(i-1)$$

**B- La 2<sup>ème</sup> équation** : équation de l'absorbeur, là même chose ;

$$(M.Cp)_b \cdot \frac{dT_b}{dt} = \alpha_b \tau_v \cdot A \cdot G - A \cdot h_{vb} \cdot (T_b - T_v) - A \cdot h_{ba} \cdot (T_b - T_a)$$

$$(M.Cp)_b \cdot \frac{T_b(i) - T_b(i-1)}{t} = \alpha_b \tau_v \cdot A \cdot G - A \cdot h_{vb} \cdot (T_b - T_v) - A \cdot h_{ba} \cdot (T_b - T_a)$$

$$\left( 1 + \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot (h_{vb} + h_{ba}) \right) \cdot T_b(i) - \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot h_{vb} \cdot T_v(i) = \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot (\alpha_b \tau_v \cdot G + h_{ba} \cdot T_a) + T_b(i-1)$$

**C-A** la fin en mais toutes deux équations dans une matrice (2.2) ; pour calculer la température théoriquement fonction du temps, dans un modèle mathématique(Matlab), et après en va faire une comparaison entre les résultats théoriques, et notre résultats obtenue de notre expérience on utilisant un autre l'logicielle pour le trace qui (origine) ;

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} \left( 1 + \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot (h_{va} + h_{vb}) \right) & - \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot h_{vb} \\ - \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot h_{vb} & \left( 1 + \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot (h_{vb} + h_{ba}) \right) \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_v(i) \\ T_b(i) \end{pmatrix} \\ & = \begin{pmatrix} \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_v} \cdot (\alpha_v G + h_{va} \cdot T_a) + T_v(i-1) \\ \frac{A \cdot t}{(M.Cp)_b} \cdot (\alpha_b \tau_v \cdot G + h_{ba} \cdot T_a) + T_b(i-1) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

➤ Cette matrice sous forme A.T=B

❖ Propriété de vitrage

$\rho = 2000$	: la masse volumique de vitre	[kg/m <sup>3</sup> ]
$S-v = 1$	: la surface de vitre	[m <sup>2</sup> ]
$e-v = 0.005$	: épaisseur de vitre	[m]
$Cp-v = 3000$	: capacité calorifique de vitre	[j/kg.K]
$\alpha-v = 0.02$	: coefficient d'absorbions de vitre	

$\varepsilon_v = 0.80$  : émissivité de vitre  
 $\tau_v = 0.80$  : taux de transmission de vitre  
 $\theta = 30$  : de surface de vitre [°]

## ❖ Propriétés d'absorbeur

$\rho_b = 3000$  : la masse volumique d'absorbeur [kg/m<sup>3</sup>]  
 $S_b = 1$  : la surface d'absorbeur [m<sup>2</sup>]  
 $e_b = 0.005$  : l'épaisseur d'absorbeur [m]  
 $C_{p_b} = 5000$  : capacité calorifique d'absorbeur [j/kg.K]

$\alpha_b = 0.80$  : coefficient d'absorbions d'absorbeur

$\varepsilon_b = 0.80$  : émissivité de l'absorbeur

## ❖ Propriétés d'isolons

❖

$\lambda_{is} = 0.50$  : conductivité thermique de l'isolant [w/m.k]  
 $e_{is} = 0.02$  : épaisseur de l'isolant[m]

## ❖ Propriétés d'air

$K_{air} = 0.02526$  conductivité thermique d'air [W/m.K]  
 $vis_{air} = 14.64 \cdot 10^{-6}$  viscosité cinétique [m<sup>2</sup>/s]  
 $Pr = 0.7145$  nombre de Prandtl  
 $H = 0.15$  espace entre le vitre et l'absorbeur [m]

## ❖ D'autres propriétés :

$ks = 5.67e-8$  : constante de rayonnement [W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]  
 $g = 9.81$  : accélération de gravité [m/s<sup>2</sup>]

**C-Procédure d'essais :****C.1.Dimensionnement du distillateur**

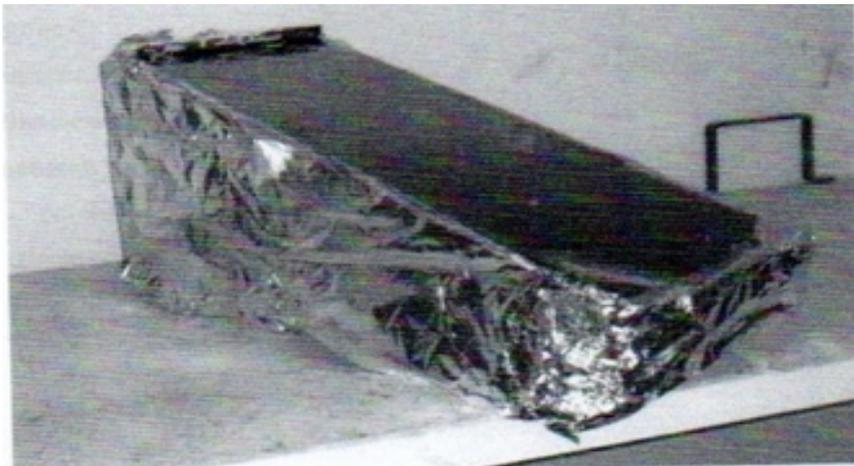
Nous avons conçue compte tenu de nos capacités financière et du matériel à notre disposition un distillateur simple effet à couverture en vitre inclinée.

**C.2.Schémas du dispositif expérimental**

Sur ces deux figures nous exposons les schémas du dispositif relatifs aux deux systèmes d'isolation utilisés.



**FigureII.4.** distillateur simple effet à effet de serre avec une isolation en bois bien sec peint en blanc.



**FigureII .5.** Distillateur simple effet à effet de serre avec une isolation en bois bien sec en blanc et couvert d'une feuille d'aluminium.

### **Conclusion :**

Dans se chapitre on à discuter sur les principaux échanges thermique, et on à pressier cette étude sur les pertes radiatives qui nous pose un problème ou niveau de l'absorbeur, donc on à citer les différents rendements radiatifs, avec différents pertes thermique dans le capteur et voir leur importances et

influences sur les pertes radiatifs et les rendements, (cas générale), et à la fin on a posé un travail réel avec ces matériaux sélectifs appliquer sur l'absorbeur d'un distillateur solaire sans eau, et faire sortir notre bilan de travail dans la simulation (partie théorique), et on eut de bons résultats avec ces matériaux on va les voir dans le chapitre suivant.

## I. Introduction

Les capteurs héliothermiques solaires sont utilisés pour le chauffage de l'eau domestique, le séchage, ... etc. Ils transforment les rayonnements solaires en énergie thermique, laquelle chauffe un fluide caloporteur. L'un des importants composants du capteur héliothermique solaire est l'absorbeur, qui doit avoir une sélectivité aux longueurs d'ondes du rayonnement solaire. Cette sélectivité lui permet un maximum d'absorbance avec un minimum d'émission thermique. L'objectif de notre travail consiste à appliquer ces surfaces sélectives. Une surface sélective est habituellement composée d'une couche ou d'un film mince absorbant dans le spectre solaire et transparent dans l'infrarouge thermique sur un support en bois d'émissivité faible (substrat), qui le bois avec des films sélectifs (peinture noire, aluminium brillant, aluminium gris mat), pour avoir de quelle température atteigne, et dont quel point le rendement et améliorer, et voire de quelle niveau les pertes diminuer. Les températures augmentent.

## II. Explication

Le terme thermosolaire se compose de deux termes :

-thermo : chaleur, énergie thermique.

-soleil : énergie de rayonnement.

La distillation thermosolaire utilise la conversion de l'énergie solaire (rayonnement) en énergie thermique pour produire de l'eau potable à partir d'eau saline. Cette conversion de l'énergie de rayonnement en énergie thermique trouve son principe dans les théories de l'électromagnétisme.

Le distillateur simple effet est le premier qui attira l'attention des scientifiques dans leur souci de trouver un dispositif permettant l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'eau potable à partir d'eau salée. L'effort de recherche s'est toujours tourné vers la recherche de matériaux ayant des propriétés permettant de concilier économie et performance.

Nous avons pour objectif, dans cette partie le dimensionnement d'un prototype de laboratoire du distillateur à simple effet de serre. Il s'agit d'appliquer des matériaux sélectifs comme (le polymère noire, peinture noire, et de l'aluminium non brillant) sur la base en bois du capteur. Est des matériaux d'isolations sur les surfaces extérieures du boîtier on a (la peinture blanche et l'aluminium brillant).

Le bute de notre étude est d'avoir la variation de température qu'elles peuvent atteindre c'est matériaux sélectifs (pour l'absorbeur), avec une bonne isolation, bien sur avec l'influence des différents paramètres (extérieurs, intérieurs), sur les performances du distillateur et les matériaux, notre choix s'est porté sur les paramètres suivants :

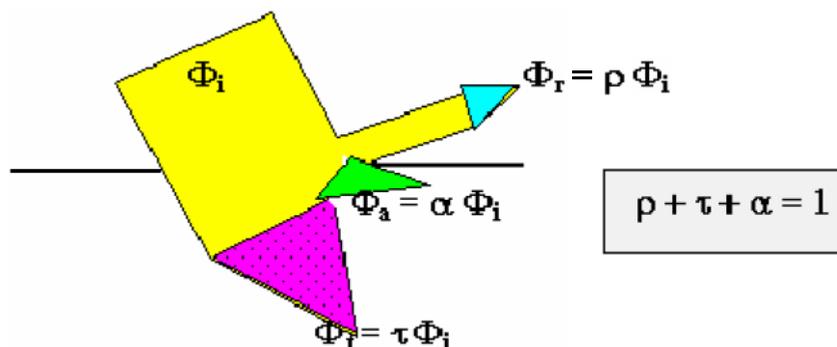
Donc on a travaillé avec un distillateur sans eau c.-à-d. (distillateur à vide).

-Distillateur sans eau saumâtre :

-l'utilisation des systèmes d'isolation différents.

- La hauteur du distillateur

## II.2. Le rayonnement thermique est transfert de chaleur sans le support de la matière



**Figure II.2.1.** différents composante de rayonnement thermique

➤ Nota :

- pour un corps opaque :  $\tau \neq 0 \rightarrow \alpha + \rho = 1$  ; si on le rend réfléchissant :  $\rho \neq 1 \rightarrow$  peu sinon pas d'absorption (application : les combinaisons de feu).
- en toute rigueur, la relation mise en place ci dessus est valable avec les grandeurs monochromatiques :  $\tau_\lambda + \alpha_\lambda + \rho_\lambda = 0$ .

### A. Le corps noir (ou émetteur parfait ou radiateur intégral)

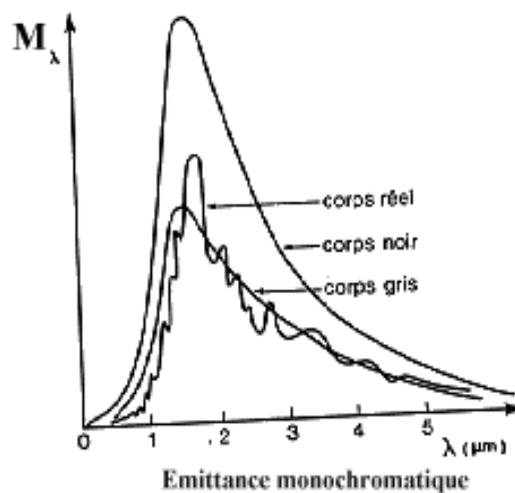
- il obéit à la Loi de LAMBERT.
- c'est le corps qui, à température donnée T, émet le plus et absorbe le plus.

➤ REMARQUE :

- Puis qu'il absorbe tout, il ne réfléchit donc rien du rayonnement incident ==> il apparaît "noir" à température ordinaire.
- c'est un concept théorique.
- réalisations pratiques :

**B. Les différents corps non noirs**

- les **corps gris**--> oxydant, surface recouverte de sciure, tungstène incandescent, surface de brique réfractaire.

**Figure. II.2.3.** Corps non noire.

Lorsque l'on ne connaît rien du corps étudié on fait l'approximation du corps gris.

- les corps dits transparents ---> ils sont tels que :  $\tau = 1$  donc  $\epsilon = 0$  ; mais ceci est relatif, car cette "transparence" dépend de  $\lambda$ . autres corps :
  - les métaux (conducteurs) sont bons réflecteurs ( $\rho \neq 1$  donc  $\epsilon \neq 0$ ).
  - les corps blancs tels que plâtre, peinture, diffusent la lumière solaire (le visible) **sans l'absorber** ; en revanche, ils absorbent l'IR.
  - les gaz absorbent selon leur atomicité :
    - monochromatiques  $\alpha_\lambda \neq 0$ .
    - diatomiques : symétriques ( $O_2, N_2, \text{air}$ ) ;  $\alpha_\lambda \neq 0$  pour  $T < 500 \text{ K}$  ;
    - asymétriques ( $NO, CO, \dots$ ) ;  $\alpha_\lambda \neq 0$ , à température normale.

- polyatomiques (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>) absorption sélective dès la température ambiante.
- ex. : CO<sub>2</sub> a des bandes d'absorption vers : 2,6 μm ; 4,3 μm ; 15 μm ; H<sub>2</sub>O a également des bandes d'absorption vers : 1,3 μm ; 1,8 μm ; 2,7 μm ; 5,9 μm ; 19 μm . Par ailleurs, la Loi de KIRCHHOFF n'est plus valable.

$$P = P_{\text{émis}} - P_{\text{absorbé}} = S \epsilon \sigma (T^4 - T_a^4) \tag{113}$$

- lorsque (T - Ta) << T on peut développer P en fonction de (T - Ta) pour obtenir :

$$P = S \epsilon \sigma T^3 (T - T_a) \tag{114}$$

- on peut alors, comme pour les deux autres processus de transfert de chaleur, conduction et convection, associer au rayonnement à travers un système (S ; ε ; T), une résistance thermique de valeur égale à :

$$R_{rt} = \Delta T / P = 1 / 4 S \epsilon \sigma T^3$$

- Rappel des expressions des résistances thermiques associées aux trois processus de transfert thermique :

Processus	Résistance thermique
Conduction	$R_{cd} = e / \lambda S$
Convection	$R_{cv} = 1 / h S$
Rayonnement (T-Ta) << T	$R_{rt} = 1 / 4 S \epsilon \sigma T^3$

### II.3.Principe de fonctionnement du distillateur simple effet

Le rayonnement solaire incidents sur le verre traverse ce dernier et est absorbé par l'absorbeur. L'absorbeur réémet à une température dont le spectre se trouve décalé vers les fortes longueurs d'onde pour lesquelles le facteur de transmission de la vitre est faible (fig.4). La majeure partie de l'énergie incidente se trouve donc emprisonnée à l'intérieur du système, ce phénomène constitue « l'effet de serre ». Si l'on verse une nappe d'eau d'épaisseur faible sur l'absorbeur, l'énergie émise par ce dernier l'échauffe en provoquant ainsi son évaporation. L'eau évaporée vient en contact de la vitre qui ayant un coefficient d'absorption très faible se trouve donc à une température plus basse par rapport à la vapeur d'eau, d'où la condensation de la vapeur, recueillie ensuite sous forme d'eau distillée.

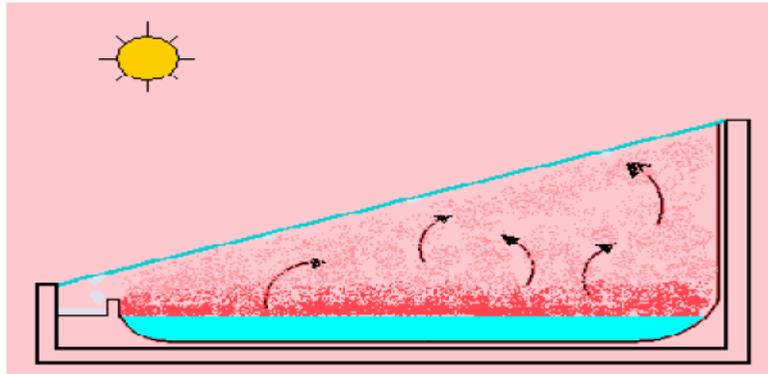


Figure. II.2.4. Principe de fonctionnement du distillateur

#### II.4. Matériels utilisés :

- **Boitier** : bois sec ordinaire de dimensions :

Distillateur	Observation
Nature	Bois
Epaisseur du bois	0.008m
Surface intérieur du bassin (base du boitier)	0.31×0.69
Hauteur arrière du boitier	0.345m
Hauteur avant du boitier	0.12m
Surface d'évaporation	0.31×0.69m <sup>2</sup>

- **Absorbeur** :

Nous avons utilisé une peinture noire en vente dans les quincailleries que nous avons d'abord appliqué sur la base du boitier ; et un plastique noire ordinaire de quincaillerie. Ce dernier il est aussi déposé au fond du boitier de telle sorte qu'il épouse la forme de base de boitier. Puisqu'il est une épaisseur très fine.

- **Couverture transparente**

Vitre ordinaire de dimensions

Vitrage	observation
Nature	Vitre ordinaire
Nombre	1
Epaisseur de la vitre	0.0059
inclinaison	18°
Dimension de la surface extérieur=surface intérieure	0.323×0.74m <sup>2</sup>

### ➤ Matériau isolant

L'isolation est l'un des paramètres dont nous voulons étudier l'influence sur la performance du système (variation de température), et de voir de c'est matériaux sélectifs soit pour l'isolation, soit pour l'absorption avec la variation du temps, pour cela, nous avons utilisé deux types d'isolations successivement pour renforcer l'action du bois qui est la première couche, mais qui présente un coefficient de conductibilité un peu élevé ( =0.13 à 0.40 w/m.k) ; et par conséquent une perte de chaleur relativement élevée :

- une peinture blanche de quincaillerie appliquée sur toute la surface extérieure du bois pour les essais allant du 22.mai 2012 et le 24.mai 2012.
- un film de feuille d'aluminium fin en vente dans les quincailleries, superposé sur un film de plastique transparent de quincaillerie. Ce dernier servant de support résistant pour l'aluminium très fragile et contribuant en même tant par ses propriétés de mauvais conducteur thermique. Ce système est superposé au précédent système boitier plus peinture blanche en prenant des précautions à laisser un espace entre les deux systèmes.

Dans ce système, il s'agit de profiter de l'excellent pouvoir réflecteur de l'aluminium ( $\rho=0.95$ ) qui, enrobant une surface chaude, sans la toucher, lui renvoi les rayons infrarouges qu'elle émet, limitant ainsi ses pertes thermiques par rayonnement et de la propriété de mauvais conducteur du plastique transparent limitant les pertes par convection thermique de la surface chaude. Été isolation a été utilisée pour les essais du : 4juin au 7juin2012.

### II.5.Système d'étanchéité

L'étanchéité de l'ensemble a été réalisée par l'utilisation d'un scotch transparent ordinaire qui adhère au bois et à la vitre.

### II.6.Terrain d'expérimentation

Le distillateur a été réalisé dans le laboratoire de thermodynamique et de sciences des matériaux du bloc de laboratoires d'hydraulique, génie mécanique et tests effectués sur le terrain contiguë à ce même bloc sur des temps d'expositions s'étalant de 09 heure à 16 heures.

### II.7.Coordonnées géographiques [A]

Nous considérons les coordonnées de Tlemcen qui sont :

- Altitude : 750m
- Latitude :  $+35^{\circ}28'$
- Longitude :  $-1^{\circ}17'$

Le distillateur déposé sur une table de hauteur avait une orientation Sud- nord.

### II.8Compagne de test

La compagne de test a été axée sur les mesures de la température ambiante du milieu environnement, de la température de la surface extérieure de la vitre, de la température de la surface d'extérieur de l'isolant, et de la surface de l'absorbeur (élément de base), en fonction du temps. En même temps nous avons procédé à la variation de certains paramètres pour constater leurs effets sur l'évolution de ceux mesurés.

Les paramètres variés sont les suivants :

- **L'absorption** : trois types des matériaux sont utilisés, la peinture noir sur la base intérieur du système, et le polymère noir, à la fin l'aluminium non brillant (gris mate).
- **L'isolation** : deux types d'isolations ont été testés à savoir ; premièrement l'application d'une couche de peinture blanche sur la surface extérieur toute entière y compris la base du boîtier et deuxièmement l'intégration d'un système en feuille d'aluminium.

### II.9.Dispositifs de mesure des températures :

#### a) Préparation des thermocouples :

Les thermocouples utilisés sont de type K.(basse température) il est sous la forme des fils En bobine, on découpe la longueur nécessaire avec banc d'essai l'acquisition de données qui se trouve dans un abri.

Le thermocouple est une association de deux fils de matériaux de nature différente délivrant Une force électromotrice (U) proportionnelle à la température dans laquelle se trouve le point de soudure des deux fils.

Prendre les deux fils en matériaux différents qu'on soude avec le chalumeau pour réaliser Un seul point de soudure qui sera fixé (soudure chaude SC).

Cette extrémité de soudure appelée « soudure de mesure » extrémité deux « bornes » de raccordement qui sont à la température  $t_a$  de l'appareil de mesure ou de ou de l'ambiance. Lorsque la soudure de mesure se trouve à une température différente de  $t_a$ , il apparait entre les bornes de raccordement une f.e.m qui dépend du couple métallique et des températures  $t$  et  $t_a$ . Le thermocouple de type k est une jonction de Chrome et d'Alumel. Il possède une plage de mesure étendue de -100 à + 1370°C.

- Alumel : alliage composé de 95% de nickel, 2% de manganèse et de 1% de silicium.
- Le Chromel : est l'alliage composé de 80% de nickel et 20% de chrome.

Enfin de vérifier la soudure obtenue, on procéde à l'étalonnage de chaque thermocouple, Cette opération a fait entre deux points de mesure 0°C et 100°C

### **b) Etalonnage :**

L'étalonnage d'un thermocouple consiste à relever sa f.e.m. E en fonction de l'écart de température. Entre la température de la soudure "froide" et celle de la soudure "chaude"(SC et SF). On peut effectuer un étalonnage par comparaison en relevant, pour la même température, la f.e.m. du thermocouple à étalonner et la température donnée par tout autre thermomètre de référence.

Dans l'étalonnage direct ou absolu en relevant la f.e.m. du thermocouple en fonction de températures connues. Ces températures connues ou pointes fixes correspondent la plupart du Temps a des changements d'état de corps purs.

A l'équilibre, lors de ces transformations, la température reste constante si la pression reste Constante. Par exemple, l'équilibre H<sub>2</sub>O liquide - H<sub>2</sub>O vapeur a lieu a 100 °C sous pression Normale (760 mm Hg) avec une incidence importante de la pression sur la température D'équilibre alors que l'équilibre H<sub>2</sub>O liquide - H<sub>2</sub>O solide a lieu a 0 °C sous pression normale (760 mm Hg) avec une incidence peu importante de la pression Une fois les deux fils du thermocouple soudés, il y a lieu de procéder à son étalonnage pour s'assurer de la précision de la mesure donnée par le thermocouple Comme initiation à cette opération, on a fait l'étalonnage de quatre thermocouples de type K. Chaque thermocouple a été Relié à l'acquisition de donné qui assure la lecture (en °C) de la température donnée par le point de soudure du thermocouple.

L'opération de l'étalonnage se fait en deux étapes :

- La vérification de la mesure du zéro (0°C) : On plonge le point de soudure dans un récipient Qui contient de la glace fondante.
- La vérification de la mesure du 100 °C : On plonge le point de soudure dans un récipient qui Contient de l'eau bouillante.

Les mesures sont effectuées après 3 minutes pour chaque thermocouple. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant:

Donc c'est thermocouples sont installés comme suit typeK (mesure de la température de l'absorbeur et de la température ambiante), et le thermomètre digitale(mesure de la température de la vitre et de l'isolent).

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant :

Type de thermomètre	Thermocouple type K	Thermomètre digitale
Indication de Température à 0°C	-0.13	0.00
Indication de Température à 100°C	94.45	98.70

**Tableau.1.** résultats des mesures des thermomètres.

D'après le tableau les résultats sont acceptables car la précision de ce genre de thermocouple de type K est de  $\pm 1.5^{\circ}\text{C}$  Ces thermocouples peuvent être exploités sur les bancs d'essais expérimentaux.

### III. Résultats expérimentaux :

Les résultats sont présentés sous forme des tableaux (Tab5.1 au Tab 5.6) pour chaque journée avec l'explication des paramètres prises en compte.

Définitions des symboles utilisés :

$T_a$  : température ambiante du milieu environnant ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_A$  : Température de l'absorbeur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_V$  : température de la face externe de la vitre ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$T_I$  : Température de la face extérieure de l'isolant ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**Tableau 5.1 journée du 22 mai 2012**

heur	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T_V(^{\circ}\text{C})$	$T_A(^{\circ}\text{C})$	$T_I(^{\circ}\text{C})$	Etat ciel	vent
10h00	19	22.9	34.2	*	Trais claire	Unpeut fort
11h00	20.8	23.1	48.8	22.5	//	calme
12h00	25.6	28	62	25.7	//	Peut fort
12h20	30	28.3	62.5	26.7	//	calme
12h35	29.8	31.5	63.3	37.1	//	//
13h00	28.2	32.6	66.8	30.5	//	//
13h25	30	33.3	78.8	32.1	//	//
14h25	27.6	34.9	80	32.9	//	//
15h25	29.2	34	74.7	33	//	//
16h00	28.5	31.5	69.7	32.5	//	//

**Tableau 5.2. Journée du 24 mai 2012**

heur	$T_a(^{\circ}\text{C})$	$T_V(^{\circ}\text{C})$	$T_A(^{\circ}\text{C})$	$T_I(^{\circ}\text{C})$	Etat ciel	vent
10h00	25.2	25.4	29.4	*	Trèsclaire	calme
11h00	29.3	29.1	49.8	30	//	//
12h00	31.3	31.1	58.8	31.6	//	faible

12h15	35.2	31.5	61.2	32.2	//	calme
12h20	33.4	31.5	65.6	33.6	//	//
12h30	32.8	33.1	68.5	34.6	//	//
12h45	34.6	34.7	67.3	36.8	//	//
13h00	35.1	39.5	67.4	43.9	//	//
13h10	33.5	46.7	75.7	41.4	//	//
13h30	35.5	41.4	76.5	38.6	//	P calme
14h00	36.2	38.2	80	40.3	//	calme
14h30	32.9	39.8	78.1	37.8	//	p.c
15h00	33	37.7	72.8	36.8	//	//
16h00	31.2	36	68.2	35.6	//	//

Tableau 5.3. Journée de 4.juin.2012

heur	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>v</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)	T <sub>I</sub> (°C)	Etat ciel	vent
10h00	30.4	30.9	34	*	T.claire	calme
11h00	37.3	40.3	51.6	30.9	//	p.calm
12h00	35.6	42.4	68.3	32.4	//	//
12h30	33.5	45.9	86.3	34.7	//	//
13h00	32.1	46.3	95.1	36.9	//	//
13h30	34.6	47.5	102.1	39.9	//	//
14h00	35.1	46.9	102.4	40.1	//	//
14h30	36.9	45.9	100.8	39.7	//	//
15h00	34.6	45.3	99.3	38.7	//	//
15h30	34.2	44.3	95.4	37.9	//	//
16h00	34.8	42.7	79	38.1	//	//

Tableau5.4.Journée 5.juin 2012

heur	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>v</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)	T <sub>I</sub> (°C)	Etat ciel	vent
9h15	27.4	28.3	30.5	*	T.calme	calm
10h25	29.1	37.7	49.4	32.3	//	//
11h15	36.9	43.5	56.9	36.5	//	//
12h15	34.6	46.8	66.9	37.9	//	//
12h30	35.1	47.7	65.2	38.7	//	//
12h45	34.4	48.4	70.9	39.1	//	//
13h00	36.2	47.8	67.6	38.9	//	//
13h25	39.4	47.8	73.4	41.1	//	//
14h25	37.8	46.7	75.2	39.3	//	//
15h25	35	43.5	75.3	38.6	//	//
15h45	36.1	42.3	69.6	38.4	//	//
16h00	33.9	42.1	75.7	38.7	//	//

Tableau 5.5.Journée 6.juin 2012

heur	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>v</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)	T <sub>I</sub> (°C)	Etat ciel	vent
9h10	30.7	27.5	35.7	*	T.clair	calm
10h10	31.9	32	49.2	36.3	//	//

11h10	35	35.8	53.8	41.1	//	//
12h20	37.2	38.4	61.3	43.4	//	//
12h40	38.5	39.3	61.1	45	p.nuage	//
13h00	39.1	40.3	64.7	47.5	nuage	//
13h20	36	40.8	61.9	45.1	c.nuage	p.fort
13h40	35.8	41.2	66.2	45.9	//	calm
14h00	38.2	42	67	45.3	p.de n	//
14h30	36.4	43.3	71.4	45.6	//	//
15h00	37.6	45.1	77.4	45.9	//	//
15h30	38.3	42.8	72.9	44.1	//	p.calm
16h00	37.6	43.1	72.6	44.3	//	//

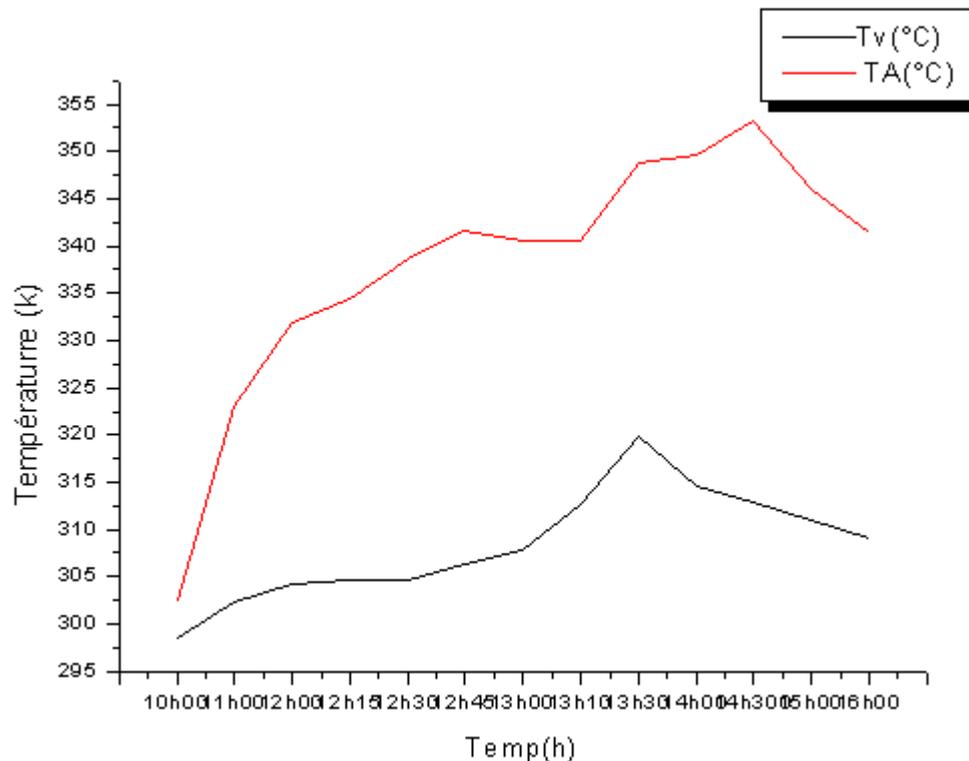
Tableau5.6.Journée 7 juin 2012

heur	T <sub>a</sub> (°C)	T <sub>v</sub> (°C)	T <sub>A</sub> (°C)	T <sub>I</sub> (°C)	Etat ciel	vent
9h40	35.5	31.7	38.2	*	T.clair	p.calm
10h40	36	39	52.2	33.5	//	//
11h40	33.1	42.1	52.2	35	//	//
12h00	35.5	42.7	52.9	34.7	clair	//
12h30	37.3	42.8	59.2	34.9	p.calire	//
13h00	38.8	44.8	61.7	35.7	//	//
13h30	39.6	45.5	62.9	36.9	clair	//
14h00	36.7	45.1	66.1	36.8	//	calm
14h30	40.2	44.7	69.4	37.9	//	//
15h00	35.2	43.3	69.7	37.9	//	//

### III.1.Courbes d'évaluation et interprétation

Nous avons représenté uniquement les courbes d'évaluation des températures de vitrage, et de l'absorbeur avec différents matériaux sélectifs appliquer sur se dernier en fonction de temps.

Nous résumons notre interprétation sous forme d'observation des tendances du système que nous avons pu constater lors des différentes journées de tests.

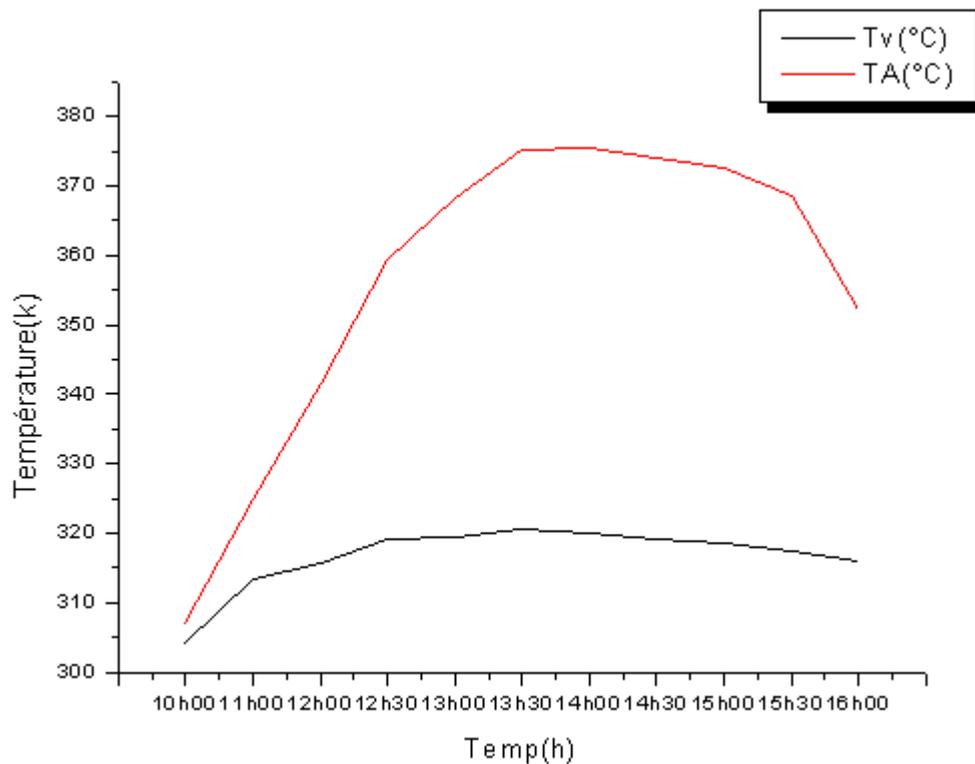


**Figure II.2.5.** courbes d'évaluation des températures de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 24 mai 2012).

La première étape on a une isolation en peinture blanche, et surface absorbante peinture noire.

Au début la température de la vitre est nettement au dessus de celle de l'absorbeur, cela est dû au fait que le matériau sélective déposée sur la base du distillateur (peinture noir) presque à la température nocturne de la salle et la vitre à la température du milieu ambiant extérieure. Le phénomène ne s'inverse qu'après environ 02 heures de marche (02h). Cette évolution due à l'absorption maximale des rayonnements solaires surtout par le matériau absorbant, il atteint son maximum (80°C) qu'à peu près vers (14h30), et due à une bonne isolation avec de la peinture noire qui a une très bonne réflexion, et la couverture transparente vers le côté de (13h10), on voit bien quand à un grand éclaircissement à (13h00), les deux graphes commencent à diminuer vers (16h30), la diminution de l'éclaircissement solaire et d'autres variations qui influent sur le système.

La deuxième étape on a changé les matériaux, isolation aluminium brillant, et l'absorbeur polymérique noir.



**Figure II.2.6.** courbes d'évaluation des températures de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 4 juin 2012).

La différence de températures est presque nulle au début l'application des deux matériaux été nouvelle donc ils ont conservées une légère température par rapport à la salle ; car le dispositif étant isolé perd très lentement la chaleur emmagasinée pendant la journée. Quelque minute avant de sortie à l'extérieure, na pas été reposé ; pour cette journée en voie pas une grande élévation de température de vitre par rapport à la journée de 24 mai 2012, elle est presque stable, par ailleurs la différence de température entre l'absorbeur et la vitre est nettement élevée et conduisant à une grande absorption de l'énergie solaire par le polymère noire. La différence de température nettement élevée s'explique par l'état de vent peut fort pour cette journée qui contribue soit à la stabilité de la température ; soit à la chute de température de la vitre, donc on peut dire que le vent influe positivement sur la production du système, mais par contre la surface absorbante de se matériaux atteint sont maximum par rapport à l'autre matériau ; malgré le ciel et très clair donc sa entre dans les propriétés des deux matériaux.

La troisième étape on change le matériel de la surface absorbante aluminium gris mate, et l'isolation reste par le même matériau.

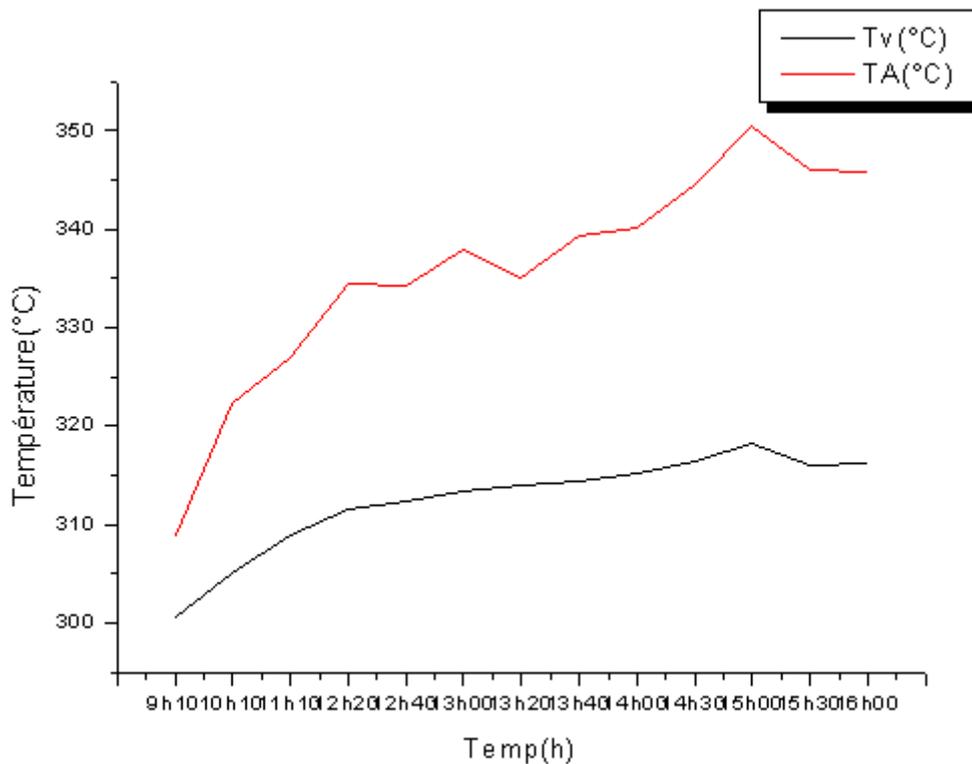
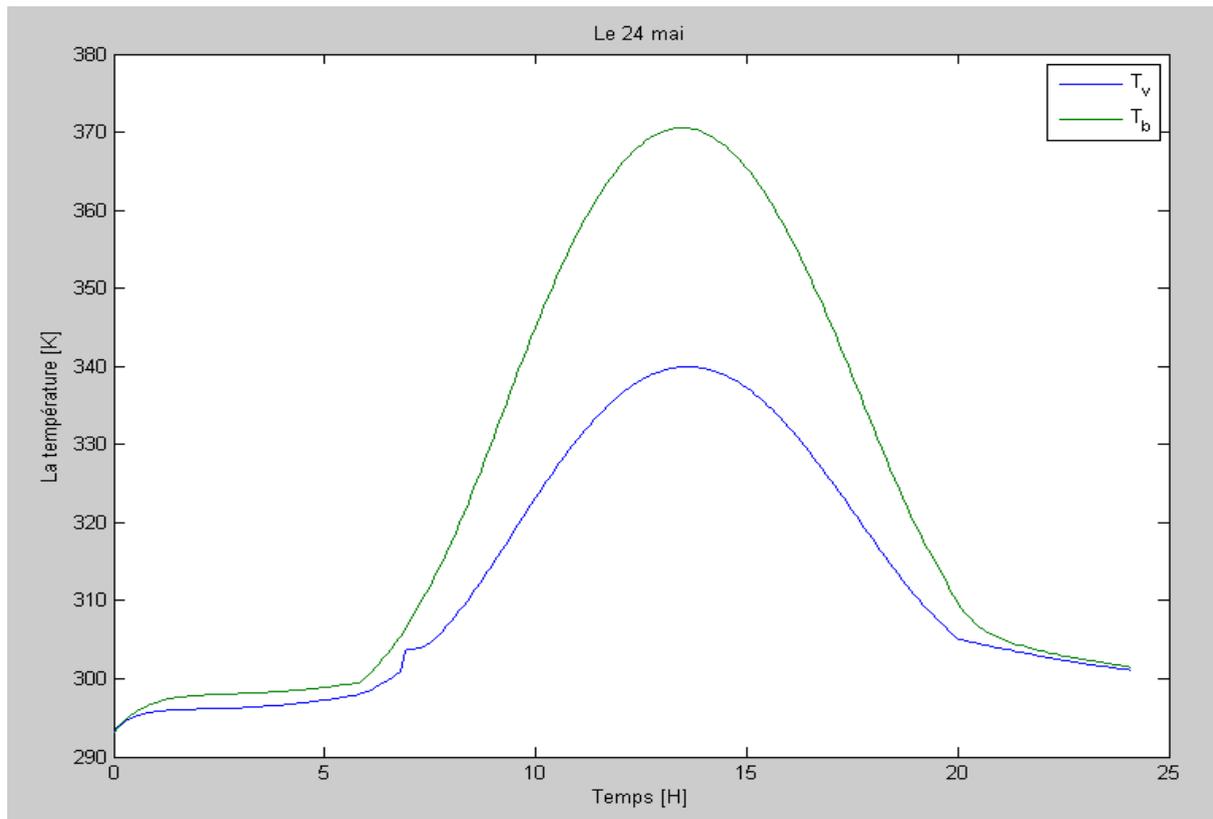


Figure II.2.7. Courbes d'évaluation des températures de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 6 juin 2012).

Les conditions météorologiques (ciel et vent calme) sont similaires à celles du 5 juin 2012. On remarque que les écarts de températures pour cette journée ne suivent pas les mêmes évolutions, la légère hausse de la température pour l'absorbeur entre dans les caractéristiques de matériau utilisée.

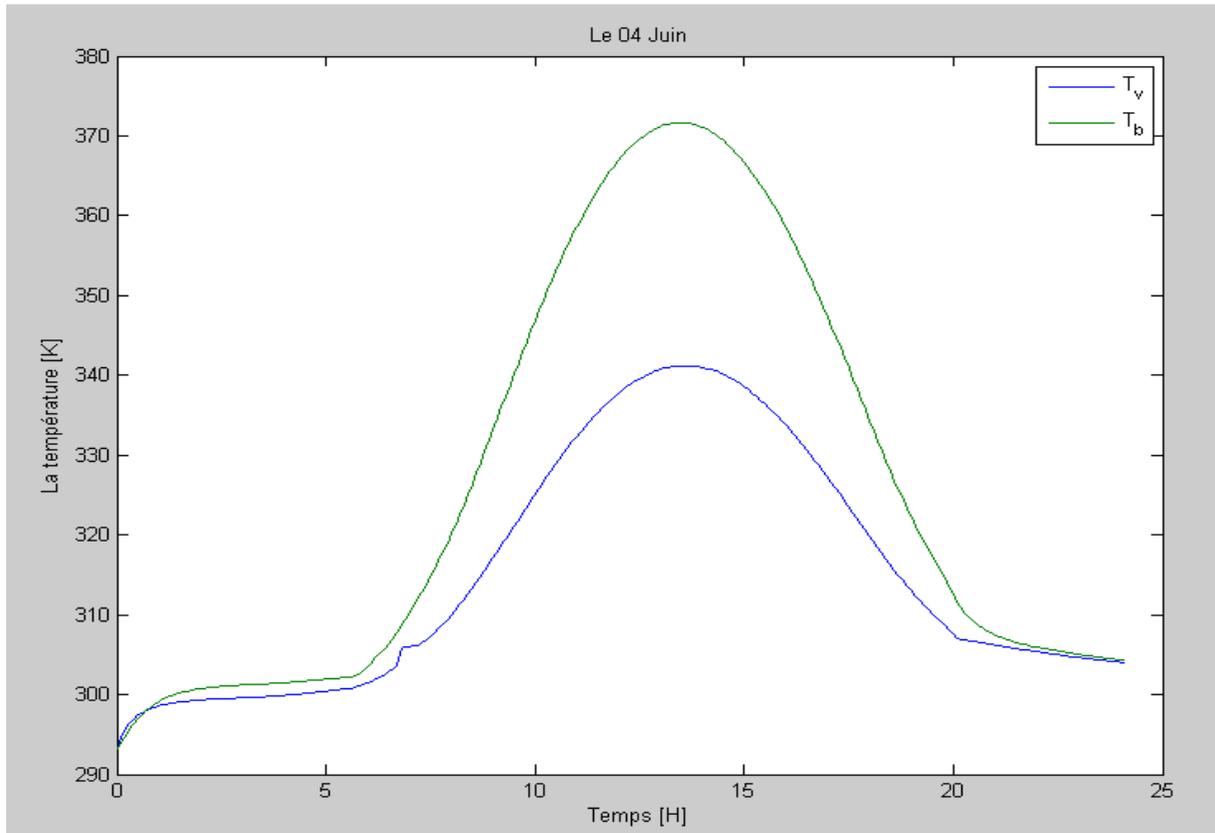
On observe que la courbe de la vitre augmente un petit peu par rapport au 4 juin 2012 ; sa due au vent calme.

- J'ai fait une notre étude théorique, par simulation on utilise un logicielle mathématique pour le calcul et tracé des graphes c'est le (Matlab), on à déjà parlés sur notre bilan appliquer précédemment, on va faire une évolution et après une comparaison avec les résultats expérimentales.



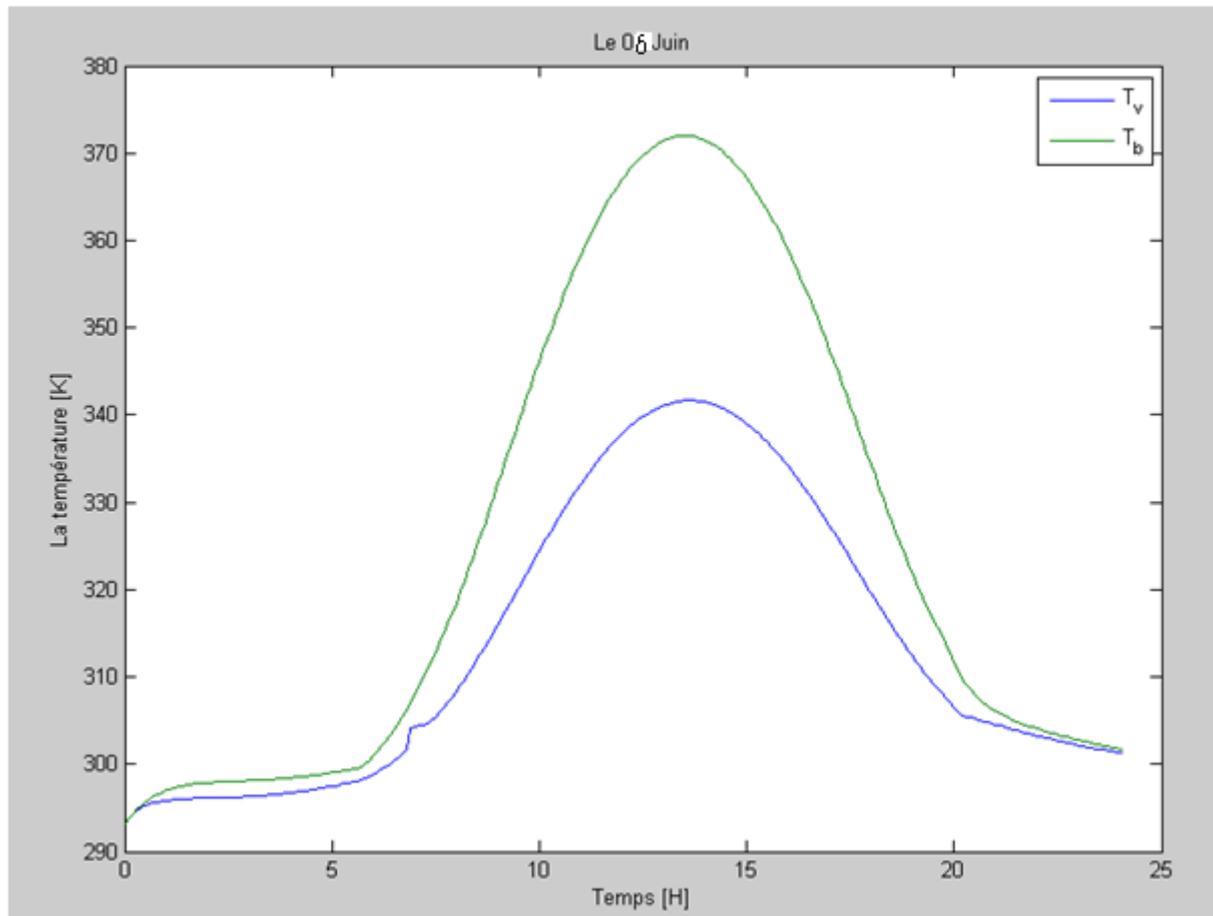
**Figure II.2.8.** courbe d'évaluation de la température de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 24 mai 2012).

On observe que les deux graphes ils ont le même point de départ presque nul, ils sont variés les deux au même temps, ces à peu près stable mes à certain moment on voit une hausse de température des deux graphes rien que on remarque petite variation dans le graphe de vitrage, la courbe verte atteint son maximum dont la température de 375k ; après on remarque une chute jusqu'à 300k, la même chose pour la courbe bleue (la vitre) il y a une hausse de température mais pas comme l'absorbeur et après une rupture sa revient ou condition théorique utilisé et les caractéristiques des matériaux.



**Figure II.2.9** courbe d'évaluation de la température de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 4 juin 2012).

C'est presque la même remarque que la figure précédant, ils sont à peu près confondus dans le point de départ, avec le même mouvement, jusqu'à atteindre des températures maximales, mais il y a une différence entre la vitre et l'absorbeur, et puis une diminution jusqu'à se retrouver au même point, donc ça revient toujours à la variation des caractéristiques et des conditions de calcul.



**Figure II.2.10** courbe d'évaluation de la température de la vitre et de l'absorbeur en fonction du temps (Journée du 6 juin 2012).

Pour cette journée la, on ne voit pas une grande différence entre les graphes seulement entre les optimales, et la largeur des courbes, qui revient à la variation des différents matériaux et leurs caractéristiques qui diffèrent.

### III.2. Comparaison entre la partie théorique et expérimentale

Dans la partie théorique des différentes journées, des bons résultats et presque les mêmes remarques, chaque graphique on varie les conditions des deux matériaux (absorbeur et vitre), et avoir c'est en fait des résultats acceptables, on a varié les conditions jusqu'à ce qu'on atteigne les résultats proposés.

C'est en comparant, entre les résultats théoriques et expérimentaux, on voit bien qu'il n'y a pas une grande différence, le programme calcule pour nous des données de bons schémas, on remarque toujours qu'il y a une différence de température entre la vitre et l'absorbeur, mais cette surface absorbante nous a donné une température optimale à peu près la même chose que les résultats expérimentaux, il y a une petite différence dans les schémas expérimentaux qui revient à la variation des conditions météorologiques (vitesse de vent, éclairage solaire, nuage), et des erreurs soit au niveau de la mesure (humaine), et des erreurs de matériel utilisées. Mais on a eu de bons résultats et les mêmes.

III.3. Discussion sur les matériaux sélectifs

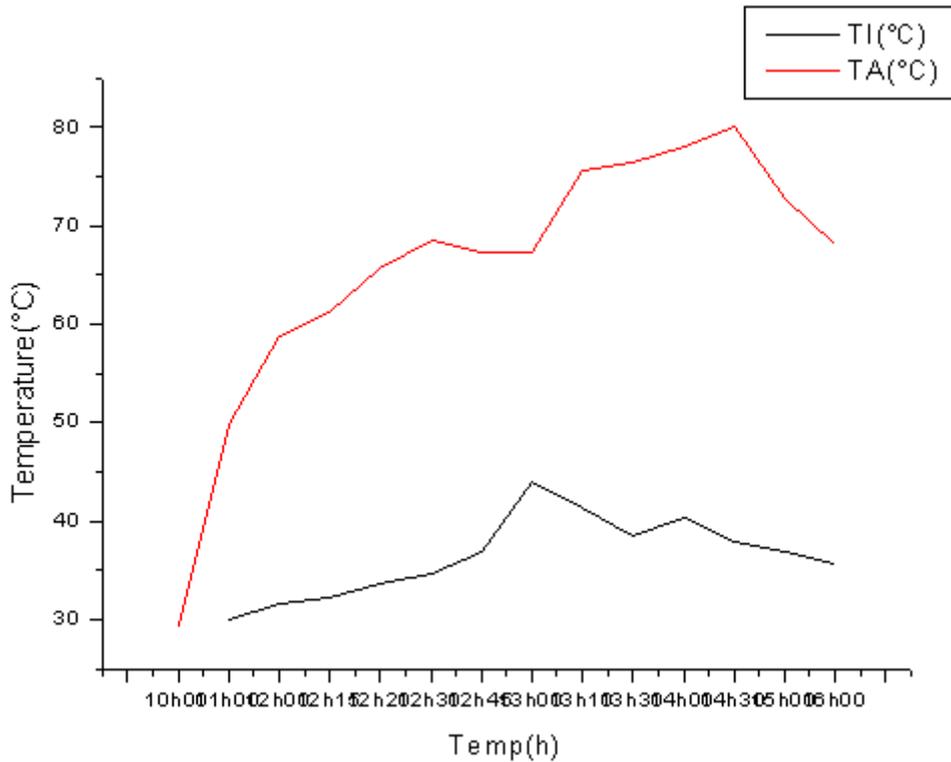
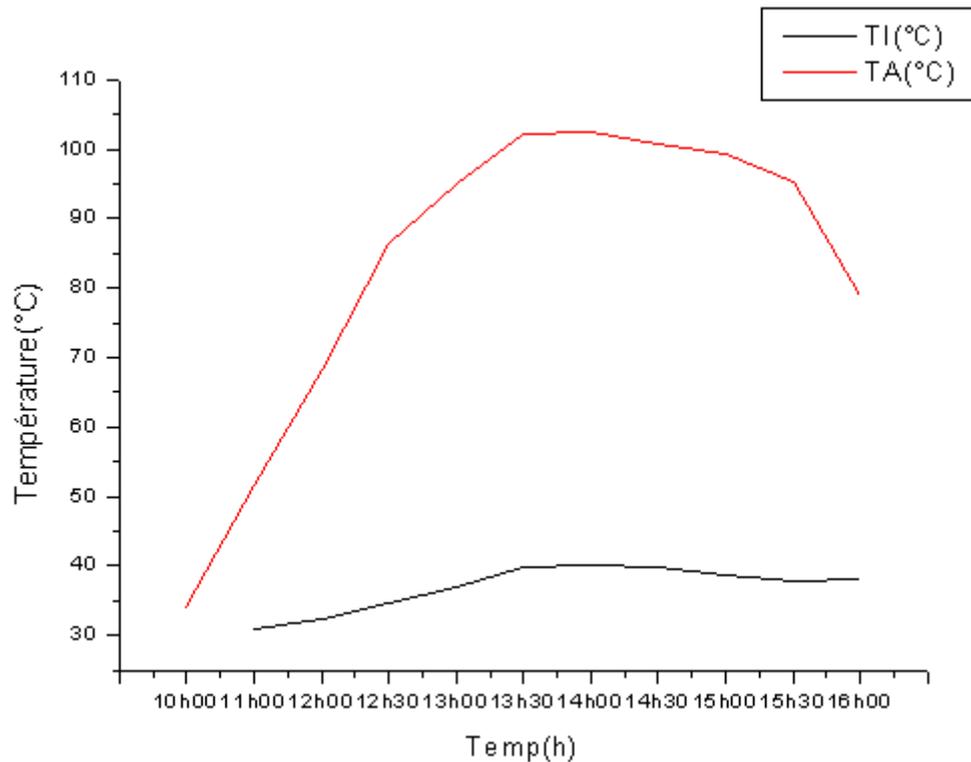


Figure II.2.11. courbe d'évaluation de la température de l'isolant (peinture blanche) et de l'absorbeur (peinture noire) en fonction du temps (Journée du 24 mai 2012).

Les observations de la journée de 24 mai 2012 sont valables, la variation de la vitesse du vent influe sur le matériau isolant (la peinture blanche), il diminue la température de ce dernier, on observe qu'il y a une augmentation de la température vers (13h00), et puis un changement ; il diminue après il augmente un peu vers (14h00), cela est dû à la variation météorologique, et les caractéristiques des types. Alors que les matériaux absorbent (peinture noire), ils atteignent leur maximum à (14h30), ils absorbent le maximum des rayonnements solaires.



**Figure II.2.12.** courbe d'évaluation de la température de l'isolant (Aluminium) et de l'absorbeur (polymère noir) en fonction du temps (Journée du 4 juin 2012).

On observe que le matériau sélective (polymère noir) il a une forte hausse constante, elle dévie un petit peu puis elle augmente plus jusqu'à ce qu'elle atteigne son maximum, même les conditions météorologiques sont stables (ciel clair, vent calme), environ (15h30) il commence à diminuer mais, par la diminution de l'éclairement ; et d'autres paramètres. Par contre le deuxième matériau utilisé pour l'isolation ; varie un petit peu et puis reste presque stable.

#### III.4. Résumer :

Cette évolution globale des différents matériaux sélectifs utilisée soit pour l'isolation (peinture blanche, aluminium brillant fragile), et pour l'absorption (peinture noire, polymère noir, et aluminium non brillant, donc on va commencer par l'élément principale de toutes les capteurs solaires c'est « l'absorbeur », le premier matériau utilisée et la peinture noire, avec une isolation sur la surface extérieure du capteur par la peinture blanche, elle nous a donnée un pic optimal ces la température maximale, pour le deuxième matériau, le polymère noir avec un changement de l'isolation, il nous a donnée des résultats plus efficace que le premier matériau, cette différence se revint à la différence des caractéristiques physique-chimiques des matériaux sélectifs, et une isolation thermique, on c'est que l'augmentation de l'albédo avec l'application des couleurs blanche elle augmente la réflexion des rayons solaires vers le milieu extérieur la preuve elle nous a donnée des résultats acceptables, l'aluminium aussi c'est très bon réflecteur avec sa couleur brillante et leurs différentes caractéristiques, le problème de vieillissement des matériaux a force de l'utilisation répétée, elle diminue la sélectivité

de c'est matériaux, et les conditions météorologique c'est facteur qui influx aussi sur c'est résultats.

### **Conclusion**

Ces résultats de dépôt des matériaux sélectifs permettant une augmentation des températures d'absorption, c'est in à calculer le rendement on peut trouvés une augmentation très importante du rendement ,avec ces matériaux de bord, En utilisant ces matériaux, on a trouvé un amélioration du température, donc les matériaux sélectives appliquées ont permis de mettre en évidence l'effet de sélectivité de la peinture noir, et polymère noir sur d'autre matériau, elle peut nous données des bon résultats, donc le chois des technologies de dépôts de ces matériaux sélectives doit être simple et économique.