



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ «Abès LAGHROU» DE KHENCHELA  
FACULTÉ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE

Département de Génie Mécanique

*N° de série :...*

**Mémoire de fin d'études**

*Pour l'obtention du diplôme de Master (L.M.D)*

**Spécialité : Génie Mécanique**

**Option : Construction mécanique**

*Thème*

**Etude d'un capteur solaire plan**

*Réalisé par :*

- GHAOUI Salim
- RABHI Farid

*Dirigé par :*

**Dr ZAAMOUCHE Radia**

*Membres de jury :*

- **Dr BOULAHROUZ Salim**
- **Dr CHEHAT Abd elmadjid**

*Promotion 2017 - 2018*

# Remerciements

*Nous remercions en premier lieu Dieu Tout Puissant pour nous avoir accordé la force et la volonté d'achever ce modeste travail.*

*Nous adressons nos plus vifs remerciements à notre encadreur, Madame **ZAAMOUCHE Radia**, enseignante de Génie Mécanique à l'université. Abbas LAGHROUR - Khenchela*

*Ainsi que les membres du jury, Mr. **BOULAHROUZ Salim**, et Mr. **CHEHAT Abd elmadjid** des enseignants de Génie Mécanique à l'université. Abbas LAGHROUR - Khenchela pour avoir accepté d'examiner notre monographie et de rapporter sur notre travail avec efficacité et diligence.*

*Nous avons également l'honneur de remercier Mr. **FELLAH Mamoune** enseignant de Génie Mécanique à l'université. Abbas LAGHROUR – Khenchela pour ses conseils précieux.*

*Enfin, nous tenons à remercier nos familles et nos proches, dont les encouragements et le soutien ont contribué à l'aboutissement de nos études.*

## Dédicace

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Ma très chère mère*

*Ma sœur*

*Mes frères*

*Mon épouse*

*Tous mes amis.*

*Tous ceux que j'aime*

*SALIM*

## DEDICACE

Je ne laisse cette opportunité pour dédie somptueusement à ce modeste travail.

A ma chère famille exceptionnellement ma mère pour sa tendresse sans limite.

A ma femme mes frères et mes sœurs chacun son nom.

A tous mes amis spécialement farid fouad hamza

A mon binôme salim

A la promotion master construction mécanique

A tous qu'il m'aime

# Liste des Figures

Figure II Couches externes du Soleil .....	5
Figure I.2 Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil .....	7
Figure I.3 La sphère céleste.....	8
Figure I.4 Coordonnées terrestres .....	9
Figure I. 5 Coordonnées horizontales .....	10
Figure I. 6 Les coordonnées horaires.....	11
Figure I.7 Angle d'incidence et l'angle de réfraction .....	13
Figure I. 8 Trajectoire du lever au coucher de soleil .....	14
Figure I .9 rayonnement diffus ,direct et réfléchi .....	15
Figure I .10 Carte du monde de l'enseillent moyen annuel .....	19
Figure I .11 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu .....	20
Figure II.1 Coupe d'un capteur solaire plan vitré .....	23
Figure II.2 Absorbeur et revêtement sélectif.....	24
Figure II.3 Capteur sous vide .....	25
Figure II.4 Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.....	26
Figure II.5 Schéma d'un capteur à concentration type dishes.....	27
Figure II.6 Centrale solaire à tour .....	28
Figure II.7 Schéma d'un capteur à air .....	28
Figure.III.1 Schéma du transfert de chaleur par conduction .....	37
Figure III.2 Résistance thermique .....	39
Figure III.3 Schéma du transfert de chaleur par convection .....	40
Figure III.4 : Schéma représente le principe du rayonnement.....	46
Figure III.5 Réception du rayonnement.....	47
Figure IV.1 Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air .....	48

Figure IV.2 Schéma des différents transferts thermique .....	49
Figure IV.3. Schéma analogique équivalent.....	53
Figure IV.4. Transmission du rayonnement .....	59
Figure IV.5. Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées.....	68
Figure IV.6. Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel.....	69

## Liste des Tableaux

Tableau I.1	Caractéristiques principales du soleil .....	03
Tableau I.2	Caractéristiques principales de la terre.....	06
Tableau I.3	Quelque valeurs de l'albédo en fonction de la nature du sol .....	18
Tableau I.4	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques .....	20
Tableau II.1	conductivité thermique de différents matériaux d'absorbeur .....	30
Tableau II.2	propriétés de quelques revêtements sélectifs.....	31
Tableau II.3	regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes .....	32
Tableau II.4	Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants .....	33
Tableau III .1	Conductivité thermique $\lambda$ de certains matériaux.....	38
Tableau III.2	Prandtl de quelques gaz.....	42
Tableau III.3	Prandtl de quelques liquides .....	42
Tableau IV.1	Analogie du système thermique au modèle électrique.....	52
Tableau IV.2	les coefficients de trouble du ciel.....	60

## Nomenclature

Notation Latines	Désignation	Unité
h	Hauteur du soleil	Degré
n	Indice de réfraction	-
i	Angle d'incidence	Degré
ev	Epaisseur de verre	m
L	Longueur ou longitude	m – degré
T	Température	K
a	Albédo	-
S	Surface du capteur	m <sup>2</sup>
t	Temps	s
V	Vitesse	m / s
P	Puissance	W / m <sup>2</sup> K
Cp	Capacité calorifique massique	J / kg . K
D	Diamètre	m
h	Coefficient de transfert de chaleur	W / m <sup>2</sup> K
h <sub>d</sub>	Coefficient d'échange par conduction	W / m <sup>2</sup> K
h <sub>r</sub>	Coefficient d'échange par rayonnement	W / m <sup>2</sup> K
h <sub>v</sub>	Coefficient d'échange par convection	W / m <sup>2</sup> K
Q	Débit massique de l'air	Kg / S
R	Résistance thermique	m <sup>2</sup> .K / W
N	Nombre de vitrage	-

Indices	Désignation	Unité
a	ambient	-
dir	direct	-
dif	diffus	-
i	intérieur ou isolant	-
n	absorbeur	-
s	Sol	-
v	vitre ou vent	-
av	avant	-
arr	arrière	-
lat	latéral	-
g	global	-
sys	système	-
h	horizontal	-
fe	entrée fluide	-
e	extérieur	-
c	voûte céleste	-
b	boitier	-

<b>Caractère grecs</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
$\Phi$	Flux thermique ou latitude du lieu	W/m <sup>2</sup> , -
$\alpha$	Coefficient d'absorption	-
$\tau$	Coefficient de transmission	-
$\rho$	Coefficient de réflexion ou masse volumique	-, kg / m <sup>3</sup>
$\eta$	Rendement	( % )
$\lambda$	Conductivité thermique	W / m.K
$\varepsilon$	Emissivité	-
$\sigma$	Constante de Stephan – Boltzman	-
$\nu$	Viscosité cinématique	m <sup>2</sup> / s
$\mu$	Viscosité dynamique	Kg / m.s
$\beta$	Inclinaison du capteur	Dégre

<b>Nombre adimensionnel</b>	<b>Désignation</b>	<b>Unité</b>
Nu	Nombre de Nusselt	-
Re	Nombre de Reynolds	-
Ra	Nombre de Rayleigh	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
St	Nombre de Stanton	-
Gr	Nombre de Grashof	-

<b>Opérateur mathématique</b>	<b>Désignation</b>	
d	Dérivée	-
$\Delta$	Pas de temps	-
grad	gradient	-
exp	exponentiel	-

# Sommaire

Introduction générale .....	1-2
-----------------------------	-----

## Chapitre I - Gisement Solaire

I-1 Définition .....	3
I.2. Aspect géométrique .....	3
I.2.1 Le Soleil .....	3
I.2.1 .1 .Caractéristiques principales du soleil .....	3
I.2.1.2.Constitution du soleil .....	4
I.2. 2 . La Terre.....	6
I.2. 2 .1.Caractéristiques principales de la terre .....	6
I.2. 2 .2.L'atmosphère terrestre .....	6
I.2.3.Mouvement de la terre au tour du soleil .....	7
I.2. 4. La sphère céleste .....	8
I.3.Système de coordonnées .....	9
I.3.1.Coordonne terrestres .....	9
I.3.1.1.Latitude ( $\Phi$ ) .....	9
I.3.1.2.Longitude (L) .....	9
I.3.2. Coordonnées horizontales .....	9
I.3.2. 1.hauteur angulaire (h).....	9
I.3.2. 2.Azimut (a) .....	10
I.3.3. Coordonnées horaires .....	10
I.3.1 - L'angle horaire w .....	10
I.3.2. Angle déclinaison ( $\delta$ ) .....	11
I.4.Angle d'incidence ( $\theta$ ) .....	12
I.5.Angle de réfraction ( $\theta_r$ ) .....	12
I.6.Paramètres du temps solaire .....	13
I.6.1. Le temps solaire vrai (T.S.V).....	13
I.6.2.Lever et coucher du soleil .....	13
I.6.3.Durée du jour .....	14
I.6.4. Le temps solaire moyen (T.S.M) .....	14
I.6.5.Le temps universel (TU)) .....	15

I.6.6. Le temps légal (TL) .....	15
I.7 - Rayonnement solaire arrivant au sol .....	15
I.7.1- Rayonnement direct .....	16
I.7.2- Rayonnement diffus .....	16
I.7.3- Rayonnement global .....	16
I.8. Le gisement solaire en Algérie .....	19

## **Chapitre II – Généralités sur les capteurs Solaires**

II.1 Introduction.....	21
II.2 Capteurs solaires.....	21
II.2.1 Capteurs solaires thermiques.....	22
II.2.1.1 Capteurs à circulation de liquide.....	22
a) Capteur plan (ou insolateur) .....	22
a.1) Capteurs plan vitrés .....	23
a.2) Capteurs plans non vitrés.....	24
a.3) Capteurs plan à haute performance .....	24
a.3.1) Capteurs plans sélectifs.....	24
a.3.2) Capteurs plans sous vide .....	25
b) Capteurs à concentration .....	26
b.1) Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques.....	26
b.2) Les capteurs à concentration du type dishes .....	27
b.3) Les centrales à tour .....	27
II.2.1.2 Capteurs à air .....	28
II.3. Les composants des capteurs plans .....	29
II.3.1. L'absorbeur.....	29
II.3.2. La couche sélective de l'absorbeur .....	30
II.3.3. La couverture transparente (vitre).....	31

II.3.4. L'isolation thermique .....	32
II.3.5. Le cadre .....	34
II.3.6. Le fluide caloporteur .....	34
II.4. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire .....	34
II.5. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires.....	35
II.5.1. Les paramètres externes .....	35
II.5.2. Les paramètres internes .....	35
II.6. Paramètres de fonctionnements .....	36

## **Chapitre III- Théorie de transfert de chaleur**

III.1 Transfert par Conduction .....	37
III.1.1 Loi de Fourier .....	37
III.1.2 Résistance thermique .....	39
III.1.3 Equation générale de la chaleur .....	39
III.2 Transfert par Convection .....	40
III.2.1- Convection forcée .....	41
III.2.2 convection naturelle .....	44
III.2.3- Convection mixte noir .....	44
III.3 - Transfert par rayonnement .....	44
III.3.1- L'émissance (totale .....	44
III.3.2 - Le corps noir .....	45
III.3.2 .1.Loi du rayonnement thermique .....	45
III.3.2.1.1 Loi de Planck .....	45
III.3.2.1.2 Loi de Stefan Boltzmann.....	45
III 3.3.Transfert par rayonnement entre surface .....	46
III.3.4. Réception du rayonnement par un solide .....	46

## Chapitre IV- modélisation numérique d'un capteur thermique

IV. 1.Introduction.....	48
IV.2. Description du modèle .....	49
IV.3. Hypothèses simplificatrices.....	51
IV.4. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire .....	51
IV.4.1. Méthode par tranche.....	51
IV.5. Analogie électrique.....	52
IV.6.Bilan énergétique aux différents nœuds .....	54
IV.7. Détermination des coefficients de transfert thermique .....	56
IV.8. Calcul des puissances $P_v$ et $P_n$ .....	58
IV.9.Calcul de la puissance diffuse .....	61
IV.10. La discrétisation des équations au niveau du capteur .....	61
IV.10.1. Echange au niveau de la face extérieure de la vitre .....	61
IV.10. 2. Echange au niveau de la face intérieure de la vitre .....	62
IV.10. 3. Echange au niveau de l'absorbeur .....	62
IV.10. 4. Echange au niveau de fluide caloporteur.....	62
IV.10. 5. Echange au niveau de la face intérieure de l'isolant.....	62
IV.10.6. Echange au niveau de la face extérieure de l'isolant .....	62
IV.11. Résolution du système .....	63
IV.11.1. Méthode de Gauss Seidel .....	63
IV.12.Discutions.....	67
IV.13. Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées.....	68
IV.14. Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel.....	69
IV.15. Variation temporelle du rayonnement solaire .....	70
Conclusion générale .....	[71-72]
Références Bibliographiques .....	[73-74]

## Introduction générale

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle de temps humaine. L'énergie renouvelable, non polluante, contribue à l'amélioration de la gestion des ressources locales et à la génération des emplois. Parmi ces énergies on trouve l'énergie solaire très répandue dans le monde. En une année, l'humanité entière consomme 10 milliards de tonnes équivalent de pétrole. [1]

L'énergie solaire permet de réduire la « dépendance énergétique » d'un pays et d'éviter les atteintes à l'environnement occasionnées par les sources d'énergie conventionnelles. Les techniques pour en tirer profit de l'énergie solaire ont été grandement améliorées, aujourd'hui il y a plusieurs millions de m<sup>2</sup> de capteurs et de systèmes solaires installés dans le monde utilisant les technologies les plus récentes .[2]

Ainsi l'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. [1]

Il existe deux utilisations de l'énergie solaire :

- La production de chaleur : le solaire thermique.
- La production d'électricité : le solaire photovoltaïque

Les capteurs solaires sont de différents types et celui qui nous intéresse particulièrement, le capteur plan à air, qui est utilisé dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses et modérées, telles que pour le chauffage des locaux, et le séchage qui est une opération souvent nécessaire dans de nombreux processus : (agro- alimentaire, matériaux de construction, bois...). [3]

Le travail que nous proposons porte essentiellement sur une étude numérique pour évaluer le champ thermique des différents composants d'un capteur solaire à air, ainsi que l'évolution du rayonnement solaire au cours de la journée.

Ce mémoire comporte quatre chapitres qui sont les suivant :

- Dans le premier chapitre, nous avons présenté les caractéristiques du soleil, de son énergie et de son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous avons défini quelques données astronomiques et nous avons introduit quelques données sur le gisement solaire en Algérie.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude théorique du capteur plan en détaillant ses différents composants et les principaux matériaux utilisés dans la conception des capteurs, sous forme de tableaux, pour donner au lecteur la possibilité d'imaginer un choix judicieux, ainsi que le principe de fonctionnement.
- Dans le troisième chapitre, nous avons présenté un certain nombres de définitions et théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).
- Le quatrième chapitre est réservé à l'étude numérique du capteur. Nous avons présenté l'état de l'art du capteur et le bilan énergétique aux différents nœuds ainsi que les puissances de rayonnement. Nous avons obtenus un système d'équations qui peut être résolu par la méthode numérique de Gauss Seidel.

## I.1.Définition

Le gisement solaire, c'est... le soleil. Gratuit, il brille pour tout le monde. L'énergie solaire et le moteur de toutes les grandes sources naturelles. [1]

## I.2. Aspect géométrique

### I.2.1 Le Soleil

Le Soleil fait parti d'un système stellaire d'environ 340 milliards d'étoiles. La plupart sont concentrées dans une région en forme de disque délimitée par des bras qui se repartissent en spirale à partir d'un noyau central. Elle occupe une position périphérique à 28000 années lumière du centre, autour duquel il tourne à une vitesse de 225 km/s. Il effectue une révolution en 300 millions années. Elle est l'étoile centrale de notre système planétaire, autour duquel tournent dans l'état actuel de nos connaissances 7 planètes, 5 planètes naines et des millions d'astéroïdes. Elle contient plus de 99.8% de la masse totale du Système Solaire. [1]

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'**hydrogène** et 25% d'**hélium** en masse et 92,1% d'hydrogène et 7,8% d'hélium en nombre d'atomes. Tous les autres éléments ne représentent pas plus de 0,1%. Ces chiffres varient lentement au fur et à mesure que le Soleil convertit l'hydrogène en hélium par réaction de fusion nucléaire. [1]

#### I.2.1 .1 .Caractéristiques principales du soleil :

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)	$2.5.10^{17}$

Tab.I.1 :Caractéristiques principales du soleil [2]

### I.2.1.2. Constitution 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 :[4]

- Une température de  $15.10^8$  °C.
- Une densité est de  $1015 \text{ kg/m}^3$ .
- Une pression de 109 atm.

- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [5] :

- Une épaisseur de 244160 km.
- Une température variant de  $10.10^8$  °C à  $50.10^8$  °C.

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

- Une température comprise entre  $50.10^4$  °C à 6400 °C.
- Une épaisseur de l'ordre 199758 km.

- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [6] :

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

- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [7] :
  - 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>7</sup> °C.

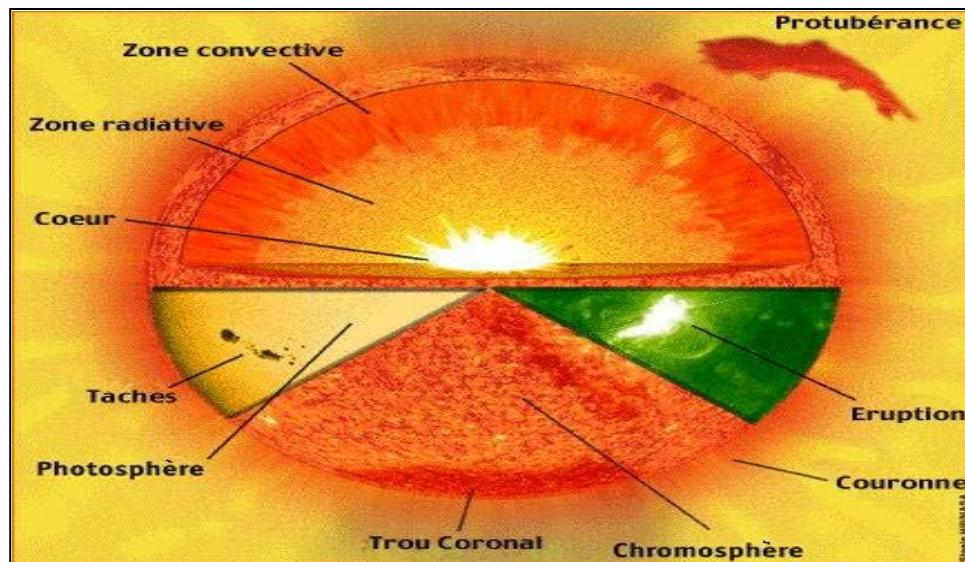


Fig I.1 : Couches externes du Soleil [3]

### I.2. 2 . La Terre

La terre a la forme d'un ellipsoïde de révolution aplati. Sa superficie est de 510101.10 Km<sup>2</sup>, son volume est égale à 1083320.106 Km<sup>3</sup>, sa masse vaut 6.10<sup>21</sup> tonnes et sa densité moyenne est de 5.52.

La terre décrit autour du soleil une ellipse presque circulaire. Cette ellipse est située dans un plan appelé écliptique. L'axe de rotation terrestre fait un angle de 23° 27' ce qu'on appelle déclinaison. L'intersection du plan de l'équateur avec le plan l'écliptique définit la ligne des équinoxes. L'intersection de cette ligne avec l'orbite terrestre, lors de l'équinoxe de printemps définit le point vernal celui-ci est pris comme origine pour le celui des angles définissant la position relative du soleil par rapport à la terre. [2]

#### I.2. 2 .1.Caractéristiques principales de la terre : [2]

Caractéristiques	Valeur
Masse	6.10 <sup>21</sup> t
Volume	1083320.10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup>
Surface	510101.10 <sup>3</sup> km <sup>2</sup>
Diamètre équatorial	12756,32 km
Diamètre polaire	12713,55 km

**Tab.I.2 : Caractéristiques principales de la terre**

#### I.2. 2 .2.L'atmosphère terrestre :

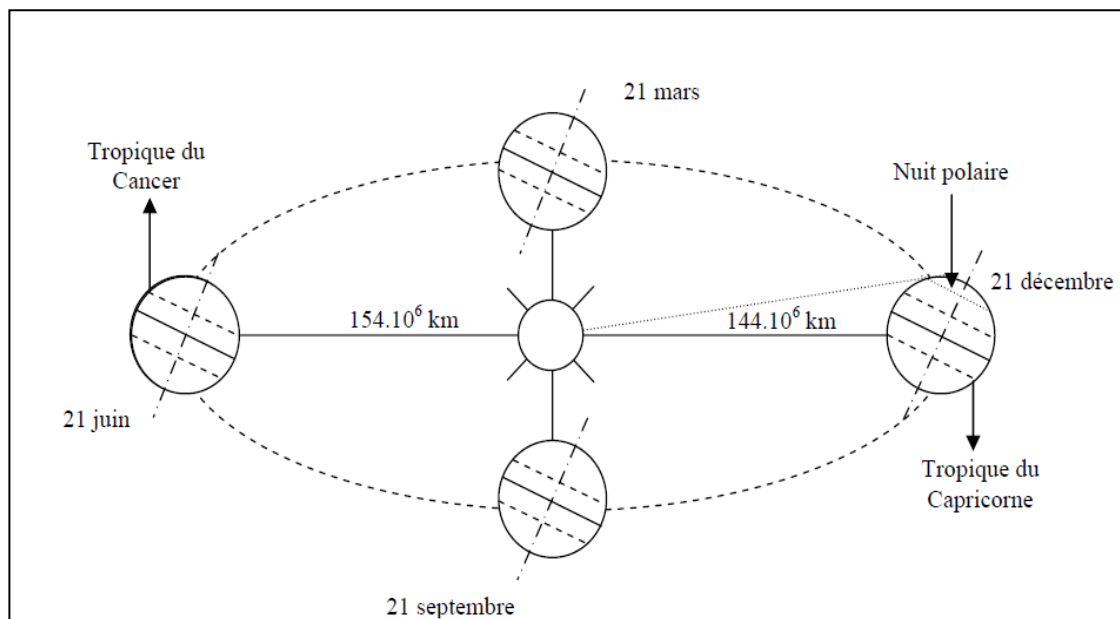
L'atmosphère est constituée de plusieurs couches on distingue notamment [1] :

- La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- La stratosphère, entre 15 et 80 km d'altitude.
- L'ionosphère, entre 80 et 200 km d'altitude

### I.2.3. Mouvement de la terre au tour du soleil [2]

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité de cette ellipse est faible, il en résulte que la distance terre-soleil ne varie que de  $\pm 1.7\%$  par rapport à la distance moyenne qui est de  $149,597.10^6$  km (figure I.1). La position de la terre à l'équinoxe de printemps est appelée point vernal  $\gamma$ . La révolution complète de la terre autour du soleil s'effectue en une année, on distingue :

- **L'année tropique** est l'intervalle de temps qui sépare deux équinoxes de printemps successifs. Elle est de 365j, 5h, 48min, 46s
- **L'année sidérale** est le temps mis par le soleil pour que sa longitude céleste augmente de  $360^\circ$  à partir d'un équinoxe fixe. Elle est de 365j, 6h, 9min, 10s.



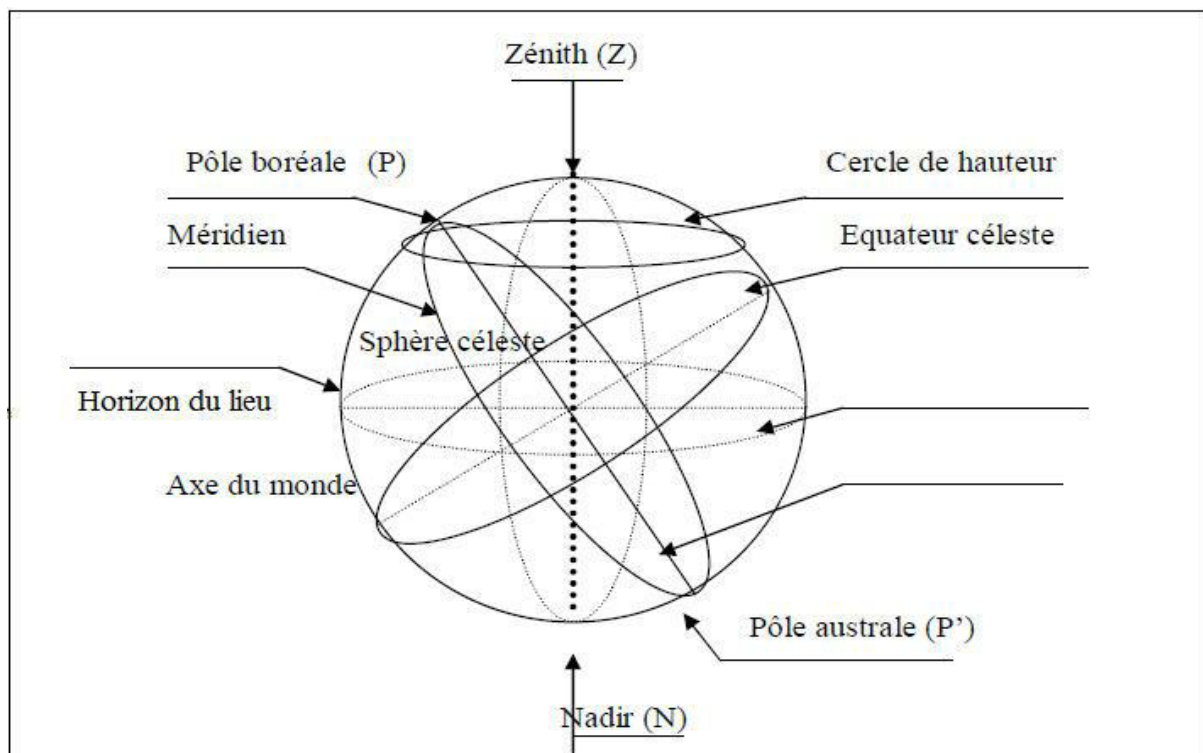
**Fig I.2: Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil**

- **Au solstice d'hiver** (21décembre) : les rayons solaires frappent la terre avec un angle de déclinaison de  $-23^\circ 27'$ , c'est la valeur minimum de la déclinaison.[2]

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

#### I.2. 4. La sphère céleste : [1]

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense, qui admet pour centre la terre, et pour rayon la distance (terre – soleil). On considère que tous les objets visibles dans le ciel se trouvent sur la surface de la sphère céleste. On peut résumer les différentes Caractéristiques sur la sphère elle même comme c'est indiqué sur la figure I.3.



**Fig I.3 : La sphère céleste**

La direction des objets peut être quantifiée de façon précise à l'aide d'un système de coordonnées célestes.

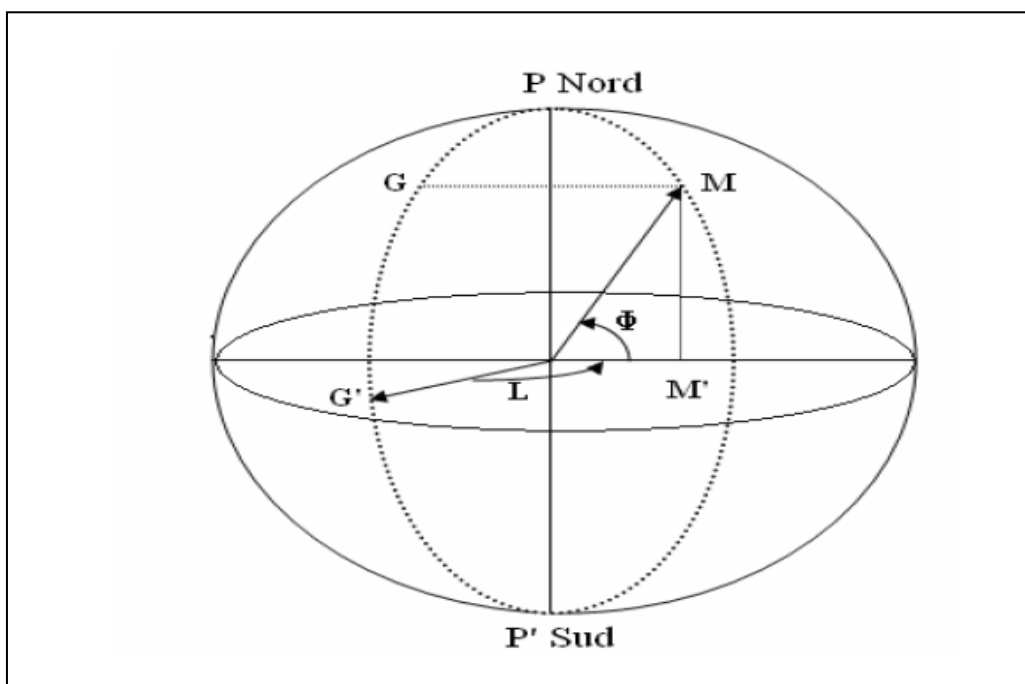
### I.3. Système de coordonnées [1]

#### I.3.1. Coordonnées terrestres :

Sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

**I.3.1.1. Latitude ( $\Phi$ ) :** permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud. [4]

**I.3.1.2. Longitude (L) :** est comptée positivement de (0 à +180°) vers l'Est et négativement de (0 à -180°) vers l'Ouest, à partir du méridien Greenwich. [4]



FigI.4: Coordonnées terrestres [6]

#### I.3.2. Coordonnées horizontales [1]

##### I.3.2. 1. hauteur angulaire (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec le plan horizontal.

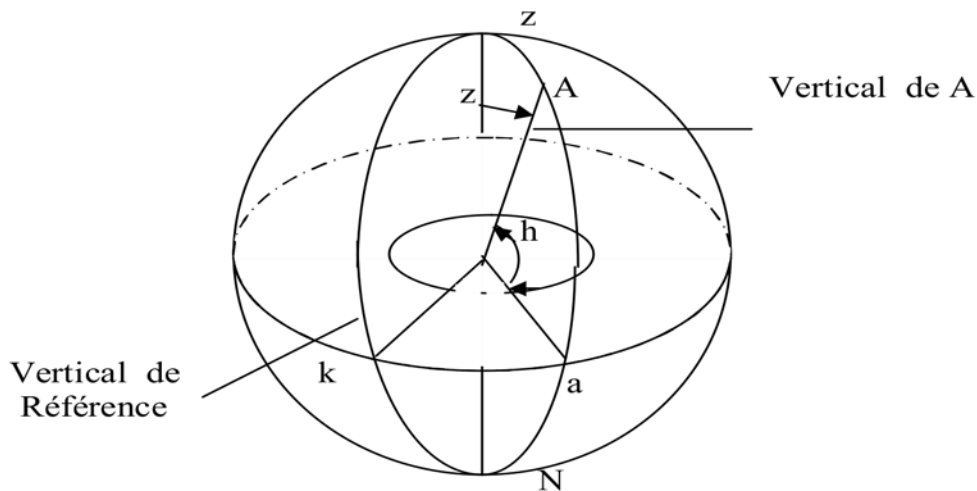
$$\sin h = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos w \quad (I.1)$$

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

$$\theta_z = 90^\circ - h \quad (I.2)$$

### I.3.2. 2. Azimut (a) [1]

Est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud. On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est. La figure I-5 montre les coordonnées horizontales. [6]



FigI.5: Coordonnées horizontales.

### I.3.3. Coordonnées horaires :

#### I.3.1 - L'angle horaire w [3]

Est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe, il est directement lié au temps solaire vrai (*TSV*) par la relation suivante:

$$w = \frac{360}{24} (TSV - 12) \quad (I.9)$$

Notons que :  $w = 0$  au midi solaire vrai

$w < 0$  la matinée

$w > 0$  l'après midi

$w$ : en degré, et  $TSV$  en heures et chaque heure est égale à  $15^0$  de longitude [6-9].

### I.3.2. Angle déclinaison ( $\delta$ ) : [4]

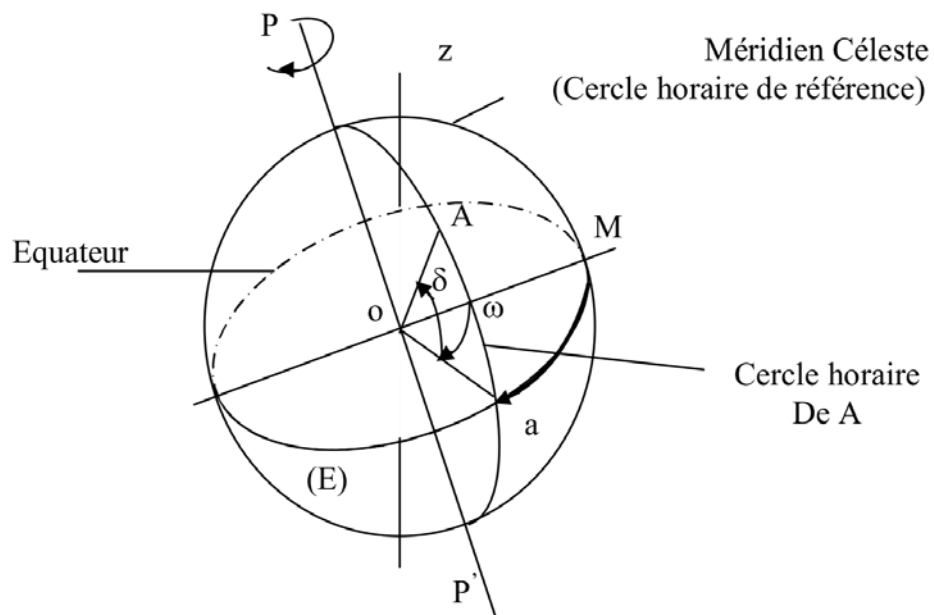
C'est l'angle entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. Elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices, elle varie de  $-23,27^\circ$  au solstice d'hiver à  $+23,27^\circ$  au solstice d'été.

Elle peut être évaluée en première approximation par la relation suivante :

$$\delta = 23,27 \sin [360 / 365(j + 284)] \quad (I.8)$$

$\delta$  est exprimée en degrés.

$j$  est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.



**Fig I.8 Les coordonnées horaires**

#### I.4. Angle d'incidence ( $\theta$ ) : [3]

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

$\theta$  : est donné par la relation suivante :

$$\cos \theta = \sin \delta \cdot \sin L \cdot \cos i - \sin \delta \cdot \cos L \cdot \sin i \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos i \cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin L \cdot \sin i \cdot \cos \gamma \cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin i \cdot \sin \gamma \cdot \sin w \quad (I.3)$$

Avec :

$i$  : inclinaison du capteur.

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

##### Cas particuliers :

- Surface horizontale : ( $i = 0$ ) , ( $\gamma = 0$ ) , ( $\theta = \theta_z$ )

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos w + \sin \delta \cdot \sin L \quad (I.4)$$

Surface orientée vers le sud : ( $\gamma = 0$ )

$$\begin{aligned} \cos \theta &= \sin \delta \cdot \sin L \cdot \cos i - \sin \delta \cdot \cos L \cdot \sin i + \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos i \cdot \cos w + \\ &\cos \delta \cdot \sin L \cdot \sin i \cdot \cos w = \cos(L-i) \cdot \cos \delta \cdot \cos w + \sin(L-i) \cdot \sin \delta \end{aligned} \quad (I.5)$$

- Surface vertical : ( $i = 90^\circ$ )

$$\cos \theta = -\sin \delta \cdot \cos L \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin L \cdot \cos \gamma \cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin w \quad (I.6)$$

#### I.5. Angle de réfraction ( $\theta_r$ ) : [3]

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

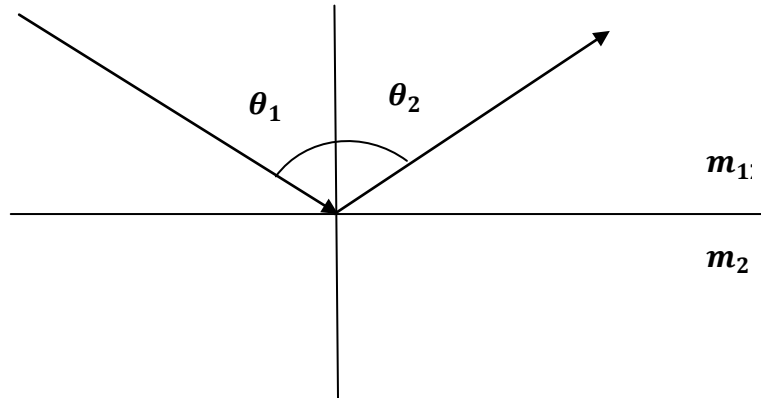
$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{m_1}{m_2} \quad (I.7)$$

Avec :

$\theta_1$  : angle d'incidence du rayonnement

$\theta_2$  : angle de réfraction

$m$  : indice de réfraction ( $m_{air} = 1$  ,  $m_{verre} = 1,5$  )



**Fig I.6: Angle d'incidence et l'angle de réfraction**

## I.6.Paramètres du temps solaire : [8]

### I.6.1. Le temps solaire vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil  $\omega$ . Il est donné sous la forme suivante ;

$$\text{TSV} = 12 + \omega/15 \quad (\text{I.10})$$

$\omega$  en degré.

L'angle horaire  $\omega$  : il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe.

Il est compté positivement dans le sens rétrograde de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  .

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

Si  $\omega < 0$ , la matinée.

Si  $\omega > 0$ , l'après-midi.

### I.6.2.Lever et coucher du soleil :

On s'intéresse ici à deux instants particuliers de la journée, le « lever » et le « coucher » du soleil donné par les équations (I.12) et (I.13) [8]:

$$(\text{TSV})_{\text{lever}} = 12 - \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{I.11})$$

Et

$$(\text{TSV})_{\text{coucher}} = 12 + \frac{\omega_s}{15} \quad (\text{I.12})$$

L'angle solaire au lever ( $-\omega_s$ ) et au coucher ( $\omega_s$ ) est donné par l'équation suivante:  
(sin h = 0 dans la relation (I.10))

$$\cos \omega_s = -\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} L \Rightarrow \omega_s = -\operatorname{arc} \cos(-\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} L) \quad (\text{I.13})$$

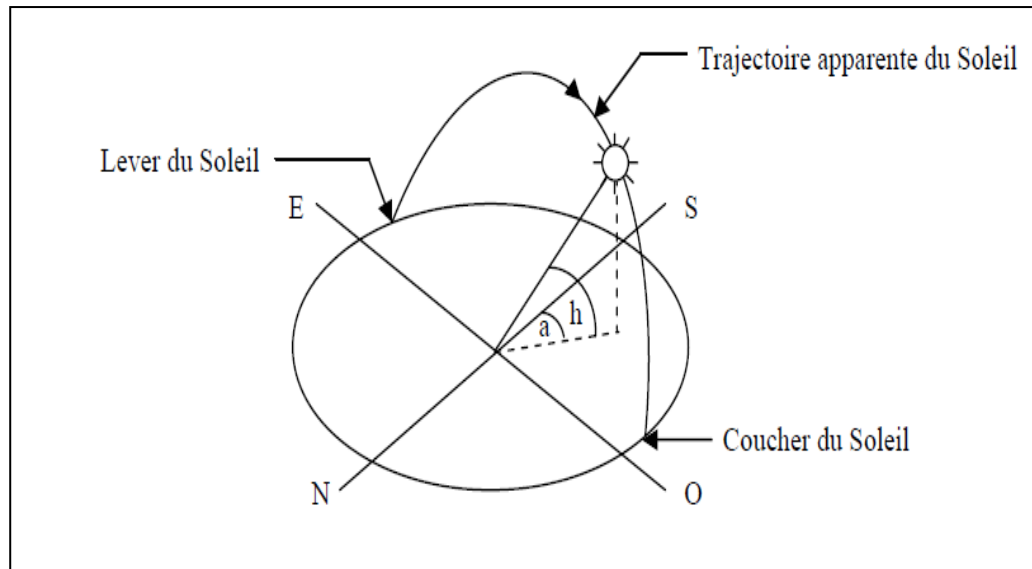


Fig I.9 :Trajectoire du lever au coucher de soleil [8]

### I.6.3. Durée du jour :

La durée du jour (d) est donnée par l'expression suivante [3] :

$$d = \frac{2}{15} \cdot \operatorname{arc} \cdot \cos(-\operatorname{tg} \delta \cdot \operatorname{tg} L) \quad (\text{I.14})$$

### I.6.4. Le temps solaire moyen (T.S.M) [1]

Il est donné par la relation:

$$\text{ET} = \text{TSV} - \text{TSM} \quad (\text{I.15})$$

ET, l'équation du temps, qui corrige le TSV par rapport au TSM

$$\text{Et} = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (\text{I.16})$$

$$N' = (N - 81) \times 360/365 \quad (\text{I.17})$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année

### I.6.5. Le temps universel (TU) [4]

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

$$TU = TSM - L/15 \quad (I.18)$$

Où : L : est la longitude.

L > 0, pour les villes situées à l'Est de Greenwich

L < 0, pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich

TU = TSM, pour le méridien de Greenwich

### I.6.6. Le temps légal (TL) [4]

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

$$TL = TU + \Delta H \quad (I.19)$$

$\Delta H$ : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré

$\Delta H = 1$  heure pour l'Algérie

### I.7 - Rayonnement solaire arrivant au sol : [13]

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altérations et d'atténuation aléatoire en traversant l'atmosphère : réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et diffusion par les aérosols.

à-dire isotrope. L'autre partie, dite directe, est anisotrope. On subdivise le rayonnement solaire parvenant au sol en trois composantes principales qui sont :

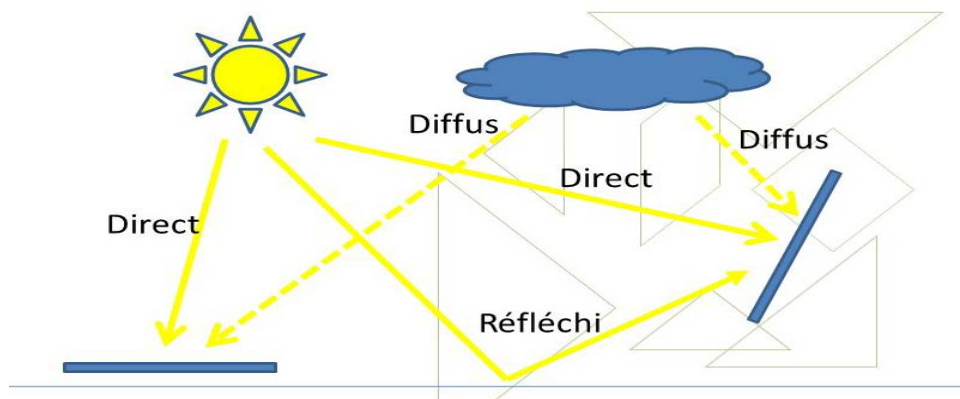


Fig I.10 : rayonnement diffus ,direct et réfléchi

**I.7.1- Rayonnement direct : [3]**

Rayonnement parvenant au sol sous un angle solide limite au seul disque solaire et reçu sur une surface normale à l'axe de cet angle solide [17].

❖ Plan horizontal

$$I = 1300 \exp \left[ \frac{-1}{6 \sin(h+2)} \right] ; \text{ciel très pur} \quad (\text{I.20})$$

$$I = 1200 \exp \left[ \frac{-1}{2.5 \sin(h+2)} \right] ; \text{ciel pollué} \quad (\text{I.21})$$

Avec : h est la hauteur de soleil

❖ Plan incliné

$$S = I \cos(\theta) \quad (\text{I.21})$$

Avec  $\theta$  angle d'incidence

**I.7.2- Rayonnement diffus : [3]**

Rayonnement diffus par les composants de l'atmosphère parvenant de la totalité du ciel à l'exception du disque solaire.

❖ Plan horizontal

$$D = 87(\sin(h))^{0.4} ; \quad \text{ciel très pur} \quad (\text{I.22})$$

$$D = 187(\sin(h))^{0.4} ; \quad \text{ciel pollué} \quad (\text{I.23})$$

❖ Plan incliné

$$D^* = \frac{D}{1 + \sin(\theta)} \left[ \cos^2 \left( \frac{\beta}{2} \right) + \cos(\theta) \right] \quad (\text{I.24})$$

Avec  $\beta$  : inclinaison du plan récepteur

**I.7.3- Rayonnement global : [3]**

Rayonnement parvenant du soleil et de l'atmosphère à partir d'un angle solide  $2\pi$  ouverture reçu sur une surface horizontale.

Le rayonnement global parvenant au sol sur une surface horizontale est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus .

❖ Plan horizontal

$$G = I + D \quad (I.25)$$

Avec :

$G$  : rayonnement global

$I$  : rayonnement direct

$D$  : rayonnement direct

❖ Plan incliné

$$G = S + D^* + R \quad (I.26)$$

$$\text{Où : } R = \frac{1}{2} \bar{\rho} \cdot G_h \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (I.27)$$

Avec :

$R$  : rayonnement diffus du sol

$\bar{\rho}$  : Albédo du sol

$G_h$  : rayonnement solaire global horizontal

$\beta$  : angle d'inclinaison du plan

Le tableau ci-dessous représente quelques valeurs de l'albédo du sol

Nature du sol	Albédo
Sol enneigé	0,70
Sol recouvert de feuilles mortes	0,30
Herbe verte	0,26
Forêt en automne ou champs dorés	0,26
Galets de pierres blanches	0,20
Herbe sèche	0,20
Sol argileux	0,17
Forêt en hiver (arbres conifères sans neige)	0,07
Plan d'eau (soleil haut $h > 30^\circ$ )	0,07

Tab I.3 : Quelques valeurs de l'albédo en fonction de la nature du sol [6]

Avant d'atteindre le sol, le rayonnement solaire est atténué par l'atmosphère terrestre et les nuages. Le rapport entre le rayonnement au sol et le rayonnement extraterrestre est appelé indice de clarté, la moyenne mensuelle de l'indice de clarté  $K_T$  est définie par [19] :

$$K_T = \frac{\bar{H}}{H_0} \quad (\text{I.28})$$

### I.8. 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 [1].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.11:

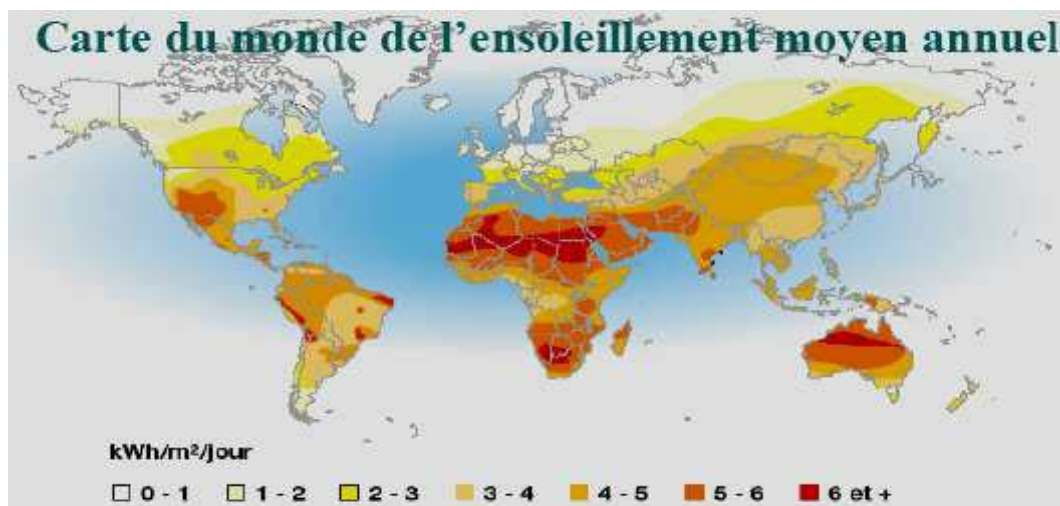


Fig I.11. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [21]

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

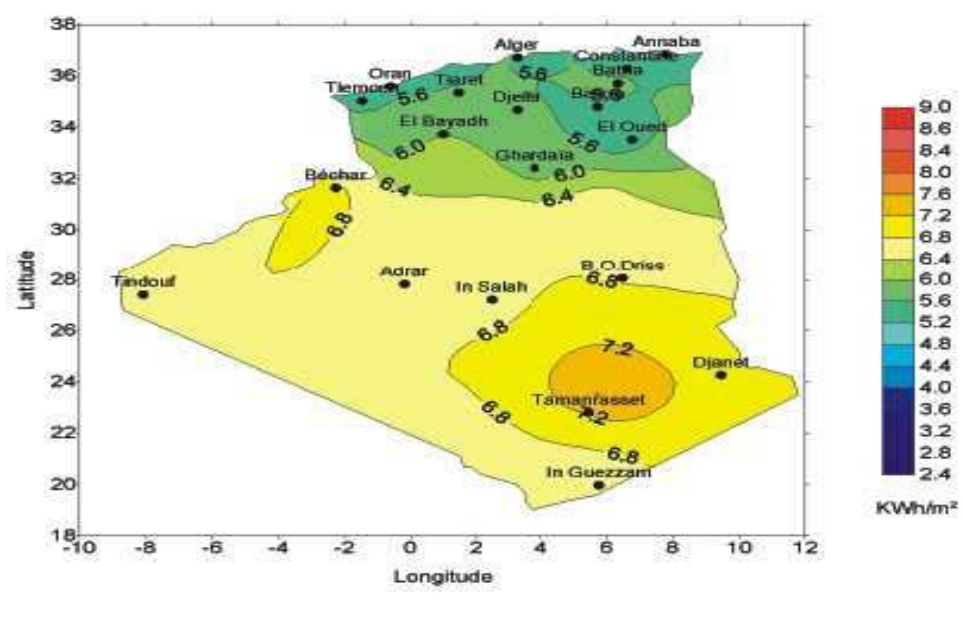
de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.5 selon l'ensoleillement reçu annuellement [1]:

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

**Tab I.4. 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 [1].

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie (figure I.12).



**Fig I.12. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [21]**

## II.1 Introduction

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

La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [13]:

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

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [13].

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].

## II.2 Capteurs solaires

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires : [8].

- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

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

## II.2.1 Capteurs solaires thermiques

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques : [8]

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

### II.2.1.1 Capteurs à circulation de liquide

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

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

- les capteurs plans.
- les capteurs à concentration.

#### a) Capteur plan (ou insolateur) [2]

Il existe trois types de capteurs solaires plans :

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

### a.1) Capteurs plan vitrés

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement d'une. [10]

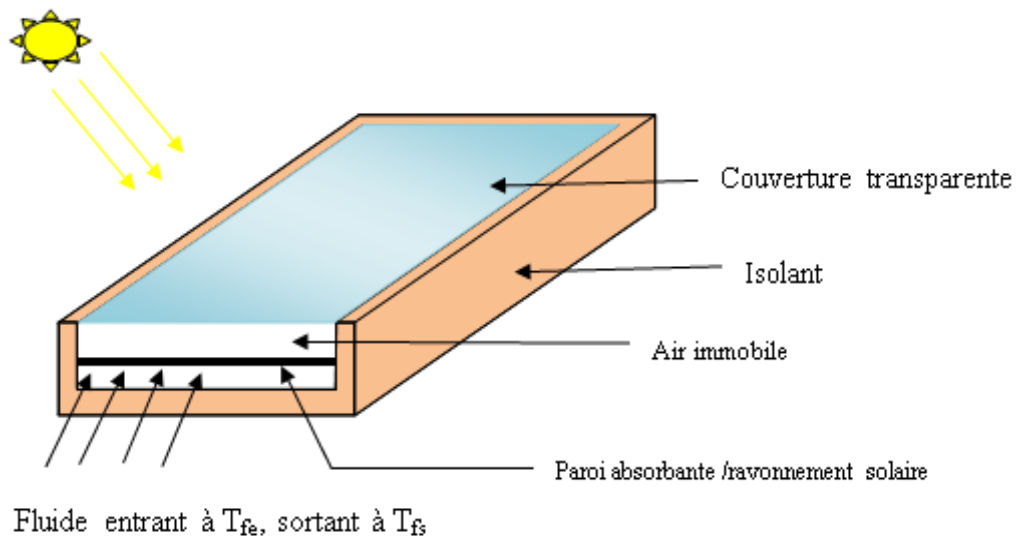
Pour des niveaux de températures de 35° a 90°c, il est nécessaire d'utiliser des capteurs avec vitrage. [7]

L'absorbeur est dans ce cas, métallique (en cuivre ou en aluminium), dans un caisson isolé en face arrière, et vitré en face avant.

La fonction du vitrage est de piéger le rayonnement en créant un effet de serre.

Ce type de capteur est utilisé généralement pour la production d'ECS (eau chaude sanitaire).

Le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré. Figure (II.1).



**Fig II.1: Coupe d'un capteur solaire plan vitré** [site web]

### a.2) Capteurs plans non vitrés

Ce capteur est le plus simple que l'on puisse imaginer, son application usuelle est le chauffage de piscine en plein air, il ne permet pas la production d'ECS sauf dans les pays chauds. Il s'agit d'un seul absorbeur en matière synthétique pour les applications à basse températures en métal revêtu d'une couche sélective, se compose d'un réseau de tubes noirs accolés les uns aux autres.[10]

### a.3) Capteurs plan à haute performance [3]

#### a.3.1) Capteurs plans sélectifs

Chaque par exemple Certains absorbeurs ont un revêtement sélectif dont la propriété est d'émettre qu'une faible portion de l'énergie absorbée (7 à 20%). Pour la plupart des capteurs ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome.

L'absorbeur sélectif améliore le rendement du capteur.

Cette particularité est d'autant plus intéressante pour des climats froids et pour des applications nécessitant des températures importantes (eau).figure(II.2)

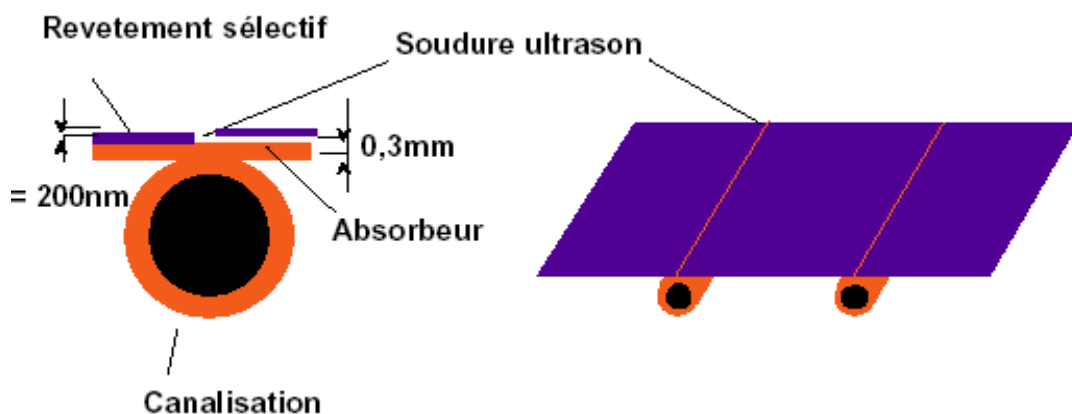


Fig II.2: Absorbeur et revêtement sélectif

### a.3.2) Capteurs plans sous vide [3]

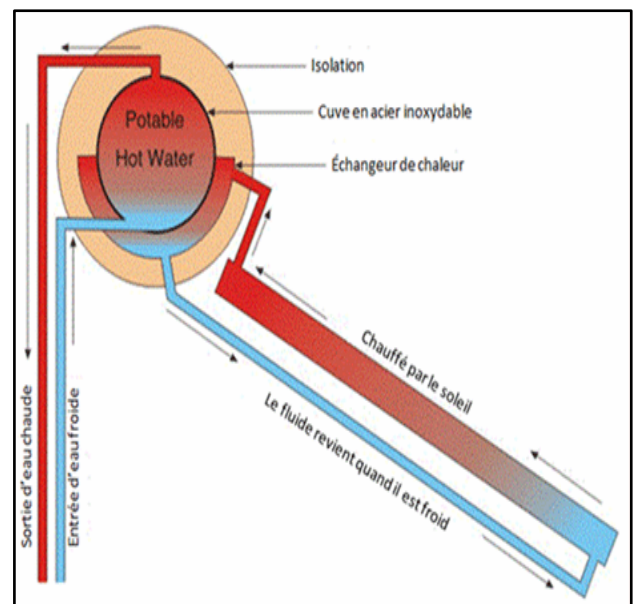
Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif.

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

Ces capteurs conviennent bien à la production d'EC (eau chaude) en montagne ou dans les pays du nord compte tenu de leur bon rendement pour des températures extérieures basses. Voir Figure (II.3). [7]

On distingue trois types de tubes sous vides :

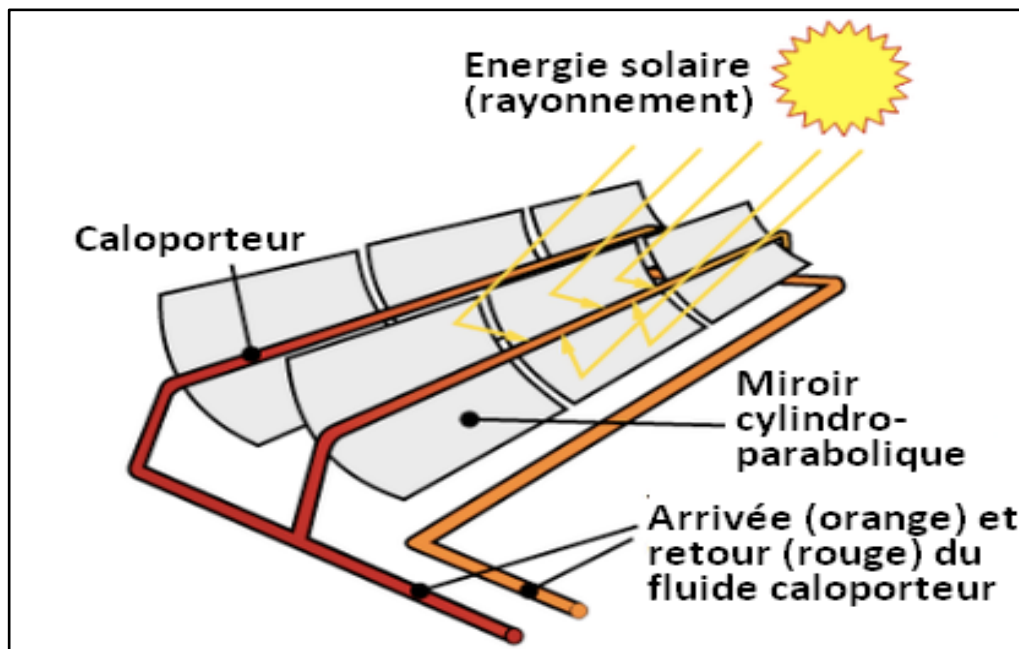
- Tubes sous vides à flux direct.
- Tubes sous vides à caladuc.
- Tubes sous vides type « Sydney ».



**Fig II.3 : Capteur sous vide [20]**

**b) Capteurs à concentration****b.1) Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques[15]**

Les capteurs à concentration fonctionnent avec un système de poursuite du soleil. Selon que la concentration se fait sur un point (suivi du soleil selon deux axes) ou sur une ligne (suivi du soleil selon un axe), les températures atteintes sont plus ou moins élevées. Les capteurs à concentration cylindro-paraboliques concentrent la lumière sur un absorbeur linéaire, avec un système de poursuite du soleil selon une seule direction. De ce fait, le facteur de concentration n'est pas très élevé, ainsi que les températures atteintes. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 200 à 400 °C, pour des puissances de plusieurs centaines de kW.



**Fig II.4 : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique. [15]**

### b.2) Les capteurs à concentration du type dishes [15]

Les capteurs à concentration du type « dishes » concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, avec un système de poursuite du soleil selon deux directions. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs dizaines de kW.

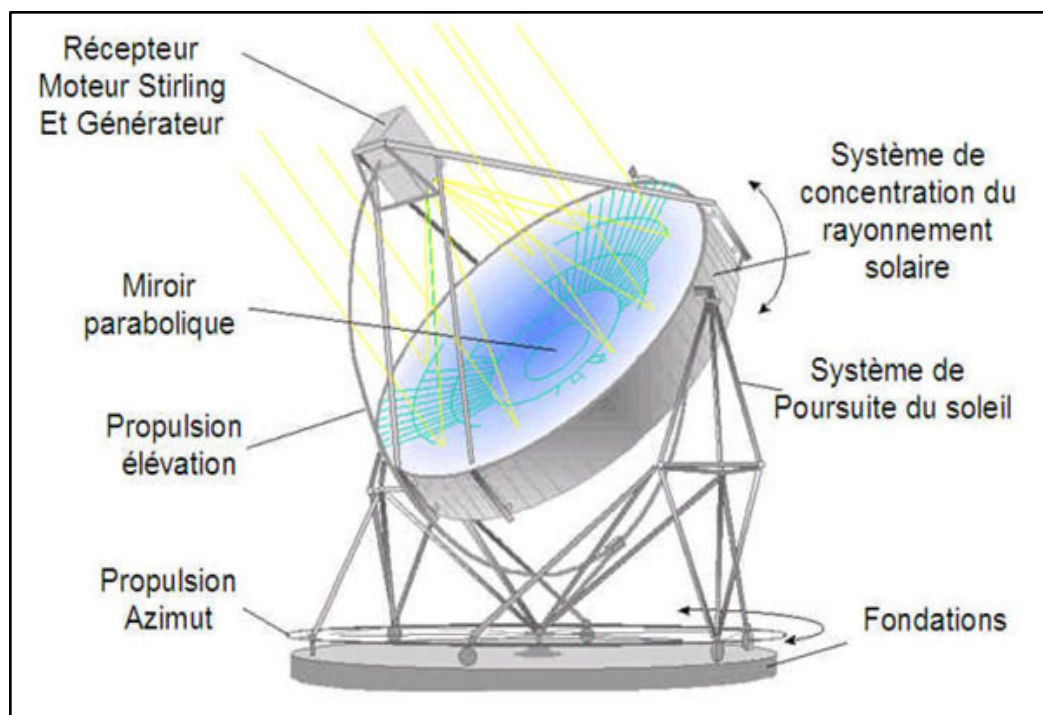


Fig II.5 : Schéma d'un capteur à concentration type dishes.

### b.3) Les centrales à tour

Les installations de ce type concentrent la lumière sur un absorbeur ponctuel, à l'aide de miroirs (appelé "héliostats") qui suivent le soleil selon deux directions, sur une chaudière située au sommet d'une tour. De ce fait, le facteur de concentration est plus important, ainsi que les températures atteintes. Compte tenu du grand nombre de miroirs, les puissances peuvent atteindre plusieurs MW. Une telle centrale (Thémis) a été expérimentée dans les années 80, et devrait reprendre du service prochainement.

Ces systèmes permettent d'atteindre des températures de 400 à 800 °C, pour des puissances de plusieurs MW. [15]

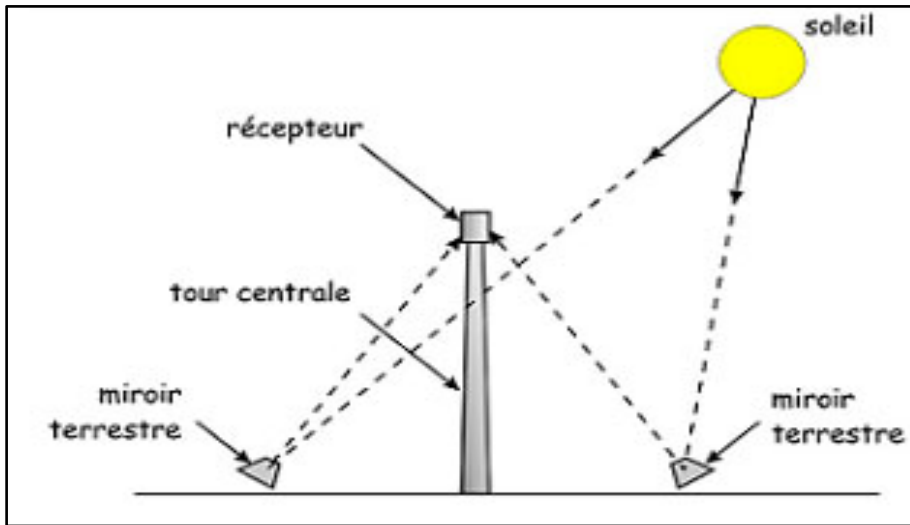


Fig II.6 : Centrale solaire à tour [20]

### II.2.1.2 Capteurs à air [3]

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur.

Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide.

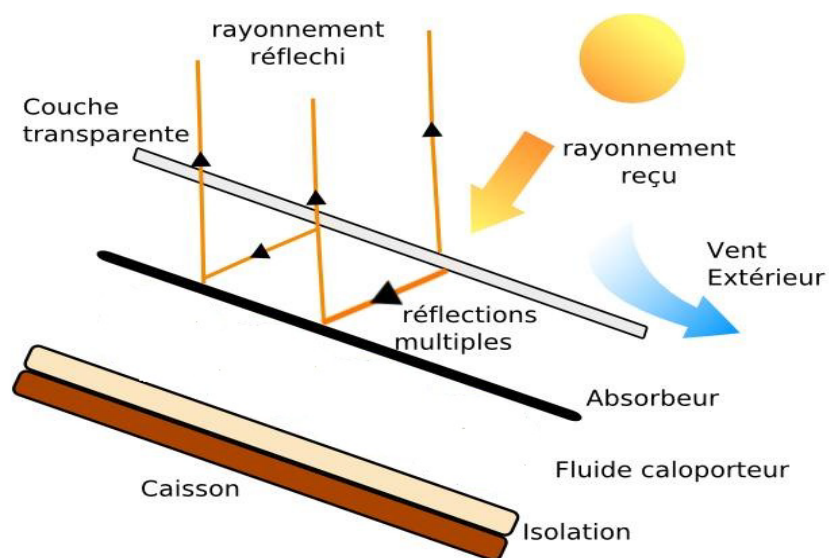


Fig II.7 : Schéma d'un capteur à air

## II.3 Les composants des capteurs plans [3]

### II.3.1. L'absorbeur

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [8].

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 [3]:

- 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.

Dans le cas des métaux on utilise le cuivre, l'acier inoxydable, ou bien l'aluminium, qui ont de bonnes conductibilités thermiques.

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

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 [3].

<b>Matière</b>	<b>Conductivité (w/m °C)</b>	<b>Coefficient de dilatation</b>
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

**Tab II.1 :conductivité thermique de différents matériaux d'absorbeur [3]**

### **II.3.2. La couche sélective de l'absorbeur**

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 I.R ( $\epsilon < 0.15$ ,  $\alpha > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir . [3]

<b>Revêtements sélectifs</b>	<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>\varepsilon</math></b>
Chrome noir	0.93	0.10
Nickel de nickel poli	0.92	0.11
Nickel noir sur le fer galvanisé	0.89	0.12
CuO sur Ir nickel	0.81	0.17
Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> sur l'argent	0.90	0.27
CuO sur l'aluminium	0.93	0.11
CuO sur l'aluminium anodisé	0.85	0.11

**Tab II.2 : propriétés de quelques revêtements sélectifs [3]**

### II.3.3 La couverture transparente (vitre) [17]

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

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre simple ou traité qui laisse passer jusqu'à 95% de la lumière grâce à leur faible teneur en oxyde de fer, mais on peut trouver aussi des produits de synthèse. L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C [13], 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 .

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

Actuellement les trois matières plastiques utilisées comme couvertures sont :

- le polyméthacrylate (PMMA) : est un thermoplastique transparent parfois appelé verre acrylique, chimiquement, c'est le polymère synthétique de méthacrylate de méthyle.
- le polycarbonate (PC), [17]
- le polyester renforcé aux fibres de verre (PRV) : Le PRV est un matériau composite thermodurcissable, principalement constitué de résine de polyester insaturé, renforcé des fibres de verre et chargé en agrégats. La résine polyester joue le rôle de liant entre les différents composants.

Ces trois matériaux sont connus et employés dans certaines applications, dans le bâtiment depuis déjà de nombreuses années.[3]

Matière	Réflexion	Epaisseur	Transmittance	Transmittance	Cp	$\rho$
Verre	1.518	3.175	0.840	0.7020	0.754	2489
Fibre de verre	1.540	6.350	0.870	0.076	1.465	1399
Fibre	1.490	3.175	0.900	0.020	1.465	1189
Polycarbonat	1.586	3.175	0.840	0.020	1.193	1199
Polytétraflour	1.343	5.080	0.960	0.0256	1.172	2480
-						
Fluorure de polyvinylidé	1.460	1.016	0.920	0.07	1.256	1379
Polyester	1.460	1.270	0.870	0.178	1.046	1394
Fluorure de	1.413	1.016	0.930	0.230	1.256	1770
Polyéthylène	1.500	1.016	0.920	0.810	2.302	1189

**Tab II.3 regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes. [3]**

### II.3.4. L'isolation thermique [16]

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** [16]

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

- **Parties arrière et latérale** [15]

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

<b>Matériau</b>	<b>Conductivité thermique (w/m.k)</b>	<b>Masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Chaleur massique (j/kg.k)</b>	<b>Diffusivité (10<sup>-7</sup>m<sup>2</sup>/s)</b>
Air (à 20° c)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène	0.040	20	1500	13.3
Papier journal				
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

**Tab II.4 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants** [3].

### **II.3.5. Le cadre [15]**

Le cadre 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.

### **II.3.6. Le fluide caloporteur [15]**

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).

## **II.4. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire**

Un capteur solaire plan destiné au chauffage des habitations ou à la production d'eau chaude est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident, et émet en s'échauffant un rayonnement thermique de plus grande longueur d'onde (Loi de Stefan-Boltzman). [13]

Si cet absorbeur est en contact direct avec l'air environnant, en plus des pertes par rayonnement, les pertes par convection peuvent être importantes. Il s'établit alors un équilibre thermique entre l'absorbeur et le milieu ambiant. On capte ainsi peu d'énergie.

Pour réduire les pertes par la face arrière du capteur, l'absorbeur est placé à l'intérieur d'un coffre dont les parois internes sont recouvertes d'un isolant thermique (laine de verre ou mousse synthétique, par exemple).

L'isolation thermique de la face avant est réalisée en interposant entre l'absorbeur et l'air, un matériau opaque au rayonnement thermique, mais transparent au rayonnement solaire. Les verres et certains matériaux synthétiques sont transparents pour le rayonnement solaire, et opaque pour le rayonnement infrarouge lointain. Ils sont donc utilisés en tant que couvertures transparentes des capteurs solaires. [3]

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement thermique émis par l'absorbeur est absorbé par la couverture transparente qui s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est réémise vers l'absorbeur qui est à l'origine de l'effet de serre.

Un boîtier contenant le tout, calorifugé de manière à réduire les pertes vers l'arrière et les côtés.

## II.5. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

Elles peuvent être classé en deux catégories : paramètres externes et paramètres internes :

### II.5.1. Les paramètres externes [7-19]

- 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.

### II.5.2. Les paramètres internes [17-18]

- 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.

## II.6. Paramètres de fonctionnements :

les paramètres de fonctionnement sont représentés par:

- la température d'entrée du fluide dans le capteur.
- les températures des différentes parties du capteur
- le débit du fluide caloporteur.

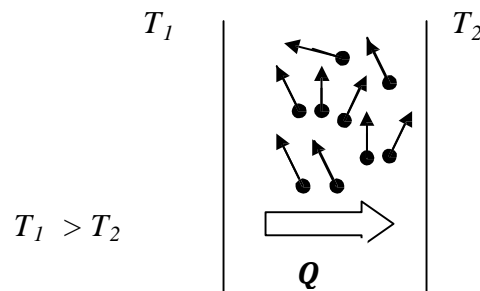
Ces caractéristiques sont très importantes car elles permettent, en tenant compte du coût, d'effectuer un choix parmi les différents types de capteur, dont entre autres : la température de sortie du fluide et la puissance thermique utile du capteur

Dans ce chapitre, nous présentons un certain nombre de définitions et théories relatives aux différents modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement).

### III.1-Transfert par Conduction: [2]

C'est un mode de transfert de chaleur au sein d'un milieu solide, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts :

- une transmission par les vibrations des atomes ou molécules ;
- une transmission par les électrons libres.



**Fig.III.1- Schéma du transfert de chaleur par conduction**

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier [3]

#### III.1.1- Loi de Fourier :

Il existe une relation linéaire entre la densité de flux thermique et le gradient de température. En tout point d'un milieu isotrope, la densité de flux thermique instantanée est proportionnelle à la conductivité thermique  $\lambda$  du milieu et au gradient de température [2].

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

Ou sous la forme suivante :

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

Avec :

$Q_{cd}$  : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

$\lambda$  : Conductivité thermique du milieu ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$x$  : Variable d'espace dans la direction du flux (m)

$S$  : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $\text{m}^2$ )

On trouvera dans le tableau ci-après les valeurs de la conductivité thermique  $\lambda$  de certains matériaux parmi les plus courants :

Matériau	$\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ )	Matériau	$\lambda$ ( $\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$ )
Argent	419	Plâtre	0.48
Cuivre	386	Amiante	0.16
Aluminium	204	Coton	0.059
Acier doux	45	Liège	0.044-0.049
Acier inox	14.9	Laine de roche	0.038-0.041
Glace	1.88	Laine de verre	0.035-0.051
Béton	1.4	Polystyrène expansé	0.036-0.047
Bois	0.12-0.23	Polyuréthane (mousse)	0.030-0.045
Brique terre cuite	1.1	Polystyrène extrudé	0.027
Verre	0.78	Air	0.026

**Tab III.1 : Conductivité thermique  $\lambda$  de certains matériaux. [3]**

Pour un milieu isotrope, la conductivité thermique  $\lambda$  est un grandeur scalaire positive, caractéristique du milieu, fonction en général de  $T$ . pour un milieu isotrope et homogène  $\lambda$  ne dépend pas de  $T$ . dans de nombreux cas pratiques, lorsque les écarts de température ne sont

pas trop élevés, on peut considérer, avec une précision suffisante,  $\lambda$  comme une constante pour un milieu donné

### III.1.2- Résistance thermique :

Considérant l'intersection d'un tube de courant par deux surfaces isothermes de températures  $T_1$  et  $T_2$ , on définit la résistance thermique par la relation [2] :

$$T_1 - T_2 = R Q \quad (\text{III.3})$$

On reconnaît dans cette équation la forme générale de la loi d'Ohm [2]:

$$E_1 - E_2 = R.I \quad (\text{III.4})$$

Dans laquelle les potentiels  $E$  sont remplacés par les températures et l'intensité  $I$  par le flux  $Q$

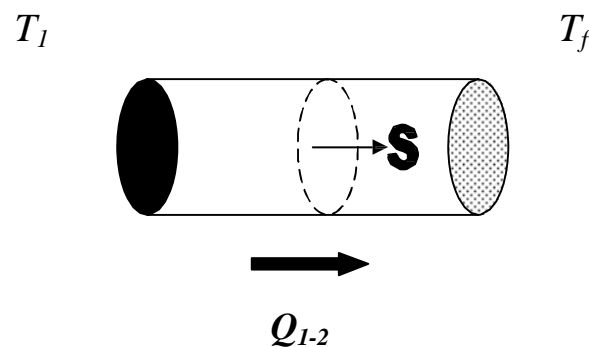


Fig III.2- Résistance thermique

### III.1.3- Equation générale de la chaleur : [9]

Cette équation qui exprime la conservation d'énergie d'un élément infinitésimal de matière s'écrit :

$$\overrightarrow{\text{div}} (\lambda . \text{grad } T) + P = \rho . C_p . (\partial T / \partial t) \quad (\text{III.5})$$

Où

$P$  : représente la production de chaleur en ( $\text{W}/\text{m}^3$ )

$C_p$ : chaleur massique en ( $\text{J}/\text{Kg}.\text{K}$ ),

$\rho$  : masse volumique en ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ )

### III.2- Transfert par Convection :

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide [8]. Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de Newton:

$$Q_{cv} = h .s.(T_p - T_{\infty}) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$Q$ : Flux de chaleur transmis par convection (w)

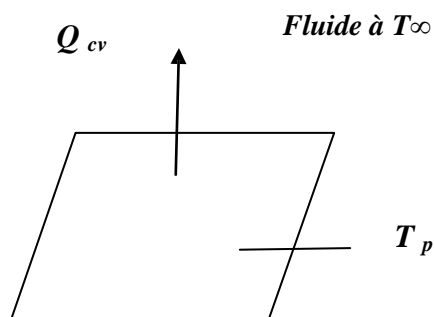
$h$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection ( $\text{W m}^{-2} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ )

$T_p$  : Température de surface du solide ( $^\circ\text{C}$ )

$T_{\infty}$  : Température du fluide loin de la surface du solide ( $^\circ\text{C}$ )

$S$  : Aire de la surface de contact solide/fluide ( $\text{m}^2$ )

La valeur du coefficient de transfert de chaleur par convection  $h$  est en fonction de la nature du fluide, de sa température, de sa vitesse et des caractéristiques géométriques de la surface de contact solide/fluide



**Fig.III.3- Schéma du transfert de chaleur par convection**

Selon la nature des mécanismes engendrant des fluides, on distingue trois types de transfert par convection :

### III.2.1- Convection forcée :

Le mouvement du fluide est provoqué par une intervention mécanique indépendante de toute hétérogénéité dans la répartition des températures au sein du fluide. Il dépend des 6 grandeurs suivantes :

$U_m$  : vitesse moyenne du fluide

$\rho$  : masse volumique du fluide

$C_p$  : chaleur spécifique du fluide (J/kg.k).

$\mu$  : viscosité thermique du fluide

$\lambda$  : conductivité thermique du fluide ( $Wm^{-1} \text{ } ^\circ C^{-1}$ )

$D$  : dimension caractéristique de la surface d'échange

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

Nombre de Nusselt:

$$N_u = h_c \frac{D}{\lambda} \quad (\text{III.7})$$

Nombre de Reynolds:

$$R_e = \frac{\rho \cdot U_m \cdot D}{\mu} \quad (\text{III.8})$$

Nombre de Prandtl:

$$P_r = \frac{\mu \cdot C_p}{\rho} \quad (\text{III.9})$$

Dans le cas des gaz,  $P_r$  est sensiblement constant avec la pression et la température et ne varie qu'avec les changements thermiques de  $C_p(T)$ .

Quelques exemples du nombre de Prandtl à 100°C pour des gaz courants

Gaz	Pr
H <sub>2</sub>	0.69
Air	0.69
Ar	0.66
CO <sub>2</sub>	0.75
CO	0.72
He	0.71
N <sub>2</sub>	0.70
O <sub>2</sub>	0.70
H <sub>2</sub> O (vapeur)	1.06

Tab III.2 : Prandtl de quelques gaz [2]

Dans le cas des liquides, le nombre de Prandtl est beaucoup plus variable :

Liquide	T (°C)	Pr
Eau	0	13.6
	20	7.03
	100	1.75
Alcool éthylique	0	21.8
	30	13.9
	60	12.1
Glycol	20	203
	100	25
Glycérine	0	100'000
	30	5'200

Tabl III.3 : Prandtl de quelques liquides [2]

Pour les métaux liquides, au contraire, **Pr** est très petit, de l'ordre de 0.01.

Nombre de Grashof:

$$G_r = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{\mu^2} \quad (\text{III.10})$$

Nombre de Rayleigh:

$$R_a = P_r \cdot G_r \cdot \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot (T - T_f)}{a \cdot \nu} \quad (\text{III.11})$$

Où il caractérise l'écoulement en convection naturelle.

Avec :

$\beta$  : coefficient de dilatation du fluide ( $\text{K}^{-1}$ )

$L$  : dimension caractéristique de la surface d'échange (m)

$g$  : accélération de la pesanteur ( $\text{m/s}^2$ )

$\mu$  : viscosité dynamique du fluide ( $\text{kg/m.s}$ )

$\nu$  : viscosité cinématique ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\rho$  : masse volumique en ( $\text{kg/m}^3$ )

$a$  : Diffusivité thermique en ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation

donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques  $Nu=f(Re,Pr)$

qui permettent de calculer  $h_c$  par :

$$h_c = Nu \cdot \frac{D}{\lambda} \quad (\text{III.12})$$

Avec :

$Re$  : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide

$Pr$  : le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

$Nu$  : le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

### III.2.2 convection naturelle : [4]

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

La convection forcée est

négligeable si  $Gr/Pr^2 > 100$

$$Nu = C (Gr Pr)^n \quad (III.13)$$

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

Convection turbulente  $Gr Pr > 109 \Rightarrow n=1/3$

### III.2.3- Convection mixte :

Dans ce cas, les deux mécanismes sont superposent

### III.3 - Transfert par rayonnement : [10]

Contrairement aux deux autres modes d'échange qui sont la conduction et la convection, le rayonnement ne nécessite pas l'existence d'un support matériel. Il se propage dans l'espace, comme dans tout type de milieu. Si ce milieu est homogène, il se propage en ligne droite.

Le rayonnement c'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans l'espace).

#### III.3.1- L'émittance (totale) [6]

C'est le flux total émis par unité de surface de la source. On considère globalement la puissance  $dQ$  émise par un élément de surface  $dS$  dans l'ensemble des directions où il peut rayonner (hémisphère limite par le plan tangent à  $dS$  en son centre), et on divise ce flux par l'aire de  $dS$ . L'émittance est notée par  $M$ . Son unité est le  $W/m^2$  :

$$M = dQ/dS \quad (III.14)$$

### III.3.2 - Le corps noir [1]

C'est un corps idéal vis-à-vis du rayonnement qui, par définition, absorbe tout le rayonnement qu'il reçoit quelque soit la fréquence et la direction. A l'équilibre thermique, il émet autant de rayonnement qu'il en absorbe de sorte qu'un corps noir rayonne le maximum d'énergie de façon uniforme dans toutes les directions

#### III.3.2.1 Loi du rayonnement thermique[11]

##### III.3.2.1.1 Loi de Planck :

*L'émittance monochromatique du corps noir :*

L'émittance monochromatique d'un corps noir  $M_{\lambda, T}^{\bullet}$  à la longueur d'onde  $\lambda$  et la température  $T$ , est donnée par la loi de Planck [11]:

$$M_{\lambda, T}^{\bullet} = \frac{C_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1} \quad (\text{III.15})$$

Où  $M_{\lambda, T}^{\bullet}$  est le flux énergétique émis par la surface dans tout l'hémisphère et ramène à l'unité de longueur d'onde  $\lambda$ , la surface étant à la température  $T$ .  $M_{\lambda, T}^{\bullet}$  est exprimé en  $W/m^3$

ou, dans le cas où  $\lambda$  est exprimé en microns ( $\mu m$ ),  $M_{\lambda, T}^{\bullet}$  sera en  $W/(m^2 \cdot \mu m)$ .

Les constantes  $c_1, c_2$  sont égales à :

$$c_1 = 3,74 \cdot 10^8 \text{ W} \cdot \mu m^4 / m^2$$

$$c_2 = 1,44 \cdot 10^4 \text{ } \mu m \cdot K$$

##### III.3.2.1.2 Loi de Stefan Boltzmann

Cette loi fournit l'émittance totale du rayonnement du corps noir dans l'espace en fonction de sa température absolue (sur tout le spectre de longueur d'onde). Elle s'écrit :

$$M^{\bullet} = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{III.16})$$

Avec  $\sigma$  : est la constante de Stefan Boltz mann

$$\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ (w/(m}^2\text{°k}^4\text{)) [4].}$$

### III 3.3. Transfert par rayonnement entre surface :

C'est un transfert d'énergie électromagnétique entre deux surfaces (même dans le vide). Dans les problèmes de conduction, on prend en compte le rayonnement entre un solide et le milieu environnant et dans ce cas nous avons la relation :

$$Q = \sigma \cdot \epsilon_p \cdot s \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (W) \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$Q$ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

$\sigma$ : Constante de Stephan ( $5,67.10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>)

$\epsilon_p$  : Facteur d'émission de la surface

$T_p$  : Température de la surface (K)

$T_\infty$  : Température du milieu environnant la surface (K)

$S$  : Aire de la surface (m<sup>2</sup>)

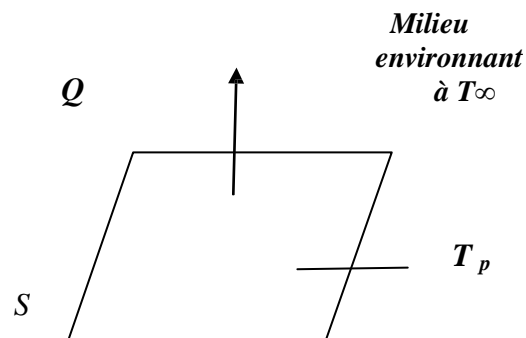
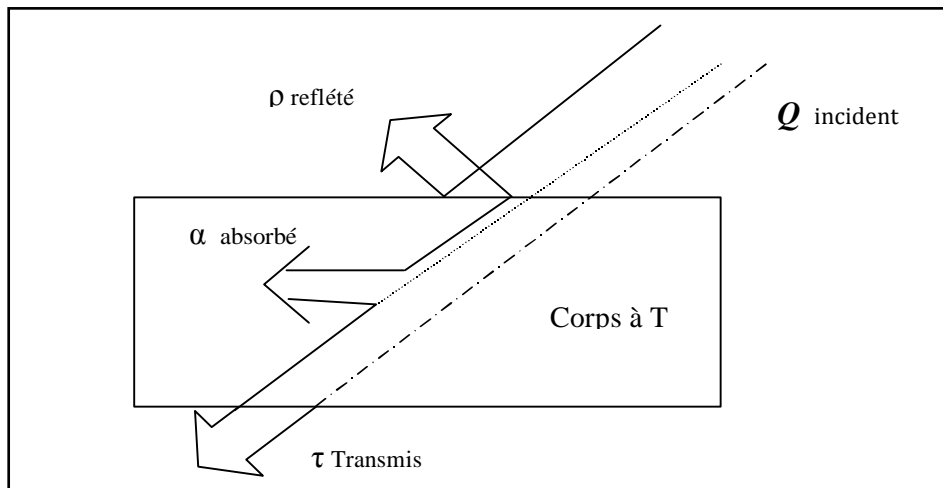


Fig III.4 : Schéma représente le principe du rayonnement

### III.3.4. Réception du rayonnement par un solide

Quand un rayon d'énergie incident  $Q_i$  frappe un corps à la température  $T$ , une partie  $Q_r$  de l'énergie incidente est reflétée par la surface  $S$ , une autre partie  $Q_a$  est absorbée par le corps qui s'échauffe et le reste  $Q_t$  est transmis et continue son chemin [6]



**Fig III.5 Réception du rayonnement**

On caractérise le comportement de chaque corps vis-à-vis du rayonnement par trois coefficients: [3]

- La réflexivité ( $\rho$ )

$$\rho = \frac{\text{énergie réfléchie}}{\text{énergie incidente}}$$

- L'absorptivité ( $\alpha$ )

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}}$$

- La transmissivité ( $\tau$ )

$$\tau = \frac{\text{énergie transmise}}{\text{énergie incidente}}$$

On pourra remarquer que pour tous les corps :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (\text{III.18})$$

**Cas particuliers :**

$\alpha = 1$  miroir parfait

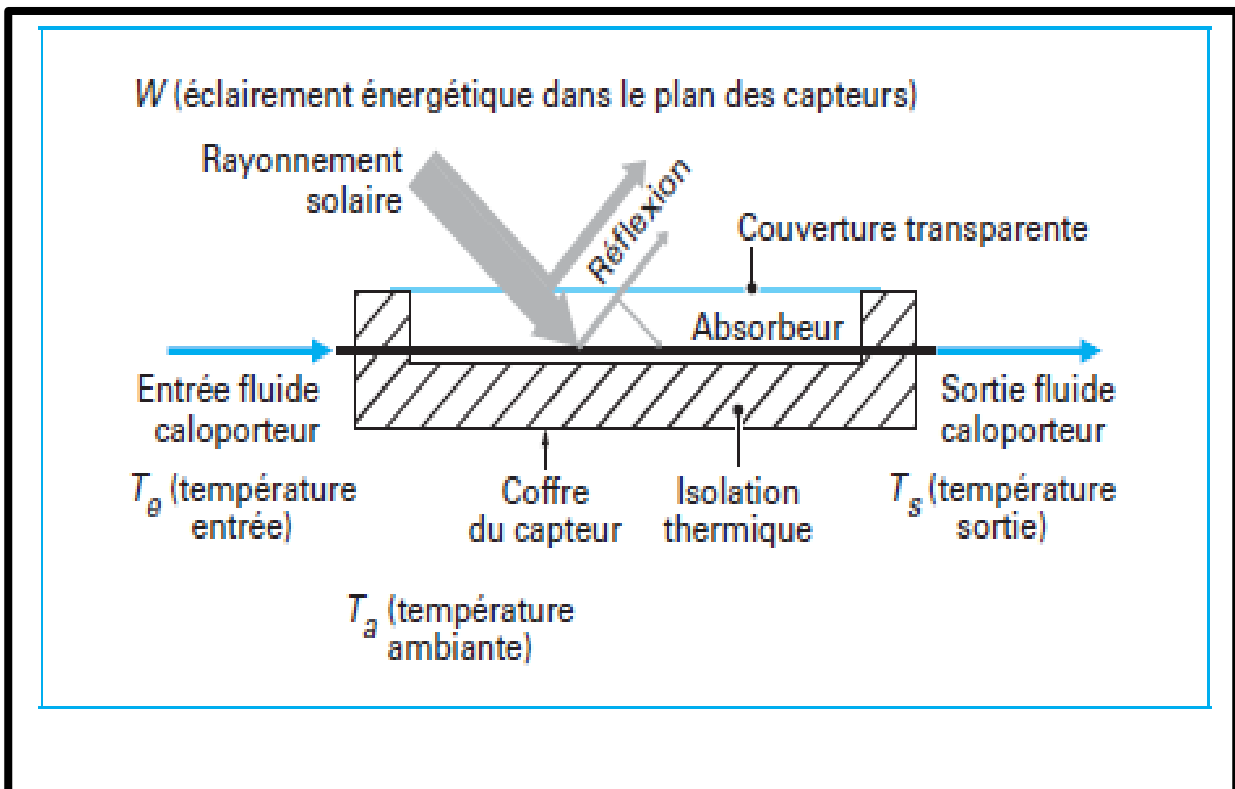
$\rho = 1$  transparent parfait

$\tau = 1$  corps noir parfait

**IV. 1.Introduction : [13]**

Ce chapitre est consacré à l'étude numérique du capteur. Nous présenterons les différents paramètres de fonctionnement, les puissances absorbées par le capteur ainsi qu'un état de l'art du capteur. Nous établirons les bilans thermiques, global et au niveau de chaque partie en régime transitoire, le système d'équations obtenu sera résolu par les approches numériques.

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (air). Le schéma de principe d'un capteur solaire plan à air est représenté sur la figure ci-dessous :



**Fig IV.1** Schéma de principe d'un capteur solaire plan à air [3]

IV.2. Description du modèle : [12]

Notre choix s'est porté sur l'insolateur à air schématisé sur la figure IV.2

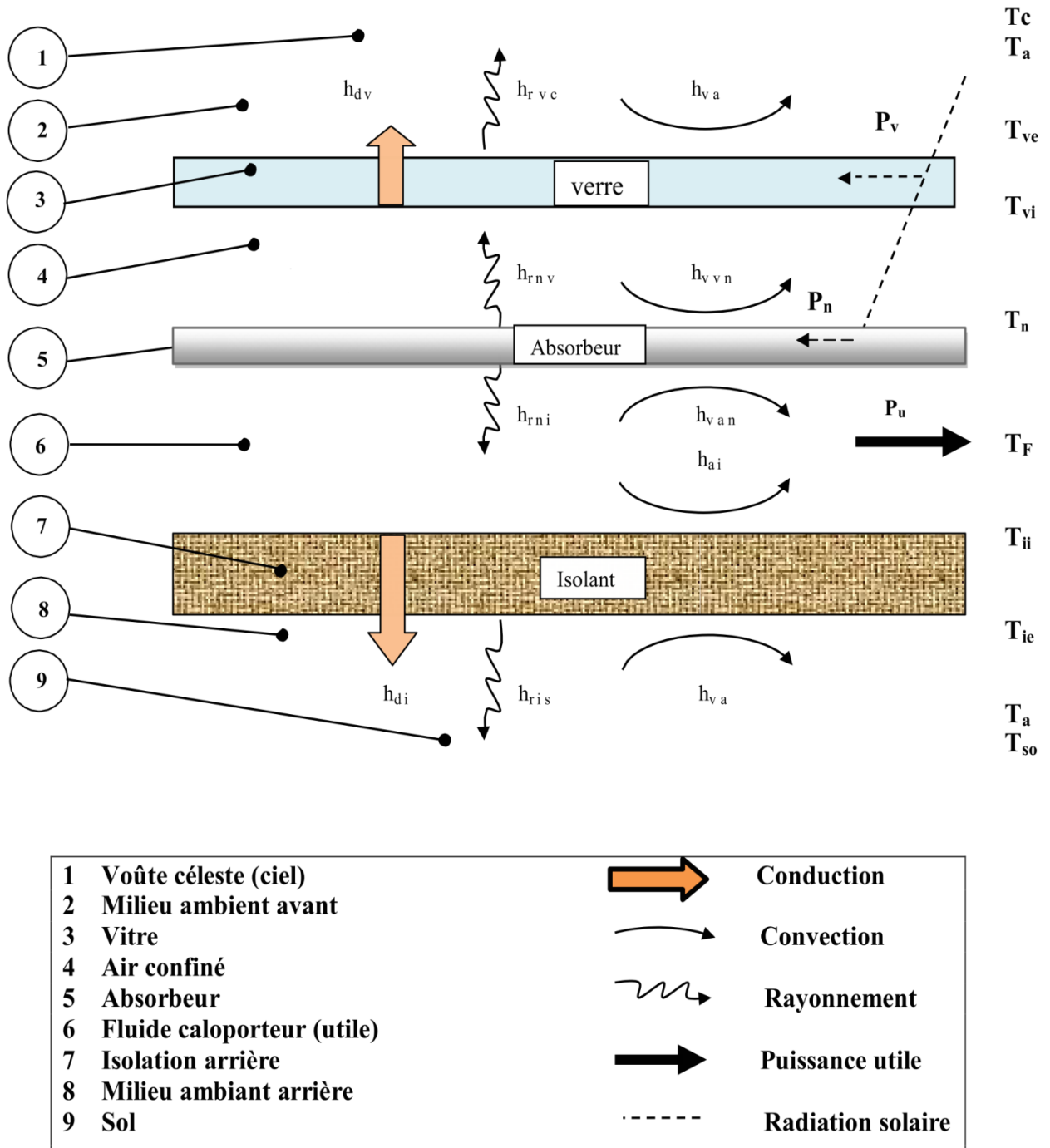


Figure IV.2: schéma des différents transferts thermiques

Avec:

$h_{va}$  : Coefficient d'échange thermique entre la vitre et l'air ambiant et éventuellement entre l'isolant et l'air ambiant (dû au vent)  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{van}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide et l'absorbeur  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{vai}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre le fluide et l'isolant  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{dv}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans la vitre  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{vvn}$  : Coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{di}$  : Coefficient d'échange thermique par conduction dans l'isolant  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{rvc}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{rvn}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{rmi}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$h_{ris}$  : Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre l'isolant et le sol  $(W/m^2 \cdot K)$ .

$P_v$  : Puissance absorbée par 1  $m^2$

$P_n$  : Puissance captée par 1  $m^2$  de l'absorbeur  $(W/m^2)$ .

$T_F$  : Température du fluide caloporteur (l'air)  $(K)$ .

$T_a$  : Température ambiante  $(K)$ .

$T_c$  : Température de la voûte céleste  $(K)$ .

$T_{ve}$  : Température de la face extérieure de la vitre  $(K)$ .

$T_{vi}$  : Température de la face intérieure de la vitre  $(K)$ .

$T_n$  : Température de l'absorbeur  $(K)$ .

$T_{ie}$  : Température de la face extérieure de l'isolant ( $K$ ).

$T_{ii}$  : Température de la face intérieure de l'isolant ( $K$ ).

### IV.3. Hypothèses simplificatrices:

- Le ciel est assimilé à un corps noir de température équivalente calculée
- La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance
- Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes
- Les différents milieux solides ont une température uniforme dans le plan normal au sens de l'écoulement
- Les flux de chaleur sont unidimensionnels
- Les parois latérales sont supposées adiabatiques

### IV.4. Modélisation des échanges thermiques dans un capteur solaire : [12]

Le principe de modélisation consiste à écrire les bilans énergétiques de chaque élément constituant. Plusieurs modèles sont rencontrés pour ce fait, deux méthodes de modélisation sont rencontrées

- a) Méthode par tranche
- b) Méthode globale

#### IV.4.1. Méthode par tranche

Il est commode d'utiliser les analogies qui existent entre le transfert de chaleur et le transfert d'électricité.

Les différents échanges thermiques qui ont lieu, sont schématisés par le circuit électrique équivalent figure (IV-3).

#### IV.5. Analogie électrique: [8]

On détermine la densité du flux du chaleur échangé entre deux points l'un porté à une température  $T_1$  et l'autre à la température  $T_2$ , de manière générale comme suit :

$$Q = h ( T_1 - T_2 ) \quad (IV.1)$$

$Q$ : densité de flux thermique (  $W / m^2$  )

$h$  : coefficient du mode de transfert de chaleur (  $W / m^2.k$  )

Cette dernière équation ressemble à la loi d'Ohm et autorise les analogie électrique entre les grandeurs thermique et électrique

Système thermique			Modèle électrique		
Paramètre	Symbole Usuel	Unité	Paramètre	symbole Usuel	Unité
Température	T	K	Potentiel	V	Volts
Flux de chaleur	$Q, \Phi$	W	Intensité	I	Ampères
Densité de flux de chaleur	$\varphi$	$W / m^2$	Densité de courant	i	$A / m^2$
Conductivité thermique	$\lambda$	$W / m / K$	Conductivité électrique	K	
Résistance thermique	R	$K / W$	Résistance électrique	$R_e$	$\Omega$
Capacité calorifique $m.C_p$	C	J / K	Capacité électrique	C	Farad

Tab IV.1: Analogie du système thermique au modèle électrique. [2]

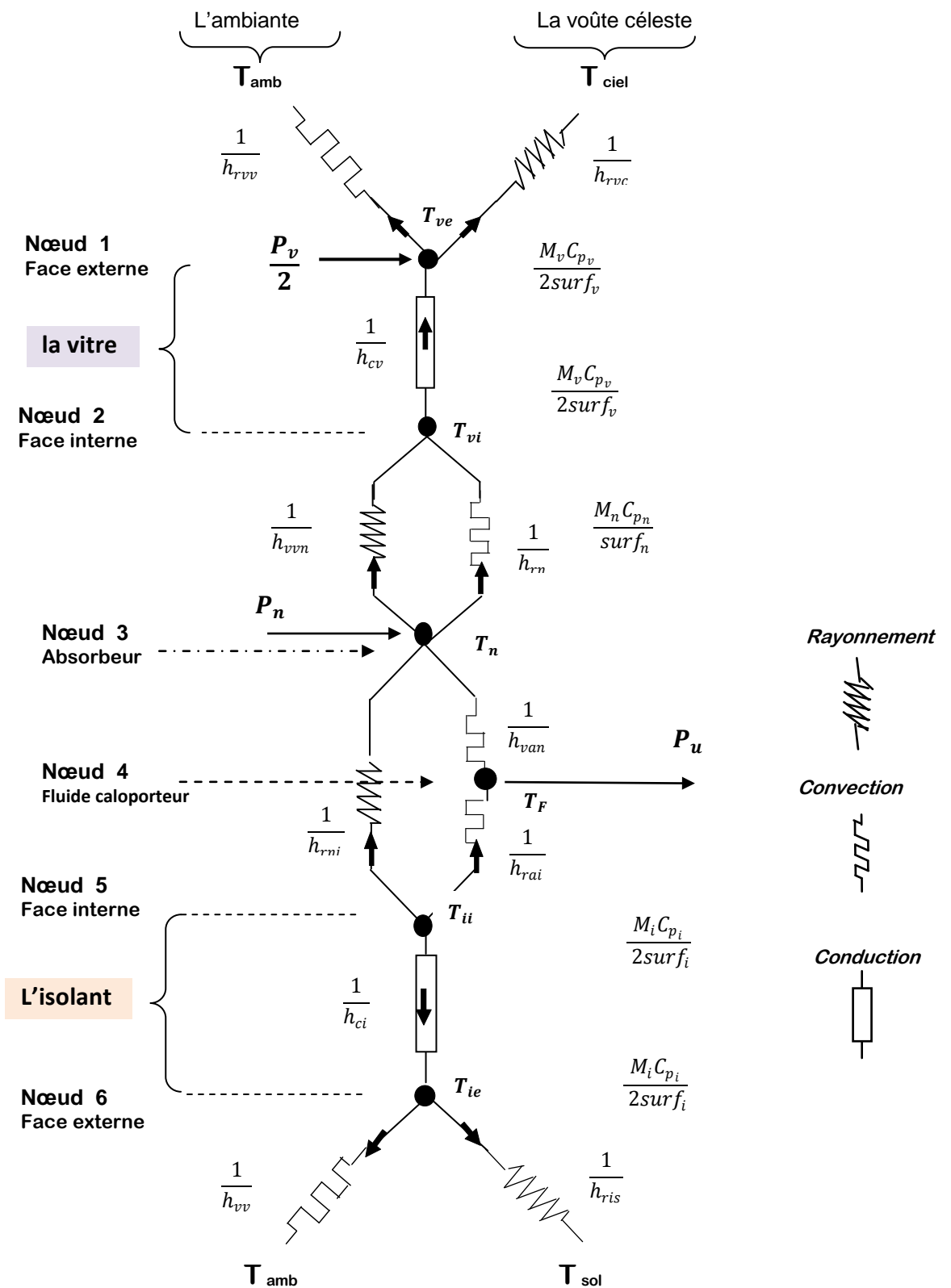


Fig IV.3. Schéma analogique équivalent [12]

#### IV.6. Bilan énergétique aux différents nœuds: [2]

Considérons une section quelconque du système à l'instant  $t$  le bilan aux nœuds  $i$  donne:

$$M_i \cdot C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=0}^n h_{ij} \cdot S_i (T_j - T_i) + P_i \cdot S_i \quad (IV.2)$$

D'où:

$M$ : la masse du milieu  $i$  du système (kg)

$C_p$ : La chaleur spécifique du nœud  $i$  (J/kg.K)

$S_i$ : la section (m<sup>2</sup>)

$N$ : ensemble des nœuds  $j$  pour lesquels  $T_j$  est un potentiel connecté à  $T_i$ .

$P_i$ : puissance absorbée (W/m<sup>2</sup>)

$dt$ : variation par rapport au temps.

$dT$ : variation par rapport à la température

Selon le schéma électrique présenté dans la figure IV.3, et en appliquant la loi d'Ohm au nœud de la maille, nous pouvons écrire :

- **Noeud 1 :** ( la face extérieure de la vitre)

$$\frac{M_v \cdot C_{p_v}}{2 \text{ surf}_v} \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{P_v}{2} + h_{rvc}(T_c - T_{ve}) + h_{va}(T_a - T_{ve}) + h_{dv}(T_{vi} - T_{ve}) \quad (IV.3)$$

- **Noeud 2 :** ( la face intérieure de la vitre)

$$\frac{M_v \cdot C_{p_v}}{2 \text{ surf}_v} \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{P_v}{2} + h_{dv}(T_{ve} - T_{vi}) + h_{rnv}(T_n - T_{vi}) + h_{vvn}(T_n - T_{vi}) \quad (IV.4)$$

- **Noeud 3 :** ( l'absorbeur )

$$\frac{M_n \cdot C_{p_n}}{\text{surf}_n} \frac{dT_n}{dt} = P_n + h_{rnv}(T_{vi} - T_n) + h_{vvn}(T_{vi} - T_n) + h_{van}(T_F - T_{vi}) + h_{van}(T_{ii} - T_n) \quad (IV.5)$$

- **Noeud 4 :** ( le fluide caloporteur )

$$\frac{Q.C_{pF}}{surf_F} (T_F(j) - T_F(j-1)) = h_{van}(T_n - T_{(j-1)}) + h_{van}(T_{ii} - T_{(j-1)}) \quad (IV.6)$$

- **Nœud 5 :** ( la face intérieure de l'isolant )

$$\frac{M_i.C_{pi}}{surf_i} \frac{dT_{ii}}{dt} = h_{vai}(T_f - T_{ii}) + h_{di}(T_{ie} - T_{ii}) + h_{rni}(T_n - T_{ii}) \quad (IV.7)$$

- **Nœud 6 :** ( la face extérieure de l'isolant )

$$\frac{M_i.C_{pi}}{surf_i} \frac{dT_{ie}}{dt} = h_{di}(T_{ii} - T_{ie}) + h_{di}(T_{ie} - T_{ii}) + h_{ris}(T_{sol} - T_{ie}) + h_{vs}(T_a - T_{ie}) \quad (IV.8)$$

D'où:

*Surf* : Surface de l'insolateur ( $m^2$ ).

$C_{pF}$  : Capacité calorifique massique du fluide caloporteur ( $J/kg.K$ )

$C_{pv}$  : Capacité calorifique massique de la vitre ( $J/kg.K$ ).

$C_{pn}$  : Capacité calorifique massique de l'absorbeur ( $J/kg.K$ ).

$C_{pi}$  : Capacité calorifique massique de l'isolant ( $J/kg.K$ ).

### IV.7. Détermination des coefficients de transfert thermique :

La détermination des échanges thermiques se font selon les trois modes de transfert : par conduction, par convection et par rayonnement.

- Calcul du coefficient par conduction à travers la vitre [9]

$$h_{dv} = \frac{\lambda_v}{ep_v} \quad (\text{IV.9})$$

- Calcul du coefficient par conduction à travers l'isolant [9]

$$h_{di} = \frac{\lambda_i}{ep_i} \quad (\text{IV.10})$$

- Calcul du coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant, ainsi l'isolant et l'air ambiant [2]

$$h_{vv} = 5,67 + 3,86.V \quad (\text{IV.11})$$

V : est la vitesse du vent extérieur (m/s)

- Calcul du coefficient convection naturelle entre la vitre et l'absorbeur [2],[15]

La lame d'épaisseur située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission par conductibilité, mais si  $\epsilon$  est trop grand, une convection naturelle de l'air intervient, ce qui entraîne des pertes non négligeables par convection. Les conditions optimales sont d'après Chapman [2]

$$[T_n - T_v].e^{-3} < k \quad (k \text{ dépend du fluide considéré})$$

$$h_{vvn} = \frac{Nu_{vn} \lambda_{air}}{ep} \quad (\text{IV.12})$$

$$Nu_{vn} = (0,06 + 3.10^{-4}(90 - \beta)) Gr^{0,33} \quad (\text{IV.13})$$

$$Gr = \rho_{air}^2 \frac{g (T_n - T_{vi}).ep}{\mu_{air} (T_{vi} + T_n)/2} \quad (\text{IV.14})$$

Gr: Nombre de Grashof, qui caractérise le phénomène de la convection naturelle.

- Calcul le coefficient de transfert par convection entre l'absorbeur et le fluide, ainsi l'isolant et le fluide [15]

$$h_{van} = h_{vai} = \frac{Nu \lambda_{air}}{D_H} \quad (IV.15)$$

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \quad (IV.16)$$

Formule de Tan et Chartes

$$Re = \frac{U \cdot D_H \cdot \rho_{air}}{\mu_{air}} \quad (IV.17)$$

$$Pr = \frac{\mu_{air} \cdot Cp_{air}}{\lambda_{air}} \quad (IV.18)$$

$$D_H = \frac{4 \cdot Sect}{Perm} = \frac{4 \cdot (larg \cdot ep)}{2 \cdot (larg + ep)} \quad (IV.19)$$

- Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et le ciel [3]

$$h_{rvc} = \sigma \cdot \varepsilon_v (T_c + T_{ve}) (T_c^2 + T_{ve}^2) \quad (IV.20)$$

- Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre

$$h_{rnv} = \frac{(T_{vi} + T_n) \cdot (T_{vi}^2 + T_n^2)}{\frac{1 - \varepsilon_v}{\varepsilon_v} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_n}{\varepsilon_n}} \quad (IV.21)$$

- Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre l'isolant et le sol [3]

$$h_{ris} = \sigma \cdot \varepsilon_{is} (T_{ie} + T_s) (T_{is}^2 + T_s^2) \quad (IV.22)$$

Avec :

$$T_s = T_c$$

$$T_c = 0.0852 \cdot T_a^{1.5}$$

La température ambiante  $T_a$  de l'air est calculée à l'aide de la formule: [17]

$$T_a = \frac{T_a \max + T_a \min}{2} + \frac{T_a \max - T_a \min}{2} \cdot \cos \left[ (14 - TSV) \frac{\pi}{12} \right] \quad (IV.23)$$

- Calcul du coefficient d'échange par rayonnement entre l'absorbeur et l'isolant

$$h_{rni} = \sigma \cdot \frac{(T_n + T_{ii}) \cdot (T_n^2 + T_{ii}^2)}{\frac{1 - \varepsilon_n}{\varepsilon_n} + 1 + \frac{1 - \varepsilon_{ii}}{\varepsilon_{ii}}} \quad (IV.24)$$

### IV.8. Calcul des puissances $P_v$ et $P_n$ :[2]

Ce calcul dépend de la journée d'exposition du capteur, de l'angle d'inclinaison et du lieu où se trouve ce dernier, ainsi que d'autres paramètres indispensables, qui seront définis ultérieurement

$P_v$  : Puissance absorbée par la vitre est donnée par la relation suivante:

$$P_v = P_{dir} \cdot \alpha_{dir,v} + P_{dif} \cdot \alpha_{dif,v} \quad (IV.25)$$

$P_n$  : Puissance captée par l'absorbeur est donnée par la relation suivante:

$$P_n = \alpha_n \cdot \frac{P_{dir} \cdot \tau_{dir} + P_{dif} \cdot \tau_{dif}}{1 - (1 - \alpha_n) \cdot \rho_{dif}} \quad (IV.26)$$

$P_{dir}$  : est la puissance directe causée par le rayonnement diffus

$P_{dif}$  : est la puissance diffuse

$\alpha_{dir,v}$  et  $\alpha_{dif,v}$  : sont les coefficient d'absorption respectivement pour le rayonnement direct et le rayonnement diffus.

$\alpha_n$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur

$\tau_{dir}$  : Coefficient de transmission pour le rayonnement direct

$\tau_{dir}$  : Coefficient de transmission pour le rayonnement direct

$\tau_{dif}$  : Coefficient de transmission pour le rayonnement diffus

$\rho_{dif}$  : caractérise la réflectivité de la vitre

$$\alpha_{dir,v} = 1 - \tau_{dir1} - \rho_1 \quad [2],[18] \quad (IV.27)$$

$$\rho_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta_1 - i)}{\sin^2(\theta_1 + i)} + \frac{tg^2(\theta_1 - i)}{tg^2(\theta_1 + i)} \right) \quad (IV.28)$$

$\rho_1$  : Réflectivité au flux direct

$$\theta_1 = \text{Arc sin} \left( \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i) \right) \quad (\text{Angle de réfraction}) \quad (IV.29)$$

$$\tau_{dir1} = \tau_{r1} \cdot \tau_{a1} \quad (IV.30)$$

$$\tau_{r1} = \frac{1 - \rho_1}{1 + \rho_1} \quad (IV.31)$$

$$\tau_{a1} = \text{Exp} \left( \frac{-ext \cdot ep_v}{\cos(\theta_1)} \right) \quad (IV.32)$$

$$\tau_{dif,v} = 1 - \tau_{dif2} - \rho_2 \quad (IV.33)$$

$$\rho_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{\sin^2(\theta_2 - i_2)}{\sin^2(\theta_2 + i_2)} + \frac{tg^2(\theta_2 - i_2)}{tg^2(\theta_2 + i_2)} \right) \quad (IV.34)$$

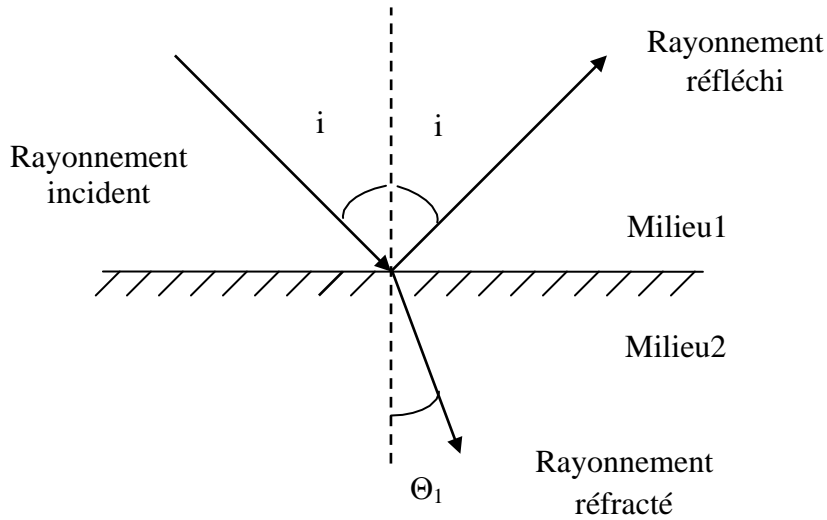
$\rho_2$  : Réflectivité au flux diffuse

$$\theta_2 = \text{Arc sin} \left( \frac{n_1}{n_2} \cdot \sin(i_2) \right) \quad (IV.35)$$

$$\tau_{dif2} = \tau_{r2} \cdot \tau_{a2} \quad (IV.36)$$

$$\tau_{r2} = \frac{1 - \rho_2}{1 + \rho_2} \quad (IV.37)$$

$$\tau_{a2} = \text{Exp} \left( \frac{-ext \cdot ep_v}{\cos(\theta_2)} \right) \quad (IV.38)$$



**Fig IV.4. Transmission du rayonnement [12]**

$i$ : Angle d'incidence

$\theta_1$  et  $\theta_2$  : angles de réfraction qui font les rayons avec la normale au dioptré

$n_1$  : indice de réfraction du milieu 1

$n_2$  : indice de réfraction du milieu 2

Calcul de la puissance directe : [12]

$$P_{dir} = I_0 \cdot c \cdot \tau_{dir} \cdot \cos(i) \quad (IV.39)$$

$$P_{dir} = P_{dir,h} \cdot \cos(i) \quad (IV.40)$$

$$P_{dir,h} = I_0 \cdot c \cdot \tau_{dir} \cdot \cos(h) \quad (IV.41)$$

$P_{dir,h}$  : Flux direct reçu par un capteur plan horizontal

$I_0$  : constante solaire est égale à 1353 (W/m<sup>2</sup>)

$c$  : facteur de correction dû à la variation de la distance terre –soleil

$$c = 1 + 0,033 \left( \frac{360.d}{365} \right) \quad (IV.42)$$

$$\tau_{dir} = A. \exp \left( \frac{-B}{\sin(h)} \cdot \frac{P}{1000} \right) \quad (IV.43)$$

$d$  : numéro du jour dans l'année

$h$ : la hauteur du soleil

$P$  étant la pression au niveau du sol, elle est évaluée généralement à 1000[mb]

$A$  et  $B$  étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinées dans le tableau [2]

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
<b>A</b>	<b>0.87</b>	<b>0.88</b>	<b>0.91</b>
<b>B</b>	<b>0.17</b>	<b>0.26</b>	<b>0.43</b>

**Tab IV .2. les coefficients de trouble du ciel**

$$\sin(h) = \cos(Z) = \sin(\phi). \sin(\delta) + \cos(\phi). \cos(\delta). \cos(\omega) \quad (IV.44)$$

$\phi$  : latitude du lieu est égale à 35,37° pour Khenchela [22]

$$\delta = 23,45. \sin \frac{360}{365} (284 + d) \quad (IV.45)$$

$\delta$ : déclinaison en degré ( $\delta < 0$  en automne et hiver,  $\delta > 0$  au printemps et en été)

$$\omega = (TSV - 12).15 \quad (IV.46)$$

$\omega$  : l'angle horaire en degré ( $\omega = 0$  au niveau solaire vraie,  $\omega < 0$  le matin et  $\omega > 0$  après midi)

Pour chaque heure  $\omega$  vaut 15°; l'heure solaire vraie  $\approx$  l'heure calculée d'après G.M.T

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\delta). \sin(\phi). \cos(\beta) + \cos(\delta). \cos(\phi). \cos(\omega) + \cos(\delta). \sin(\beta). \sin(\omega). \sin(\alpha) \\ & - \sin(\delta). \cos(\phi). \sin(\beta). \cos(\alpha) + \cos(\delta). \sin(\beta). \cos(\omega). \cos(\alpha) \end{aligned} \quad (IV.47)$$

$i$  : est l'angle entre le rayon incident et la normal au plan

$\beta$  : Angle d'inclinaison d'un capteur par rapport à l'horizontal

$\alpha$  : Orientation vers le sud

Pour une surface orientée au plan sud ( $\alpha = 0$ ),  $\cos(i)$  s'écrit sous la forme:

$$\cos(i) = \cos(\phi - \beta) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\delta - \beta) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{IV.48})$$

#### IV.9. Calcul de la puissance diffuse : [2],[8]

$$P_{dif} = P_{dif,c} + P_{dif,s} \quad (\text{IV.49})$$

Le rayonnement solaire diffus reçu par la surface d'un capteur se divise en deux parties

$P_{dif,c}$  : rayonnement diffus par la voûte céleste

$P_{dif,s}$  : rayonnement diffus par le sol et reçu par le capteur

$$\begin{aligned} P_{dif,c} &= I_0 \cdot c \cdot \tau_{dir} \cdot \sin(h) \cdot \tau_{dif} \\ &= I_0 \cdot c \cdot \sin(h) + (0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_{dir}) \cdot \frac{1 + \cos(\phi - \beta)}{2} \end{aligned} \quad (\text{IV.50})$$

$$P_{dif,s} = (I_0 \cdot c \cdot \tau_{dir} \cdot \sin(h) + I_0 \cdot c \cdot \tau_{dif} \cdot \sin(h)) \cdot a \cdot \frac{1 - \cos(\phi - \beta)}{2} \quad (\text{IV.51})$$

$a$  : l'albédo du sol (coefficient de réflexion du sol) [3]

$a = 0.2$  (absence de la neige)

$a = 0.8$  (en présence de la neige)

Puissance captée par l'absorbeur

$$P_n = \alpha_n \cdot \frac{P_{dir} \cdot \tau_{dir} + P_{dif} \cdot \tau_{dif}}{1 - (1 - \alpha_n) \cdot \rho_{dif}} \quad (\text{IV.52})$$

$$\tau_{dif} = 0,2710 - 0,2939 \cdot \tau_{dir} \quad (\text{IV.53})$$

#### IV.10. La discrétisation des équations au niveau du capteur :

Nous avons choisi la méthode des différences finies pour discrétiser les équations précédentes, on a utilisé alors la méthode implicite.

##### • IV.10.1. Echange au niveau de la face extérieure de la vitre :

$$\begin{aligned} \frac{M_v \cdot C_{pv}}{surf_v \Delta t} (T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ve}^t(j+1)) &= P_v + h_{rvc} (T_c^{t+\Delta t} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{va} (T_a^{t+\Delta t} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) \\ + h_{dv} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned} \quad (\text{IV.54})$$

- **IV.10. 2. Echange au niveau de la face intérieure de la vitre:**

$$\frac{M_v \cdot C_{pv}}{surf_v \Delta t} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^t(j+1)) = h_{rvn} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{vvn} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{dvi} (T_{vit}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vit}^t(j+1)) \quad (IV.55)$$

- **IV.10. 3. Echange au niveau de l'absorbeur:**

$$\frac{M_{nn} \cdot C_{pn}}{surf_n \Delta t} (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) = P_n + h_{rvn} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{vvn} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{van} (T_F^{t+\Delta t}(j) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{rni} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) \quad (IV.56)$$

- **IV.10. 4. Echange au niveau de fluide caloporteur:**

$$\frac{Q \cdot C_{pF}}{surf_F} (T_F^{t+\Delta t}(j) - T_F^{t+\Delta t}(j+1)) = h_{van} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) - 2 \times T_F^{t+\Delta t}(j+1) \quad (IV.57)$$

- **IV.10. 5. Echange au niveau de la face intérieure de l'isolant:**

$$\frac{M_i \cdot C_{pi}}{surf_i \Delta t} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^t(j+1)) = h_{vai} (T_F^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{di} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{rni} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) \quad (IV.58)$$

- **IV.10.6. Echange au niveau de la face extérieure de l'isolant (isolant-sol):**

$$\frac{M_i \cdot C_{pi}}{surf_i \Delta t} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ie}^t(j+1)) = h_{ci} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{ris} (T_{sol}^{t+\Delta t} - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{va} (T_a^{t+\Delta t} - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) \quad (IV.59)$$

On obtient un système d'équation de six inconnus qui sont :

$$T_{ve}, T_{vi}, T_n, T_{ii}, T_{ie} \text{ et } T_F$$

Avec :

$dt$  : désigne le pas de temps

$surf$  : larg.  $\Delta x$ s

$\Delta x$  : longueur de la tranche

### IV.11. Résolution du système :

Les méthodes itératives sont généralement préférées pour les grand systèmes linéaires  $B \times T = C$  à matrice  $B$  creuse, parce qu'elles ne modifient pas la matrice  $B$ , et que dans un grand nombre d'applications,  $B$  est creuse, et présente une structure particulière, (tri diagonale, penta diagonale), ce qui lui permet de ne pas être mémorisée explicitement et d'assurer pratiquement la convergence.

Dans les méthodes élémentaires, la méthode de *Gauss Seidel* est préférée, parce qu'elle est facile à programmer, consomme moins de mémoire et converge plus vite.

#### IV.11.1. Méthode de Gauss Seidel [19]

On veut résoudre le système linéaire:

$$B \times T = C \quad (\text{IV.60})$$

Où:

$B$ : est une matrice carrée d'ordre  $n$  ;

$C$ : est une matrice colonne ;

$T$ : est le vecteur des inconnues ;  $T = (T_1, T_2, \dots, T_n)$

Ecrivons  $B$  sous la forme:

$$B = M - N \quad (\text{IV.61})$$

Où:

$$M = D - L \quad (\text{IV.61})$$

$$N = U \quad (\text{IV.62})$$

Avec:

$D$ : matrice diagonale

$L$ : matrice inférieure

$U$ : matrice supérieure

Donc la matrice  $B$  s'écrit comme suit:

$$B = (D - L) - U \quad (\text{IV.63})$$

A partir d'un vecteur initial  $T^{(0)}$  on peut écrire :

$$T^{(1)} = (D - L)^{-1} \times U \times T^{(0)} + (D - L)^{-1} \times C \quad (\text{IV.64})$$

Comme l'inverse de  $(D - L)$  peut être compliqué à calculer, on préfère écrire le système

comme suit:

$$(D - L) \times T^{(1)} = U \times T^0 + C \tag{IV.65}$$

$$D \times T^{(1)} = L \times T^{(1)} + U \times T^0 + C \tag{IV.66}$$

Où:

$$T^{(1)} = D^{-1} \times L \times T^{(1)} + D^{-1} \times U \times T^0 + D^{-1} \times C \tag{IV.67}$$

$$T^{(k+1)} = D^{-1} \times L \times T^{(k+1)} + D^{-1} \times U \times T^{(k+1)} + D^{-1} \times C \tag{IV.68}$$

$$T_1^{(k+1)} = (C_1 - B_{11} \times T_2^{(k)} - B_{13} \times T_3^{(k)} - \dots - B_{1n}^{(k)} \times T_n^{(k)}) / B_{11} \tag{IV.69}$$

$$T_2^{(k+1)} = (C_2 - B_{21} \times T_1^{(k)} - B_{23} \times T_3^{(k)} - \dots - B_{2n}^{(k)} \times T_n^{(k)}) / B_{22} \tag{IV.70}$$

.....

$$T_n^{(k+1)} = (C_n - B_{n1} \times T_1^{(k)} - B_{n2} \times T_2^{(k)} - \dots - B_{nn-1}^{(k)} \times T_{n-1}^{(k)}) / B_{nn} \tag{IV.71}$$

Le système de ces équations précédente converge si:

$$|T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)}| < \varepsilon$$

Ou bien :

$$\frac{|T_j^{(k+1)} - T_j^{(k)}|}{|T_j^{(k+1)}|} < \varepsilon$$

D'après cette méthode le système peut se mettre sous la forme d'une matrice qui s'écrit :

$$B_{ij} \cdot T_i = C_i \quad (\text{IV.72})$$

Avec:

$$i=1, \dots, 6, \quad j=1, \dots, 6$$

$$\begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{13} & B_{14} & B_{15} & B_{16} \\ B_{21} & B_{22} & B_{23} & B_{24} & B_{25} & B_{26} \\ B_{31} & B_{32} & B_{33} & B_{34} & B_{35} & B_{36} \\ B_{41} & B_{42} & B_{43} & B_{44} & B_{45} & B_{46} \\ B_{51} & B_{52} & B_{53} & B_{54} & B_{55} & B_{56} \\ B_{61} & B_{62} & B_{63} & B_{64} & B_{65} & B_{66} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1) \\ T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) \\ T_n^{t+\Delta t}(j+1) \\ T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) \\ T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1) \\ T^{t+\Delta t}(j+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.73})$$

Telque :

$$B_{11} = \frac{M_v \cdot C_{pv}}{\text{surf}_v \Delta t} + h_{rve} + h_{va} + h_{dv} \quad (\text{IV.74})$$

$$B_{12} = -h_{dv} \quad (\text{IV.75})$$

$$B_{13} = B_{14} = B_{15} = B_{16} = 0$$

$$B_{11} = \frac{M_v \cdot C_{pv}}{\text{surf}_v \Delta t} + h_{rve} + h_{va} + h_{dv} \quad (\text{IV.76})$$

$$C_1 = h_{va} + T_a + P_v + h_{rvc} + T_c + \frac{M_v \cdot C_{pv}}{\text{surf}_v \Delta t} T_{ve}^t(j+1) \quad (\text{IV.77})$$

$$B_{21} = -h_{dv} \quad (\text{IV.78})$$

$$B_{22} = \frac{M_v \cdot C_{pv}}{\text{surf}_v \Delta t} + h_{rnv} + h_{vvn} + h_{dv} \quad (\text{IV.79})$$

$$B_{23} = -(h_{rnv} + T_{vvn}) \quad (\text{IV.80})$$

$$B_{24} = B_{25} = B_{26} = 0$$

$$C_2 = \frac{M_n \cdot C_{pn}}{\text{surf}_n \Delta t} T_{vi}^t(j+1) \quad (\text{IV.81})$$

$$B_{31} = 0$$

$$B_{32} = -(h_{vvn} + T_{rnv}) \quad (\text{IV.82})$$

$$B_{33} = \frac{M_n \cdot C_{pn}}{\text{surf}_n \Delta t} + h_{rnv} + h_{vvn} + h_{van} + h_{rni} \quad (\text{IV.83})$$

$$B_{34} = 0$$

$$B_{35} = -h_{rni} \quad (\text{IV.84})$$

$$B_{36} = 0$$

$$C_3 = P_n + \frac{M_n \cdot C_{pn}}{\text{surf}_n \Delta t} T_n^t(j+1) + h_{van} T_F^{t+\Delta t}(j) \quad (\text{IV.85})$$

$$B_{41} = B_{42} = 0$$

$$B_{43} = -h_{van} \quad (\text{IV.86})$$

$$B_{44} = \frac{M_F \cdot C_{pF}}{\text{surf}_F} \quad (\text{IV.87})$$

$$B_{45} = -h_{vai} \quad (\text{IV.88})$$

$$B_{46} = 0$$

## IV.12. Discussions

Dans le cadre de cette étude nous avons adapté les hypothèses suivantes :

- les calculs sont effectués à Khenchela en tenant compte des coordonnées géographiques (latitude 35.37° nord, longitude 7 Est) [21].
- avec une zone de la condition normale pour un albédo  $\rho = 0.2$ .
- l'inclinaison du capteur est égale à 25° par rapport à l'horizontale et avec un azimut de 0° par rapport au sud.
- les températures ambiantes ont été données par la formule :

$$T_a(t) = [(T_a \text{ max} - T_a \text{ min})/2].\sin[(t-8).\pi/12] + (T_a \text{ max} + T_a \text{ min})/2$$

Avec :

Le jour le calcul : 07 juillet 2017

$T_a \text{ max} : 37^\circ\text{C}$

$T_a \text{ min} : 22^\circ\text{C}$

t : temps local.

Un petit programme de calcul a été développé en langage FORTRAN est utilisé

### IV.13. Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées

L'évolution temporelle du rayonnement solaire global reçu par unité de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la vitre et l'absorbeur du capteur solaire est illustrée par la figure IV.5.

Il apparait nettement sur cette figure que la puissance solaire est maximale entre 12<sup>h</sup>00 et 14<sup>h</sup>00, ce qui peut être expliqué par la hauteur du soleil

En effet, plus le soleil est bas sur l'horizon (sa hauteur petite) plus le rayonnement solaire est important, ce dernier va donc subir des atténuations importantes suite à son interaction avec l'atmosphère terrestre. Par contre, lorsque le soleil s'éloigne de l'horizon, sa hauteur croît et par conséquent le rayonnement solaire diminue, il en résulte une atténuation moins importante.

Les courbes de variation des puissances absorbées par la vitre et l'absorbeur suivent la même loi que la variation temporelle du rayonnement global car ces puissances sont reliées au rayonnement global par des lois linéaires.

La puissance absorbée par l'absorbeur est importante du fait de son coefficient d'absorption élevé, contrairement à la couverture transparente qui présente une puissance absorbée très faible, ceci est dû à ses propriétés optiques à savoir, son faible coefficient d'absorption et son coefficient de transmission élevé, le même résultat est obtenu dans [16],

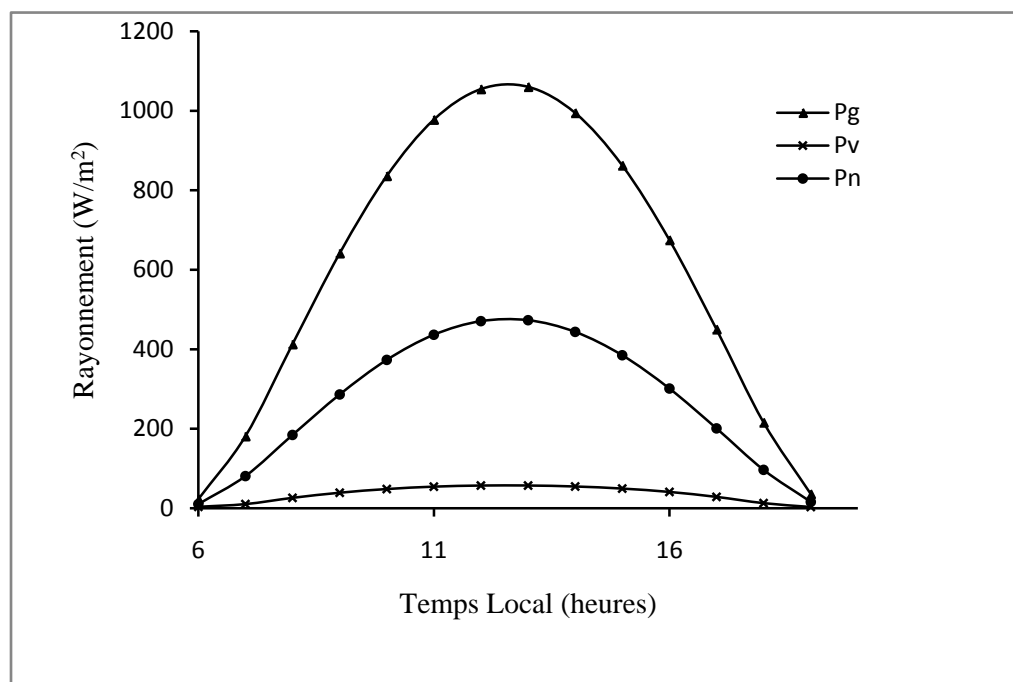


Fig IV.5. Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées

#### IV.15. Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel

La température du ciel varie en fonction de celle de l'ambiance (figure IV.6), il s'ensuit que les courbes représentatives de l'évolution temporelle des températures de l'ambiance et du ciel ont la même allure, elles atteignent leurs valeurs maximales entre 13 00 et 15 00 tout comme le rayonnement global, cela s'explique par l'effet de serre :

En effet, une partie du rayonnement solaire incident est absorbée par la surface de la terre et ensuite réémise vers l'atmosphère sous forme d'un rayonnement I.R lequel va être partiellement absorbé par les gaz à effet de serre qui va augmenter la température de l'atmosphère terrestre, et s'accroît d'autant plus que le rayonnement solaire augmente, d'où l'accroissement de la température de l'atmosphère.

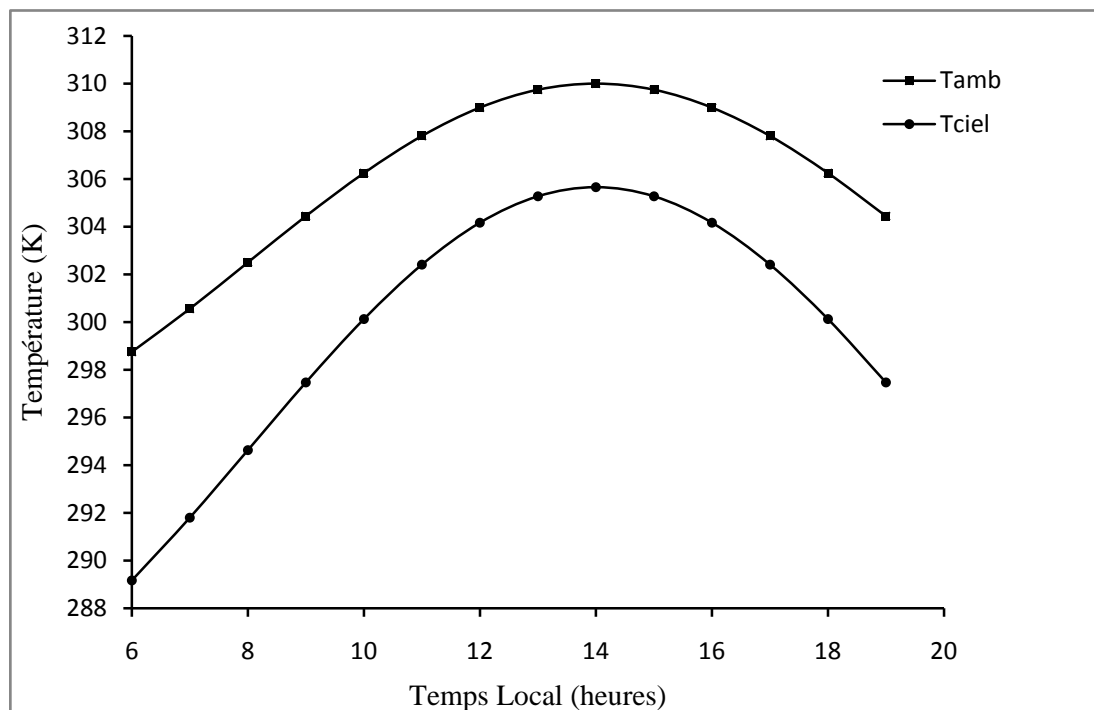
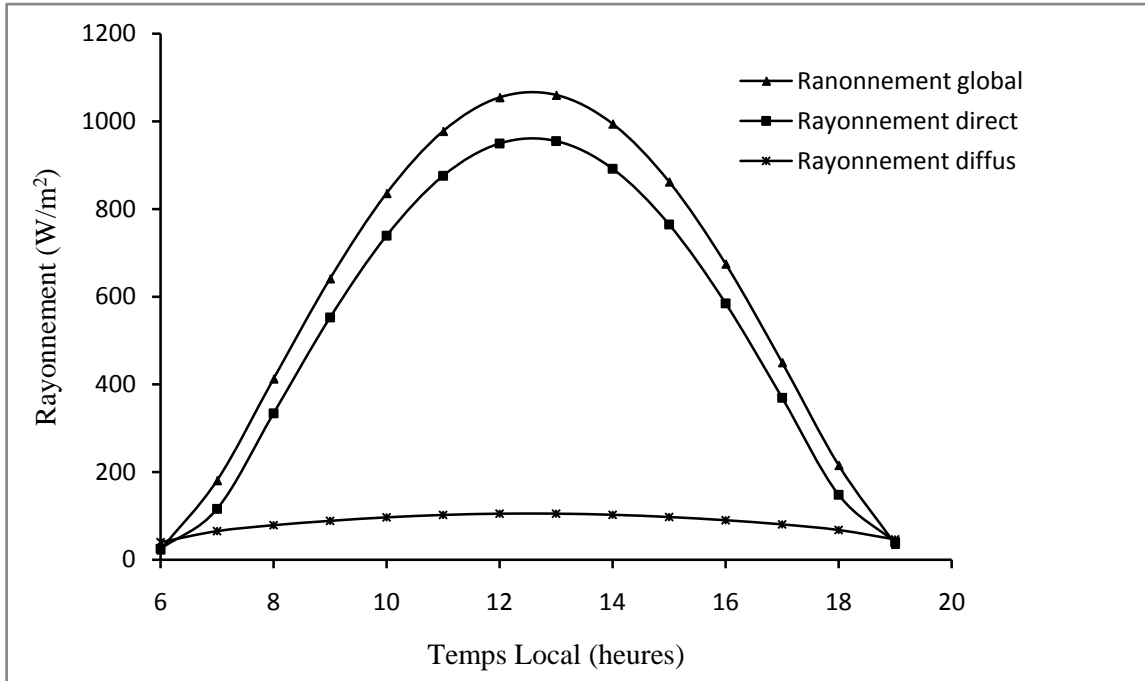


Fig IV.6. Variation temporelle des températures de l'ambiance et du ciel

**IV.16. Variation temporelle du rayonnement solaire :**

La figure IV.7 montre la variation temporelle du rayonnement solaire qui a augmenté pour atteindre son maximum entre 12 h 00 et 13 h 00



**Fig IV.7. Variation temporelle du rayonnement solaire**

## Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons établi une étude théorique et numérique d'un capteur solaire plan à air en régimes transitoire

Après une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents échanges thermiques mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernants le comportement thermique de ce dispositif en régimes transitoire. La résolution du système d'équations linéaires à été discrétisée par la méthode implicite des différences finies (une approche numérique basée sur la méthode itérative de Gauss-Seidel peut être utilisée)

On notera que :

- L'emploi d'un absorbeur doté d'une chaleur spécifique, une conductivité thermique et une absorptivité élevées améliore le rendement instantané.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- L'isolant doit posséder une épaisseur et une chaleur spécifique élevées, ainsi qu'une faible conductivité thermique afin d'améliorer le rendement instantané du capteur.
- Le fluide caloporteur doit avoir d'une part une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées et d'autre part, une viscosité dynamique et une masse volumique réduites.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

- Maintenir une faible différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente afin de diminuer les pertes thermiques convectifs à l'avant du capteur.
- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.

- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

Ainsi qu'on notera que le capteur à air a des avantages et des inconvénients

L'utilisation de l'air comme fluide caloporteur est susceptible de réduire les coûts de fabrication

En effet de l'air ne présente pas de problèmes de gel ou d'ébullition.

- Les problèmes d'étanchéité paraissent moins cruciaux.
- Le capteur à air, est plus léger que les dispositifs classiques et généralement moins complexe de réalisation, donc plus facilement intégrable dans un bâtiment ou un processus industriel et son coût d'installation est plus faible.

Néanmoins, l'air présente un certain nombre d'inconvénients :

- Coefficients d'échange thermique plus faibles que pour les liquides, ce qui conduit généralement à augmenter les surfaces d'échanges.
- Faible valeur du produit de la masse volumique, ce qui impose l'utilisation de forts débits volumiques, ce qui augmente la consommation électrique des auxiliaires (ventilateur) ;
- Problèmes de salissure des vitres dans les cas où l'air circule entre la vitre et l'absorbeur.

## Références bibliographiques

- [1] **Alain Ricaud**, «Gisement solaire et transferts énergétiques », Université de CERGY-PONTOISE, (2011)
- [2] **Yves Jannot**, Thermique solaire, (2007)
- [3] **Hammoumi Mohamed**, Etude experimental d'un capteur solaire plan à air spécifique au séchage, mémoire master, université –Tlemcen, (2013)
- [4] **Roger Bernard**, Le Rayonnement solaire, Conversion thermique et application, 2<sup>ème</sup> édition, (1980)
- [5] **Ana-Maria Blanchi, Yves Fautrelle, jacqueline Etay**, Transferts thermiques, Agence universitaire de la francophonie, Presses polytechnique et universitaires Romandes, (2004)
- [6] **André.B.De vriendt**, La transmission de la chaleur, volume 2, Introduction au rayonnement thermique, (1984)
- [7] **C, Vauge**. Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263 , (1982)
- [8] **KASBADJI N & MERZOUK M**, « Les capteurs solaires plans : conception et performances », CDER Bouzareah, Alger, (2008)
- [9] **Jean Marie Seynhaeve**, Rappel des bases du transfert de chaleur illustration, (2014)
- [10]- **Philippe Marty**, Cours de conduction et rayonnement, université Joseph Fourier, Grenoble, (2012-2013)
- [11] **Jean Taine, Franck Enguehard, Estella lacona**, Transfert thermique – DUNOD- 5<sup>ème</sup> édition, (2014)
- [12] **Michel Daguenet**, Les séchoirs solaires : Théorie et pratique, UNISCO, (1985)
- [13] **BELKACEM.Z et KECHRA.A**, « Etude Expérimentale d'un capteur solaire thermique à air » Mémoire de fin d'étude, CDER, (2011)
- [14]**Jean Desmons**, «Aide-mémoire de génie climatique - 3ème édition» Dunod/Pyc, Editions (2012)
- [15] **GURRAICHE DJEMAA**, Simulation et prédiction de la radiation solaire directe absorbée par un champ de capteurs cylindro-parabolique, thèse de magister, Batna, (2002)
- [16] **K, Aoues; N, Moummi; M, Zellouf; A, Moummi; A, Labed; E, Achouri ; A, Benchabane**, Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air :

étude expérimentale dans la région de Biskra, Revue des Energies Renouvelables, vol 12, N°2, p 237-248, (2009)

[17] **KASBADJI N & MERZOUK M**, « Les capteurs solaires plans : conception et performances », CDER Bouzareah, Alger, (2008)

[18] **H, Abdi ; N, Ait Messaoudene**, Etude expérimentale et théorique des performances de deux capteurs plans à contact direct eau-plaque d'absorption, Revue des Energies Renouvelables, Université de Blida, (2008)

[19] **Manfred Gilli**, Méthode numérique , université d Genève, (2006)

[20] <http://planet-terre.ens-lyon.fr/>

[21] <https://abbassa.wordpress.com> > [khenchela](#)