

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

*Ministère de l'Enseignement supérieur
et de la Recherche Scientifique*

Université ABOU-BEKR BELKAID –Tlemcen-
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE – MECANIQUE



Mémoire de fin d'études



En vue de l'obtention du diplôme de Master en
Génie Mécanique
Option Génie énergétique

Thème

*Étude Expérimentale d'un capteur solaire plan à air
spécifique au séchage*

Présenté par :

HAMMOUMI Mohamed

MORGHAD Hassan

Encadré par :

Mr. A.AZZI

Soutenu devant le jury :

Mr. C.SELADJI

Président

Mr. R. SAÏM

Examineur

Mr. K. ALIANE

Examineur

Promotion: 2013

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 l'encadreur, Monsieur AZZI Ahmed, enseignant de Génie Mécanique de l'université

ABOU BAKR Belkaid -Tlemcen- ainsi que les membres du jury, Messieurs SELADJI, SAÏM, et ALIANE pour avoir accepté d'examiner notre monographie et de rapporter sur notre travail avec efficacité et diligence.

Nos remerciements sont aussi à adresser aux membres de l'administration du département de Génie Mécanique et en particulier Monsieur GHNIFED.

Nous tenons à remercier également, Monsieur MOUNGAR Hocine pour avoir accepté de nous encadrer dans notre projet de fin d'étude au niveau du Centre de développement des Energies Renouvelables en milieu Saharien d'Adrar, en nous consacrant un grand nombre d'heures de son temps précis. Il nous a ainsi confortés dans notre désir de poursuivre notre carrière dans la recherche.

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

SOMMAIRE

Introduction générale	1
Présentation de l'Unité (URER.MS)	4
Chapitre I : Gisement Solaire	7
I .1 Introduction.....	7
I .2 Le soleil.....	7
I .2.1. Présentation.....	7
I .2.2. Caractéristiques du soleil.....	7
I .2.3. Structures et aspects du soleil.....	9
I .3 La terre.....	10
I .3.1. Présentation.....	10
I .3.2. Caractéristiques de la terre.....	10
I .3.3. Mouvement de la terre.....	13
I .4 Rappels astronomiques.....	14
I .4.1. Système équatorial.....	14
I .4.2. Système horizontal.....	15
I .4.3. Temps solaire.....	18
I .4.4. Les différents temps	19
I .5 Rayonnement solaire.....	20

I .5.1. Définition.....	20
I .5.2. Les grandeurs solaires.....	20
I .5.3. Le spectre de la radiation solaire.....	22
I .5.4. Influences de l'atmosphère sur la propagation du rayonnement solaire.....	23
I .5.5. Les composantes du rayonnement solaire.....	23
I .5.6. Mesure des rayonnements solaires.....	25
I .5.7. Le calcul analytique.....	25

Chapitre II : Caractéristiques techniques des capteurs..27

II.1 Introduction.....	27
II.2 Différents types de capteurs solaires thermiques.....	27
II.2.1. Capteur sans vitrage.....	28
II.2.2. Capteur vitré.....	29
II.2.3. Capteur sous vide.....	30
II.2.4. Capteur à concentration.....	31
II.3 Les capteurs solaires plans.....	33
II.3.1. Capteur plan à eau.....	33
II.3.2. Capteur plan à air.....	35
II.4 Principaux composants et différentes caractéristiques d'un capteur plan à air.....	37
II.4.1. Les couvertures.....	37
II.4.2. Absorbeur.....	40

II.4.3. Fluide caloporteur.....	41
II.4.4. Isolant.....	42
II.5 Les catégories d'un capteur solaire à air.....	43
II.5.1. Capteur solaire à absorbeur rainuré	43
II.5.2. Capteur solaire à absorbeur poreux.....	44
II.5.3. Capteur solaire à nids d'abeille	45
II.5.4. Capteur solaire à absorbeur plan	46
II.6 Principe de fonctionnement du capteur solaire plan à air...49	
II.7 L'influence de l'orientation et l'inclinaison du capteur.....51	
II.8 Les applications d'un capteur solaire plan à air.....52	
II.9 Conclusion.....	57

Chapitre III : Etude théorique.....58

III.1 Introduction.....	58
III.2 Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement.....	58
III.3 Préliminaires	59
III.3.1. Conduction	59
III.3.2. Convection	61
III.3.3. Rayonnement.....	62
III.4 Modélisation mathématique	63
III.4.1. Expressions des différents coefficients d'échange thermique.....	65
III.4.2. Pertes globales d'énergies	68

III.4.3. Equations régissant le transfert de chaleur dans le capteur.....	71
III.4.4. Calcul de rendement.....	73
III.5 Conclusion	74

Chapitre IV : Etude expérimentale.....75

IV.1 Introduction.....	75
IV.2 Description et fonctionnement du dispositif expérimental.....	75
IV.3 Caractéristiques techniques du capteur solaire.....	76
IV.4 Montage expérimental.....	78
IV.4.1. Réalisation du capteur solaire.....	78
IV.4.2. Diaporama.....	79
IV.5 Instrumentation.....	83
IV.5.1. Mesure des températures.....	84
IV.5.2. Mesure du rayonnement solaire.....	85
IV.5.3. Mesure de la vitesse du vent.....	86

Chapitre V : Résultats et Discussion87

V.1 Résultats Obtenus.....	87
V.2 Traitements des résultats obtenus.....	88
V.3 Résultats Traités	90
V.4 Graphes.....	91
Discussion.....	97

Comparaison.....	98
V.5 Analyse des résultats.....	99
V. Conclusion	100
Conclusion Générale.....	101
Bibliographie.....	103
Nomenclature	105
Annexe	112

LISTE DES FIGURES

Fig. 1: Photo représentant la Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien d'Adrar.

Fig I.1: Structure du soleil en coupe.

Fig I.2: Mouvements de la terre.

Fig I.3 : La déclinaison du soleil (δ).

Fig I.4 : Angle d'incidence (θ_i) et Angle de réfraction (θ_r).

Fig I.5 : Les différents angles astronomiques.

Fig I.6 : La longueur d'onde de rayonnement solaire.

Fig I.7: Les composantes du rayonnement solaire.

Fig II.1: Schéma d'un capteur sans vitrage.

Fig II.2: Photo représentant le chauffage d'une piscine par un capteur sans vitrage.

Fig II.3: Schéma d'un capteur vitré.

Fig II.4: Les composants d'un capteur sous vide.

Fig II.5: Système à réflecteur cylindro-parabolique.

Fig II.6: Système à réflecteur parabolique.

Fig II.7: Schéma d'un capteur plan à eau.

Fig II.8: Photo représentant un Chauffe-eau solaire.

Fig II.9: Schéma d'un capteur plan à air incliné

Fig II.10: Photo représentant un Chauffage d'habitat par un capteur plan à air

Fig II.10: Schéma représentant les différents facteurs (Transmission, Absorption et Réflexion) dans le verre

Fig II.11: Schéma d'un capteur solaire à absorbeur rainuré.

Fig II.12: Schéma d'un capteur solaire à absorbeur poreux.

Fig II.13: Schéma d'un capteur solaire à nids d'abeille.

Fig II.14: Schéma représente capteur solaire à simple passage.

Fig II.15: Schéma représente capteur solaire à plusieurs passages.

Fig II.16: Principe de l'effet de serre.

Fig II.17: Schéma représente le mur Trombe-Michel.

Fig II.18: Schéma représente le Moteur STIRLING.

Fig II.19: Le cycle du Moteur STIRLING.

Fig III.1: Schéma représente le principe de la conduction

Fig III.2: Schéma représente le principe de la convection

Fig III.3: Schéma représente le principe du rayonnement

Fig III.4: Vue schématique du capteur solaire plan à air

Fig III.5: Schéma électrique de l'insolateur plan à air

Fig IV.1: Photos représentent les différents composants et matériels nécessaires pour réaliser le montage

Fig IV.2: Photo représente le grattage de la peinture de la plaque absorbante

Fig IV.3: Photo représente la purgation des verres (vitre)

Fig IV.4: Photos représentent la Pigmentation de l'absorbeur en noir mat

Fig IV.5: Photos représentent l'étalonnage des différents thermocouples

Fig IV.6: Photos représentent l'établissement du verre à la face auparavant du capteur à l'aide de colle et de joint

Fig IV.7 : Photo représente le capteur solaire plan à air monté

Fig IV.8 : Photo représentant la plate-forme des essais de la SEES/MS d'Adrar

Fig IV.9: Schéma représente l'installation des thermocouples

Fig IV.10 : Photos représentent le raccordement des différents thermocouples à l'acquisition de données

Fig IV.11 : Photo représente le Pyranomètre

Fig IV.12 : Photo représentant l'Anémomètre.

Fig V.1 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 19/04/2013.

Fig V.2 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 19/04/2013.

Fig V.3 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 20/04/2013.

Fig V.4 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 20/04/2013.

Fig V.5 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 21/04/2013.

Fig V.6 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 21/04/2013.

Fig V.7 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 22/04/2013.

Fig V.8 : Evolution des différentes températures pour la journée 22/04/2013.

Fig V.9 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 23/04/2013.

Fig V.10 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 23/04/2013.

Fig V.11 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 24/04/2013.

Fig V.12 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 24/04/2013.

LISTE DES TABLEAUX

Tab I.1: Caractéristiques du soleil.

Tab I.2 : Caractéristiques de la terre.

Tab I.3 : Composition de l'atmosphère.

Tab I.4 : Spectre électromagnétique.

Tab II.1: Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible de l'infrarouge.

Tab II.2: Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface.

Tab II.3: Conductivité thermique λ des différents absorbeurs.

Tab II.4: Conductivité thermique λ , volume massique, Température maxi d'utilisation des différents isolants.

Tab III.1: Conductivité thermique λ de certains matériaux.

Tab IV.1: Les caractéristiques techniques du l'insolateur .

Tab V.1: Echantillon des résultats obtenus pour la journée 19/04/2013

Tab V.2: Echantillon des résultats traités pour la journée 19/04/2013

Tab V.3: La récapitulation des résultats à différentes journées

INTRODUCTION

INTRODUCTION :

Nul n'ignore plus, de nos jours, que la surexploitation des ressources fossiles de notre planète, ajoutée à la hausse constante de la démographie, laisse entrevoir à plus ou moins brève échéance une crise énergétique majeure. Pour ne rien arranger, des changements climatiques dus aux émissions de gaz à effet de serre (GES), à la déforestation et aux pollutions diverses perturbent l'environnement. [1], [2]

La situation de pénurie énergétique et l'aggravation des impacts environnementaux ont amené les pays à trouver des solutions adaptées et de les diversifier. L'une de ces solutions adaptées, c'est de trouver de nouvelles énergies et parmi celle-ci l'énergie solaire. [1], [2]

L'énergie solaire reçue sur la terre en une heure pourrait suffire à couvrir tous les besoins énergétiques mondiaux pendant une année. [3]

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés. [3]

Il existe deux utilisations de l'énergie solaire :

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

De par sa position géographique, l'Algérie dispose d'un important potentiel en énergie solaire qui n'attend qu'une bonne exploitation. L'une des applications les plus prometteuses de cette source d'énergie est

le captage solaire pour répondre aux besoins en énergies des populations et plus particulièrement celles en zone saharienne. [4]

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...). [4]

Pour notre part, nous nous proposons d'étudier les variations des différentes températures selon les composants du capteur, ainsi l'évolution du rayonnement solaire et leur influence sur la production.

A cet effet, nous avons établi un système d'équation régissant le fonctionnement du capteur et les différents coefficients d'échange thermique, et où une modélisation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

Notre travail comprend donc cinq chapitres et une partie annexe :

- Le premier chapitre est consacré au gisement solaire où on a exposé notamment la méthode de détermination du flux solaire incident au capteur ainsi que les différentes puissances absorbées.

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

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

- Le quatrième chapitre donne la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux moyens utilisés.

- Le cinquième chapitre présente les différents résultats obtenus de la procédure du capteur, ainsi que leurs interprétations et conclusions qui en découlent.

- Enfin, une partie annexe comprenant, entre autres, les différents nombres adimensionnels et les tableaux indiquant les résultats obtenus.

CHAPITRE I
Gisement Solaire

CHAPITRE I : Gisement Solaire

I .1 Introduction : [3], [5]

Le gisement solaire est une science qui propose radiométrique et météorologique de l'atmosphère. En effet, l'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquences différentes.

Cette énergie peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine. La maîtrise de cette dernière est étroitement liée à l'étude du rayonnement solaire.

I .2 Le soleil : [3], [5]

I .2.1. Présentation :

Le soleil est situé au centre d'un système dit système solaire dont la terre fait partie avec d'autres planètes.

Le soleil a une forme sphérique qui est constitué d'hydrogène (71%), d'hélium (27%), et d'autres éléments, plus lourds (2%).

Au centre du soleil, la température atteint environ 16 millions de degrés Celsius, en surface la température du soleil est d'environ 5630 °C.

I .2.2. Caractéristiques du soleil :

L'étude astrophysique du soleil conduit aux valeurs suivantes

Caractéristiques	Valeurs
Masse	$1,9891 * 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre	$1,392 * 10^6 \text{ km}$
Masse volumique moyenne	$1408 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Surface	$6,09 * 10^{12} \text{ km}^2$
Volume	$1,41 * 10^{18} \text{ km}^3$
Flux énergétique	$3,83 * 10^{26} \text{ w}$
Période galactique	$4,6 * 10^9 \text{ année}$
Gravité à la surface	$273,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Température au centre	16 Mk
Température à la surface	5900k

Tab I.1 : Caractéristiques du soleil

I .2.3. Structures et aspects du soleil :

Le soleil est une sphère non homogène dans laquelle on peut distinguer plusieurs zones : l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et la couronne solaire.

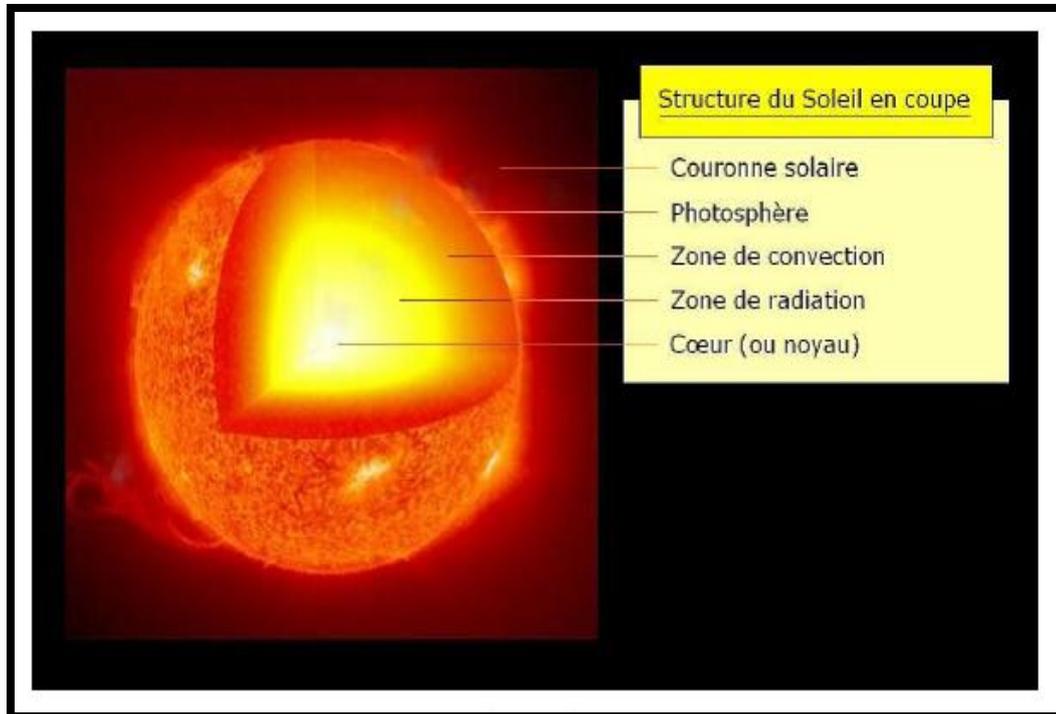


Fig I.1: Structure du soleil en coupe

- **L'intérieur** : (noyau, zone de radiation et zone de convection)

L'intérieur est la source d'énergie du soleil, il est composé de $(2/3)$ d'hydrogène et $(1/3)$ d'hélium. La température atteint 16 Mk .

- **La photosphère** :

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

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

- **Chromosphère :**

Elle surmonte la photosphère .c'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire, son épaisseur ne dépasse pas 800km et sa température est de ($43 * 10^3 \text{k}$).

- **La couronne :**

C'est une auréole blanche irrégulière sans limite définies, son épaisseur est de l'ordre de $3 * 10^6 \text{km}$.

I .3 La terre : [1], [2]

I .3.1. Présentation :

La terre est la troisième planète du système solaire par ordre de distance croissante au soleil, et la quatrième par taille et par masse croissantes. Il s'agit de la plus grande et la plus massive des quatre planètes telluriques, les trois autres étant Mercure, Vénus et Mars.

I .3.2. Caractéristiques de la terre :

Les principales caractéristiques sont données dans les tableaux suivants :

Caractéristiques	Valeurs
Masse	$6 * 10^{21} \text{ tonne}$
Volume	$1,08 * 10^{12} \text{ km}^3$
Surface	$5,1 * 10^8 \text{ km}^2$
Rayon équatorial	6 378,14 km
Rayon polaire	6 356,75 km
Masse volumique globale	$5.515 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$

Tab I.2 : Caractéristiques de la terre

	Gaz	Symbole	Proportion en %	Observation
Gaz principaux	Azote	N_2	78	
	Oxygène	O_2	21	
Gaz inertes	Argon	A_r	0.93	
	Néon	N_e	0.02	
	Krypton	K_r		
	Xénon	X_e		
Gaz à effet de serre	Vapeur d'eau	H_2O	variable	
	Gaz carbonique	CO_2	0.03	Energies fossiles ↗
	Oxyde d'azote	N_2O	traces	↗
	Ozone	O_3	traces	Diminue aux pôles = trou

Tab I.3 : Composition de l'atmosphère

I .3.3. Mouvements de la terre : [6]

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

La terre effectue donc une révolution autour du soleil, selon une trajectoire assez proche d'un cercle (plan de l'écliptique ou orbite de la terre).

La distance terre-soleil est approximativement de 150 millions de kilomètres, et il faut 8 minutes à sa lumière ou énergie pour nous parvenir. Ce tour complet dure 365 jours et 6 heures, ce qui correspond à une année solaire. Tous les 4 ans, une année bissextile de 366 jours permet de compenser les 6 heures par un jour ($4 \times 6 = 24h$).

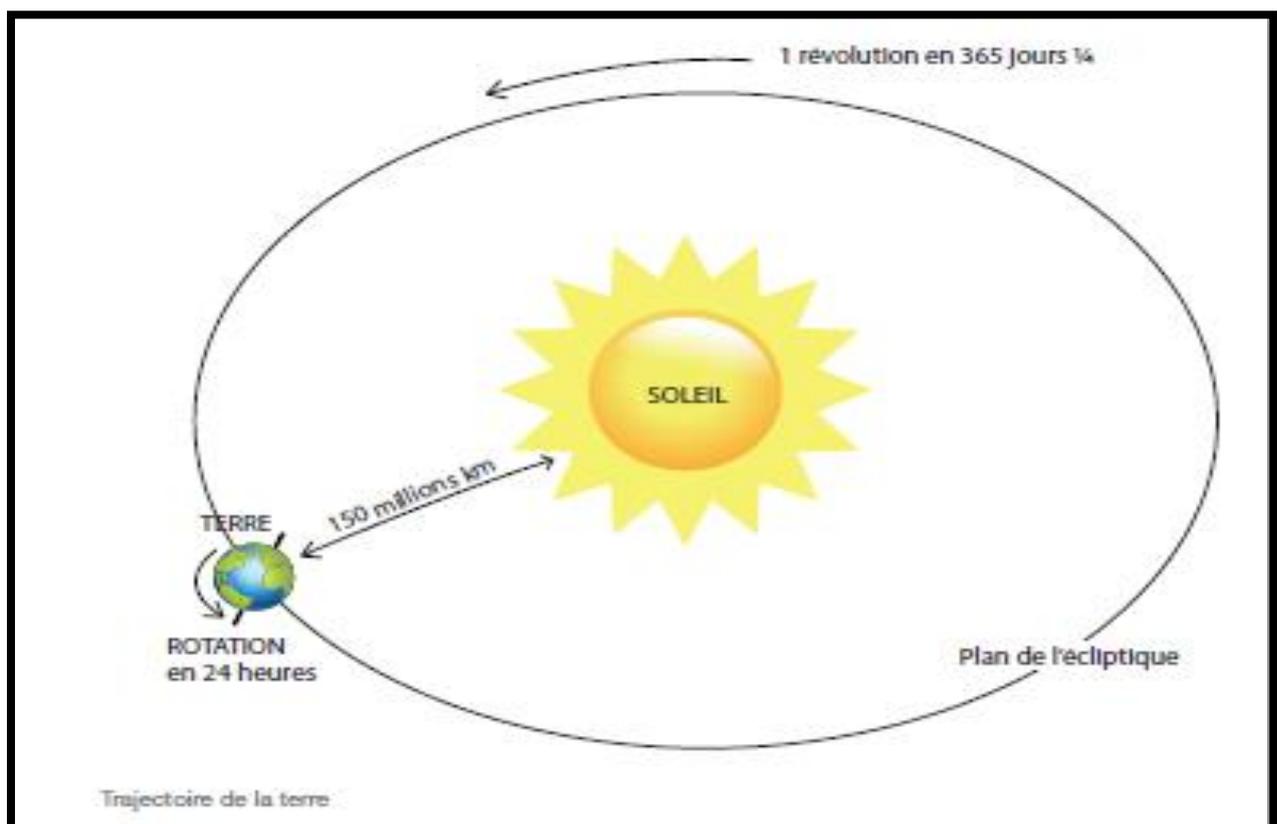


Fig I.2: Mouvements de la terre

I.4 Rappels astronomiques : [5], [7]

I.4.1. Système équatorial

On utilise deux angles :

- **La déclinaison du soleil notée (δ) :**

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

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \cdot \frac{(284 + n)}{365} \right) \quad (\text{I. 1})$$

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

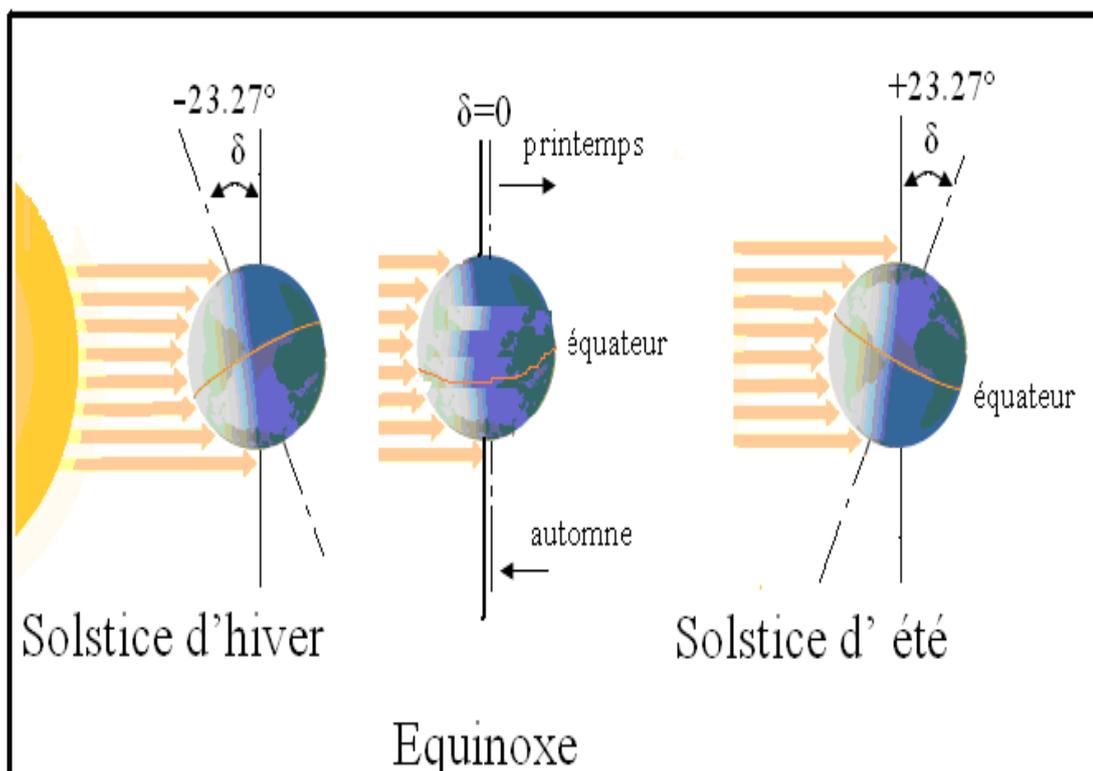


Fig I.3: La déclinaison du soleil (δ)

- **L'angle horaire noté (w) :**

C'est l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu où c'est le déplacement angulaire du soleil d'Est en Ouest du méridien local dû à la rotation de la terre autour de son axe par 15° par heure (15°/h), donné par l'expression suivante :

$$W = \frac{360}{24} (TSV - 12) \quad (I.2)$$

TSV : temps solaire vrai donné en heures.

A chaque heure qui s'écoule correspond une augmentation de l'angle horaire de 15°, soit encore 4mn de temps par ° de longitude.

I .4.2. Système horizontal :

- **L'azimut du soleil noté (a) :**

C'est l'angle que fait la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal avec la direction du sud :

- Positif quand le soleil est à l'ouest.
- Négatif quand le soleil est à l'est.

- **La hauteur du soleil notée (h) :**

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

$$\sin h = \sin L \cdot \sin \delta + \cos L \cdot \cos \delta \cdot \cos w \quad (I.3)$$

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

$$\theta_z = 90^\circ - h \quad (I.4)$$

- **Latitude du lieu (L) :**

C'est l'angle entre la position que fait le vertical du lieu avec le plan équatorial. (Positive à l'est du méridien Greenwich et négative à l'ouest).

Les angles (h) et (a) peuvent être calculés à partir de la latitude du lieu (L), de la déclinaison (δ) et l'angle horaire (w).

$$\sin a = \cos \delta \frac{\sin W}{\cos h} \quad (I.5)$$

- **Angle d'incidence (θ) :**

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

θ : est donné par la relation suivante :

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

Avec :

i : inclinaison du capteur.

γ : angle entre le méridien local et la projection de la normale au plan.

Cas particuliers :

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

$$\cos \theta_z = \cos \delta \cdot \cos L \cdot \cos w + \sin \delta \cdot \sin L \quad (I.7)$$

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

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

(I. 8)

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

$$\begin{aligned} \cos \theta &= -\sin \delta \cdot \cos L \cdot \cos \gamma + \cos \delta \cdot \sin L \cdot \cos \gamma \\ &\cdot \cos w + \cos \delta \cdot \sin \gamma \cdot \sin w \end{aligned} \quad (\text{I. 9})$$

- **Angle de réfraction (θ_r) :**

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 :

$$\frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1} = \frac{m_1}{m_2} \quad (\text{I. 10})$$

Avec :

θ_1 : angle d'incidence du rayonnement.

θ_2 : angle de réfraction.

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

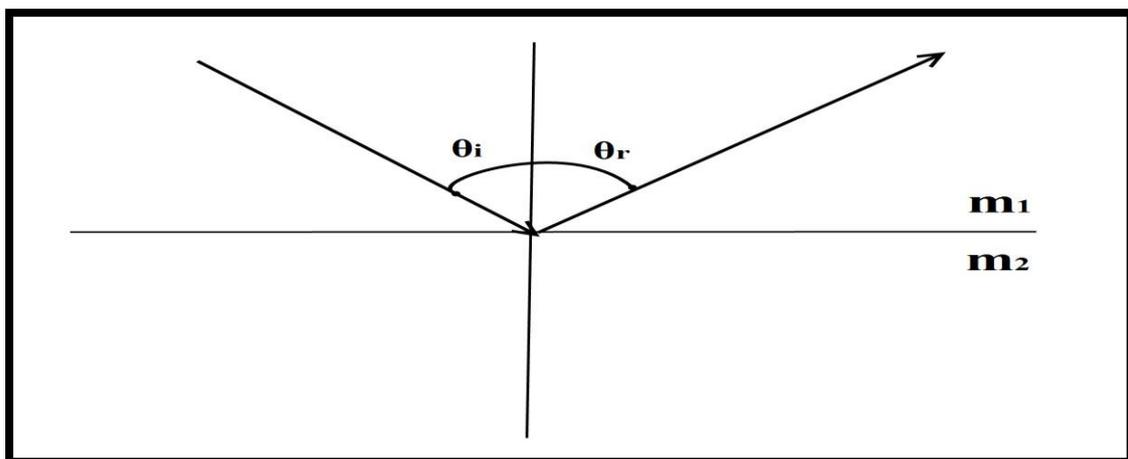


Fig I.4 : Angle d'incidence (θ_i) et Angle de réfraction (θ_r)

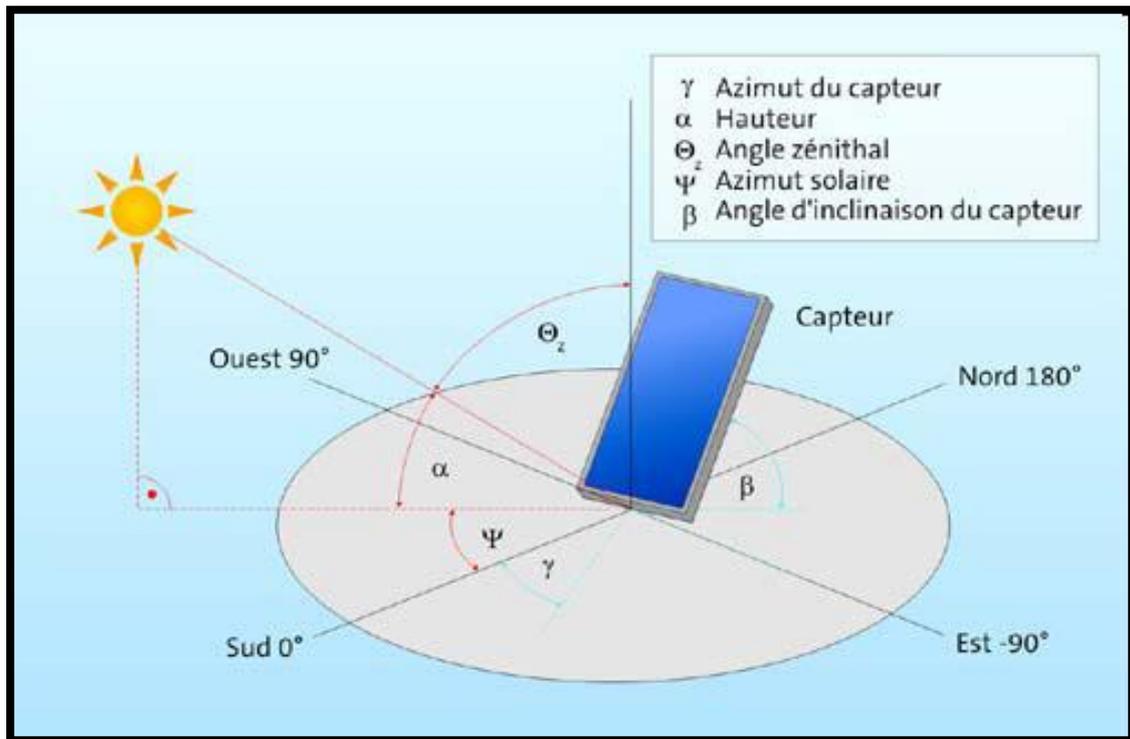


Fig I.5 : Les différents angles astronomiques

I .4.3. Temps solaire :

Le temps solaire ou temps vrai est une mesure du temps basée sur la définition de midi solaire : c'est l'instant où le soleil atteint son point de culmination, en un endroit donné de la terre.

Le temps solaire ne coïncide pas avec le temps des horloges locales, donc la relation qui lie le temps solaire au temps légal s'écrit comme suivant :

$$\text{TS} = \text{TL} - 4 (\text{L}_{\text{réf}} + \text{L}_{\text{lieu}}) + \text{E} + \text{C} \quad (\text{I. 11})$$

Ou :

TS : temps solaire.

TL : temps légal (celui des horloges). En Algérie : $\text{TL} = \text{GMT} + 1$

L_{réf} : longitude de référence. En Algérie : $\text{L}_{\text{réf}} = 0$

L_{lieu} : longitude du lieu (ou se trouve l'observateur).

C : correction sur le temps légal. Pour l'Algérie : $\text{C} = (-1)$

E : l'équation du temps donnée par :

$$E=9,87\sin 2B-7,53\cos B-1,5\sin B \quad (\text{I. 12})$$

$$\text{Ou: } B=360(n-81)/364 \quad (\text{I. 13})$$

Avec : $1 < n < 365$

n : c'est le quantième jour de l'année.

I .4.4. Les différents temps :

- **Temps légal (TL)**: C'est l'heure que nous lisons aux horloges publiques.

- **Temps universel (TU)**: $TU = TL + C$ (I. 14)
Avec ; **C**: décalage horaire.

- **Temps solaire moyen (TSM)**: Il se fait à partir de la correction de longitude.

$$TSM = TU + t \quad (\text{I. 15})$$

$$\text{Ou: } t = 24 * L / 360 \quad (\text{I. 16})$$

Avec :

t : temps en heures.

L : la longitude en degrés, ([+] à l'est et [-] à l'ouest).

- **Temps solaire vrai (TSV)** : Il se fait à partir de l'équation du temps(E).

$$TSV = TSM + E \quad (\text{I. 17})$$

- **Temps solaire vrai astronomique (TSVA)** : Il retarde de 12heures sur le temps solaire vrai.

$$TSVA = TSV - 12 \text{ h} \quad (\text{I. 18})$$

- **Durée du jour (Dj) :** Elle est donnée par les annuaires astronomiques qui indique avec précision les heures de lever et de coucher du soleil.

On peut également la calculer à partir de l'angle horaire W.

$$Dj = 2/15 * W \quad (I. 19)$$

$$\text{Ou: } W = \arccos (-\text{tg } \delta \cdot \text{tg}L) \quad (I. 20)$$

I .5 Rayonnement solaire : [5], [7]

I .5.1. Définition :

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

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

I .5.2. Les grandeurs solaires :

- **Le flux énergétique :**

C'est par définition la puissance émise, transportée ou reçue sous forme de rayonnement. L'unité est (**W/m²**).

- **L'éclairement énergétique :**

En un point d'une surface, il représente le quotient du flux énergétique reçu par un élément de cette surface.

L'unité est le watt par mètre carré (**W/m²**).

- **La constante solaire (I_0) :**

C'est l'éclairement énergétique arrivant du soleil par unité de temps, reçue par une unité de surface perpendiculaire à la direction de propagation du rayonnement à la distance moyenne terre-soleil, à l'extérieur de l'atmosphère.

Sa valeur a été mesurée (valeur moyenne annuelle) et elle est destinée avec une certaine marge d'erreur (1 à 2%) à **$I_0=1353\text{w/m}^2$** .

La variation annuelle de la distance terre-soleil, suivant la trajectoire elliptique de la terre dans sa révolution autour du soleil, se traduit par une variation de la valeur (**I_{0n}**). Cela impose une correction relative au jour (**n**) de l'année comme indiqué par l'équation :

$$I_{0n} = I_0 (1 + 0,33 \cos (360n/365)) \quad (\text{I. 21})$$

Où (**I_{0n}**) représente le rayonnement extraterrestre mesuré sur une surface normale au rayonnement au **$n^{\text{ième}}$** jour de l'année.

- **L'irradiation :**

C'est par définition l'intégral dans le temps de la fonction éclairement énergétique.

Elle exprime la quantité d'énergie reçue en un temps donné. L'unité est le watt heure par mètre carré (**Wh/m^2**).

I .5.3. Le spectre de la radiation solaire :

Le spectre de la radiation solaire peut approximativement se diviser en ultraviolet (UV), lumière visible, infrarouge (IR) et grandes longueurs d'ondes (chaleur).

Les rayons		Gamme de longueur d'onde
Rayons X		0,01 à 1A
Ultraviolet	UV extrême	1 à 100A
	UV éloigné	10 à 100nm
	UV moyen	100 à 200 nm
	UV proche	200 à 300 nm
Rayons Gamma		300 à 400 nm
Lumière visible		400 à 770nm
Infrarouge	IR proche	770 à 2500nm
	IR moyen	2,5 à 30 um
	IR éloigné	30 à 300um
Ondes hertziennes	Micro-ondes	0,3 à 100mm
	Radio et télévision	0,1 à 1000m

Tab I.4 : Spectre électromagnétique

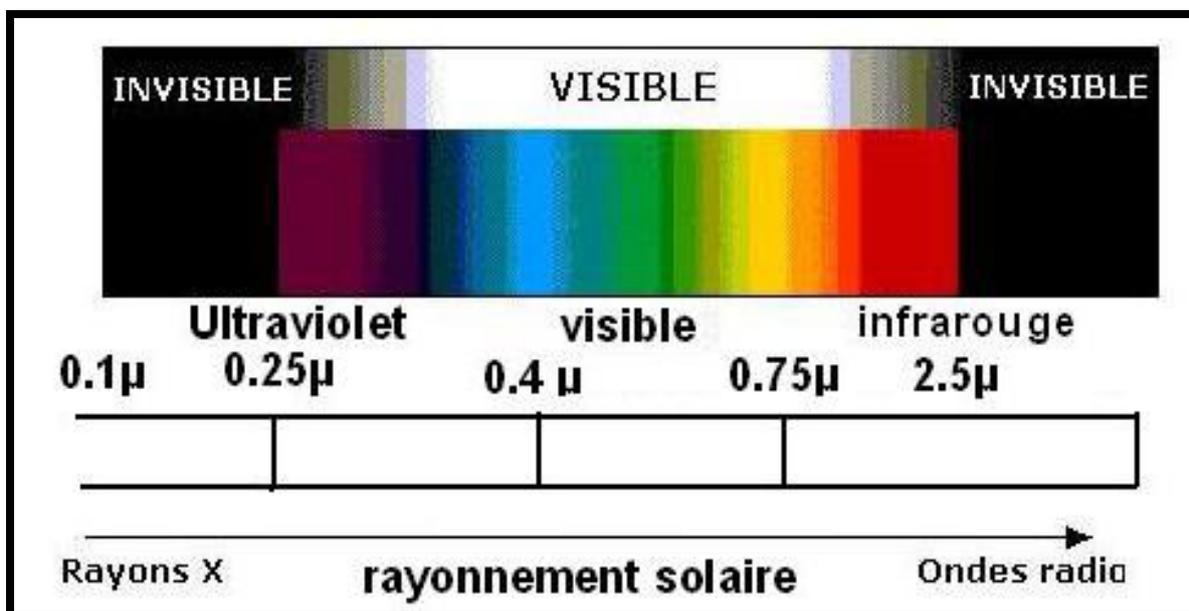


Fig I.6 : La longueur d'onde de rayonnement solaire

I .5.4. Influences de l'atmosphère sur la propagation du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire à sa traversée de l'atmosphère peut subir diverses perturbations :

- Des absorptions du côté des (U.V) et courtes longueurs d'onde par l'azote et l'oxygène et du côté de l'infrarouge par la vapeur d'eau et le CO₂ (absorption sélective).
- Des dispersions (ou diffusion) par les molécules d'air, la vapeur d'eau et la poussière.
- Des réflexions par les nuages et par le sol.

Le rayonnement global qui arrive au sol comprend alors un rayonnement direct (non perturbé dans sa propagation dans l'atmosphère) et un rayonnement diffus.

I .5.5. Les composantes du rayonnement solaire :

Nous savons que le rayonnement solaire global au sol est la sommation des distributions spectrales du rayonnement solaire direct et du rayonnement diffus.

- **Rayonnement direct :**

Rayonnement solaire sous forme de rayons parallèles provenant du disque solaire sans avoir été dispersé par l'atmosphère.

- **Rayonnement diffus :**

C'est une partie du rayonnement provenant du soleil, ayant subi de multi-réflexions (dispersion) par l'atmosphère.

Pour un observateur au sol, le rayonnement diffus semble provenir de l'ensemble des directions.

- **Notions d'Albédo :**

En réalité la terre n'est pas un corps noir, une partie du rayonnement solaire incident est réfléchi par l'atmosphère (principalement par les nuages) et par le sol terrestre. Cette quantité est appelée le flux d'Albédo.

Généralement :

- On peut calculer l'Albédo comme étant le rapport de l'énergie solaire réfléchi par une surface sur l'énergie solaire incidente.

- De plus, cette valeur peut être mesurée à partir d'un appareil appelé « Albédo mètre ».

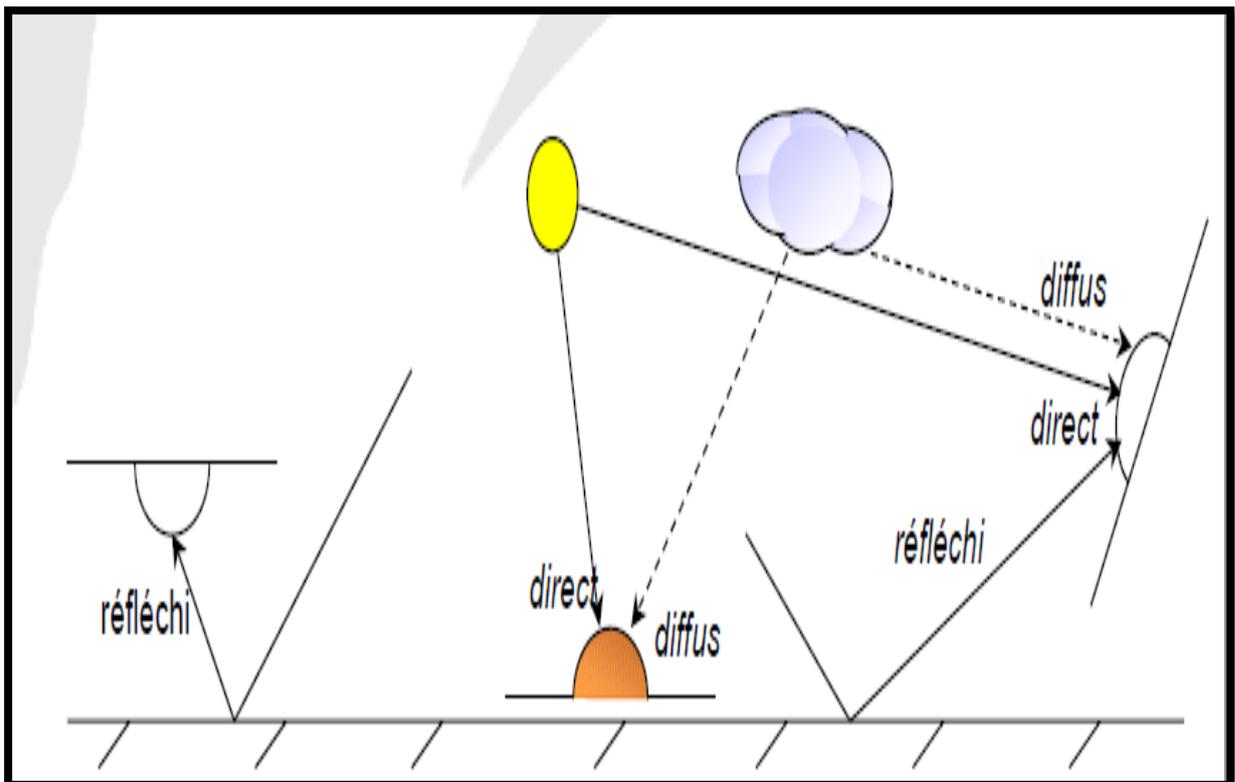


Fig I.7 : Les composantes du rayonnement solaire

I .5.6. Mesure des rayonnements solaires :

Les principaux appareils utilisés pour réaliser les mesures énergétiques relatives aux composantes du rayonnement solaire sont les suivants :

- **L'héliographe** : Un appareil mesure les périodes de la journée pendant lesquelles l'intensité du rayonnement direct a dépassé un certain seuil.
- **Le pyrhéliomètre** : Instrument mesurant le rayonnement solaire direct. L'appareil est orientable de façon que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.
- **Le pyranomètre** : Instrument destiné à mesurer le rayonnement solaire global.

I .5.7. Le calcul analytique :

Quand on ne dispose d'aucune mesure, l'estimation des différentes composantes du rayonnement solaire s'effectue par des formules empiriques :

- **Rayonnement direct** :

– Plan horizontal

$$I = 1300 \exp \left[\frac{-1}{6 \sin(h+2)} \right] ; \text{ Ciel très pur} \quad (\text{I. 22})$$

$$I = 1200 \exp \left[\frac{-1}{2.5 \sin(h+2)} \right] ; \text{ Ciel pollué} \quad (\text{I. 23})$$

Avec : h : Hauteur du soleil.

– Plan incliné

$$S = I \cos(\theta) \quad (\text{I. 24})$$

Avec : θ : Angle d'incidence.

- **Rayonnement diffus :**

- Plan horizontal

$$D = 87(\sin(h))^{0.4}; \text{ Ciel très pur} \quad (\text{I. 25})$$

$$D = 187(\sin(h))^{0.4}; \text{ Ciel pollué} \quad (\text{I. 26})$$

- Plan incliné

$$D^* = \frac{D}{1 + \sin(h)} \left[\cos^2\left(\frac{\beta}{2}\right) + \cos(\theta) \right] \quad (\text{I. 27})$$

Avec : β : Inclinaison du plan récepteur.

- **Rayonnement global :**

- Plan horizontale

$$G = I + D \quad (\text{I. 28})$$

- Plan incliné

$$G = S + D^* + R \quad (\text{I. 29})$$

Ou :

$$R = \frac{1}{2} \bar{\rho} \cdot G_h \cdot (1 - \cos(\beta)) \quad (\text{I. 30})$$

Avec :

R : Rayonnement diffus du sol.

–
 $\bar{\rho}$: Albédo du sol.

G_h : Rayonnement solaire global horizontal.

β : Inclinaison du plan récepteur.

CHAPITRE II

Caractéristiques techniques des capteurs

CHAPITRE II : Caractéristiques techniques des capteurs

II.1. Introduction : [3], [5]

Le captage de l'énergie solaire se fait par des différents dispositifs et parmi ceux-ci les capteurs solaires thermiques qui recueillent cette énergie transmise par rayonnement et la communiquent sous forme de chaleur.

Ces capteurs solaires ont presque tous le même principe de fonctionnement, mais leurs différences résident dans le choix des éléments qui les constituent.

Ces insolateurs peuvent être utilisés dans beaucoup d'applications nécessitant des températures basses, hautes et modérées, telles que pour le chauffage des locaux, le séchage (des produits agricoles, du bois, des briques, ...etc.), et faire fonctionner des moteurs thermiques.

II.2. Différents types d'un capteur solaire thermique :[8], [9]

Il existe différentes technologies de capteurs solaires thermiques de la plus rudimentaire à la plus avancée, chacune adaptée à des usages spécifiques.

Parmi les grandes familles de capteurs, on trouve : les capteurs plans non vitrés, les capteurs plans vitrés, les capteurs sous vide et les capteurs à concentration.

Ces types diffèrent considérablement en qualité, en rendement, en conception et en coût.

II.2.1. Capteur sans vitrage : (aussi appelé capteur "moquette")

Il ne comporte pas de couverture et est souvent constitué uniquement :

- d'absorbeurs (métalliques ou en plastique).
- de faisceaux de tubes cylindriques ou ovalisés parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

Les pertes thermiques étant dans ce cas élevées.

Il est peu sensible à l'angle d'incidence du rayonnement.

Les températures courantes de fonctionnement ne dépassent jamais 30°C, ce qui limite leur emploi :

- au chauffage des piscines.
- au préchauffage d'eau chaude.

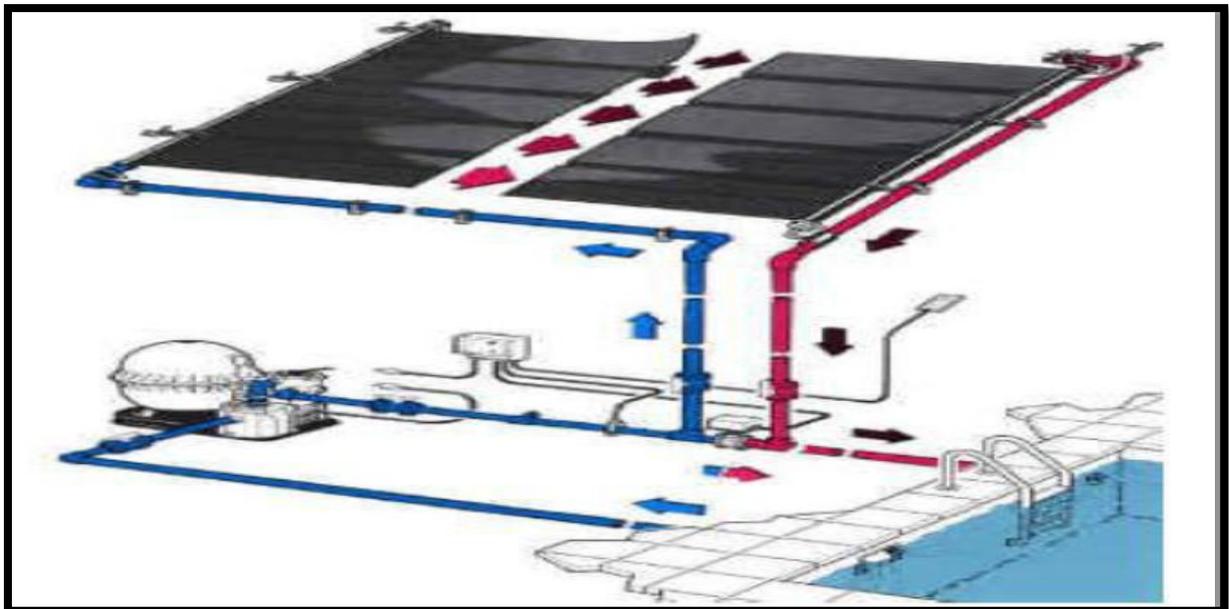


Fig II.1: Schéma d'un capteur sans vitrage



Fig II.2: Photo représentant le chauffage d'une piscine par un capteur sans vitrage

II.2.2. Capteur vitré :

Le capteur muni d'une couverture transparente, souvent appelé « capteur vitré », est le plus utilisé, car il correspond au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire.

La température d'utilisation est en général inférieure à 70 °C.

Plus rarement, un capteur vitré, muni d'une couverture transparente de type « double vitrage », permet d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C.

Le capteur vitré est constitué de différents composants :

- le coffre.
- l'isolation thermique.
- l'absorbeur.
- la couverture transparente.

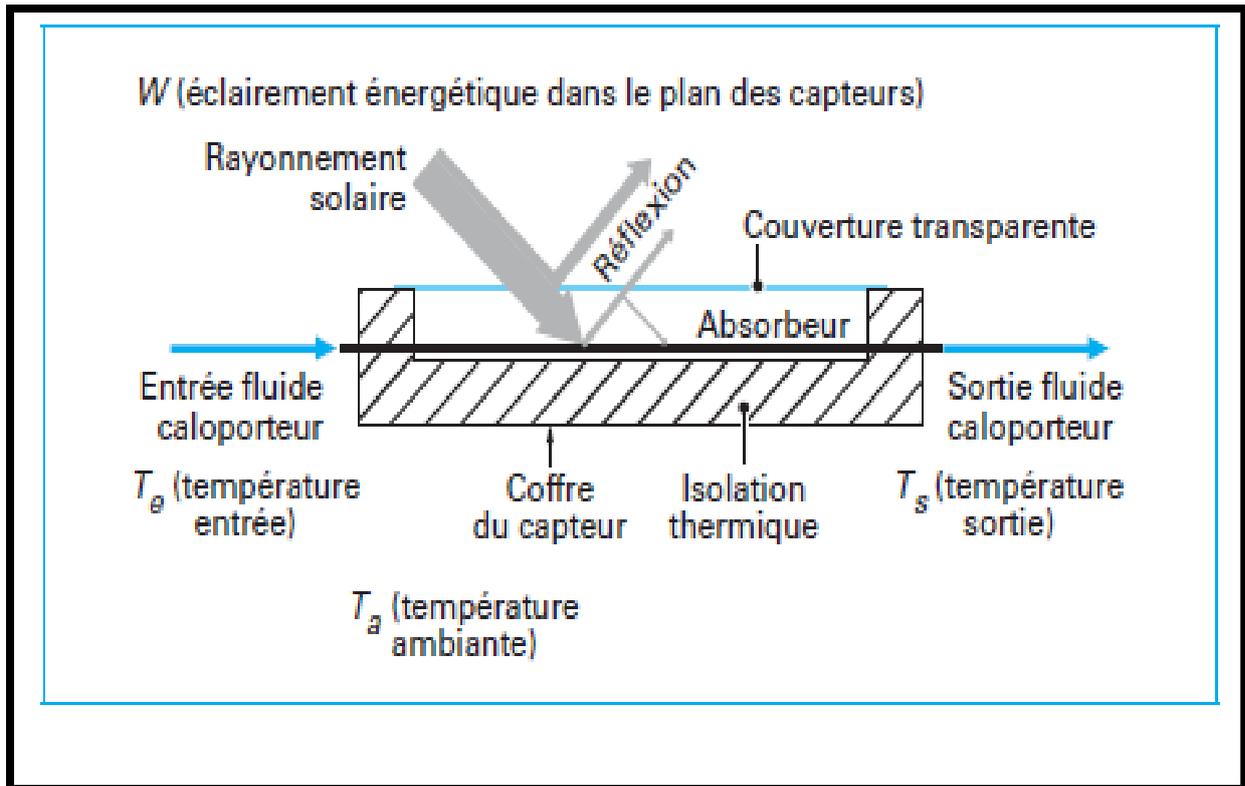


Fig II.3: Schéma d'un capteur vitré

II.2.3. Le capteur sous vide

Ce type de capteur utilise le vide comme isolation thermique, il possède donc un très bon rendement à hautes températures. Il est composé :

- D'une série de tubes de verre sous vide, de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres).
- D'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre.
- Des tubes en cuivre à l'intérieur d'un tube de verre. Ces tubes en cuivre sont parcourus par un fluide caloporteur (eau + antigel). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur par convection sont fortement réduites. Ceci permet de chauffer l'eau à une température comprise entre 85°C et 100°C.

De telles températures élevées sont requises pour des applications industrielles utilisant de l'eau très chaude ou de la vapeur.

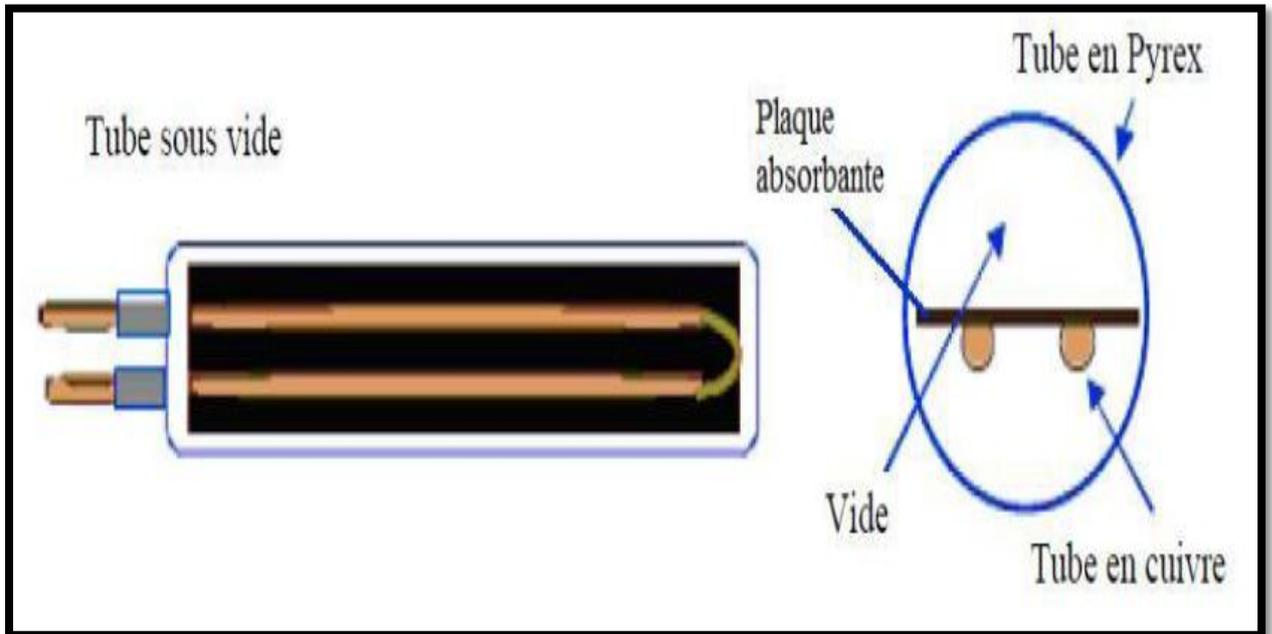


Fig II.4: Les composants d'un capteur sous vide

II.2.4. Le capteur à concentration

Ce mode de captation de l'énergie solaire est réalisé par la concentration géométrique qui concentre les rayons solaires dans une zone locale, ainsi l'énergie reçue par l'unité de surface, dans cette zone sera beaucoup plus importante.

On distingue deux types de système :

- **Système à réflecteur cylindro-parabolique**

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne locale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400 °C et peuvent produire de la vapeur afin de produire de l'électricité.

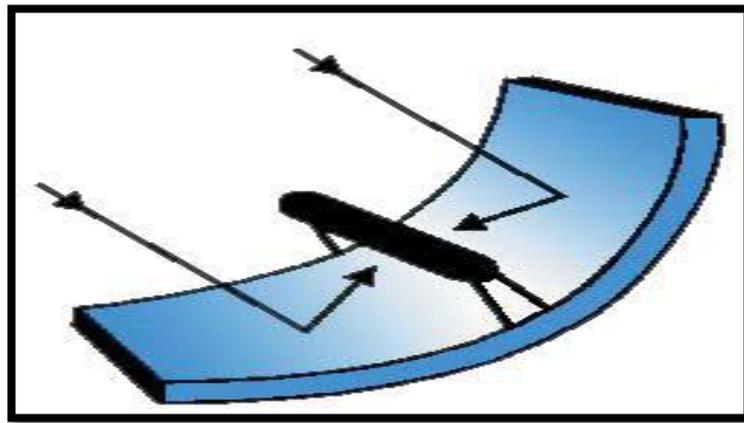


Fig II.5: Système à réflecteur cylindro-parabolique

- **Système à réflecteur parabolique**

Un système à réflecteur parabolique utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du réflecteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1 000 °C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur. À l'instar du réflecteur cylindro-parabolique, le réflecteur parabolique suit aussi les mouvements du soleil.

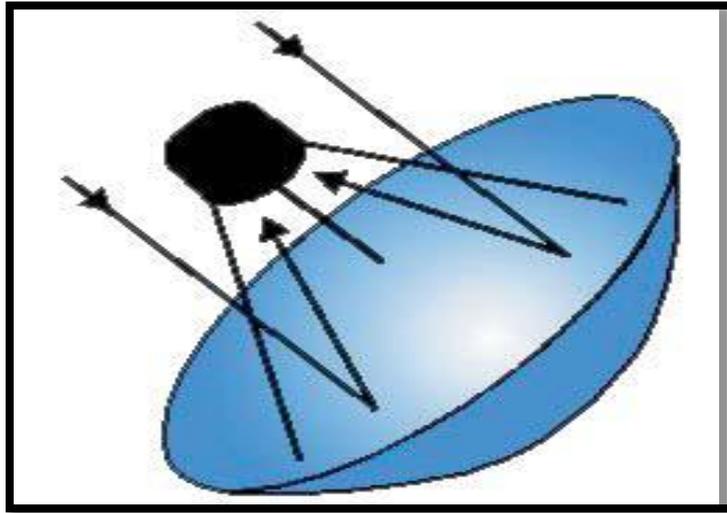


Fig II.6: Système à réflecteur parabolique

II.3. Les capteurs solaires plans : [10]

Les capteurs solaires plans convertissent l'énergie solaire reçue par rayonnement en énergie thermique exploitable à l'aide d'un fluide caloporteur (gaz ou liquide) en écoulement qui emporte cette énergie par convection à travers la surface d'échange thermique.

On distingue deux catégories :

- Capteur plan à eau.
- Capteur plan à air.

II.3.1. Capteur plan à eau

Dans les capteurs thermiques à eau, l'eau ou plus souvent un liquide caloporteur, circule dans des tubes en circuit fermé.

Pour obtenir un meilleur rendement, les tubes peuvent être "sous-vide" c'est-à-dire que la surface des tubes est double et

qu'entre ces deux couches est fait le vide. Ceci permet d'obtenir un effet de serre.

Les capteurs solaires thermiques peuvent également se résumer à une simple surface vitrée sous laquelle circule le liquide caloporteur dans un circuit fermé.

Ce système représente la première technologie de capteurs, la moins performante actuellement. L'absorbeur est alors placé à l'intérieur du tube ou sous la plaque vitrée, il est chauffé par le rayonnement solaire et transmet la chaleur au liquide caloporteur qui circule dans les tubes.

Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) dans un chauffe-eau solaire individuel (CESI).

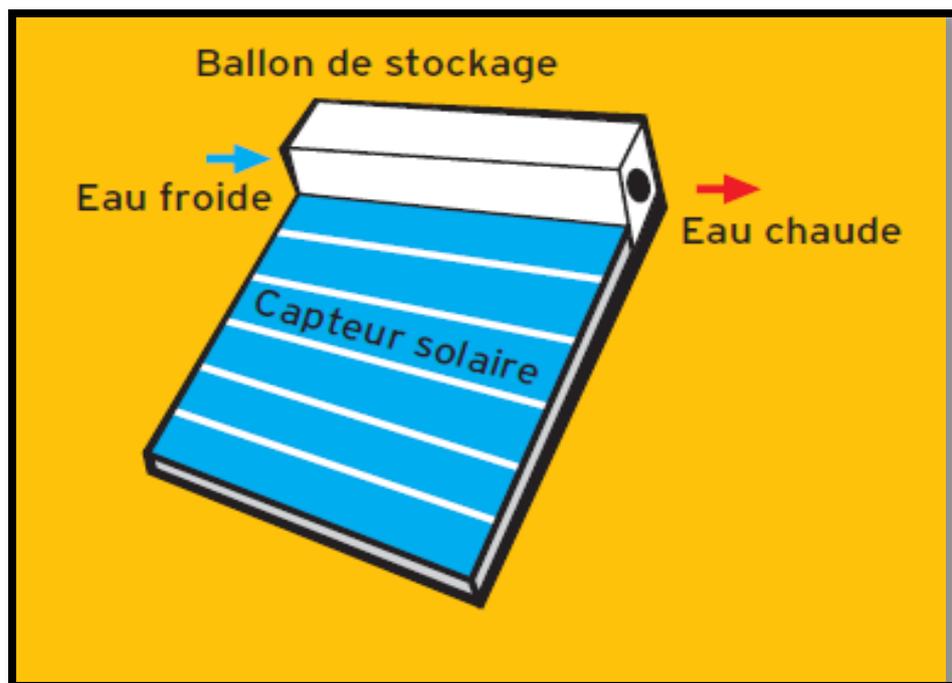


Fig II.7: Schéma d'un capteur plan à eau



Fig II.8: Photo représentant un Chauffe-eau solaire

II.3.2. Capteur plan à air : (capteur aérothermique)

Les capteurs plans à air sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évitent le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur. C'est le principe de « l'effet de serre ».

Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

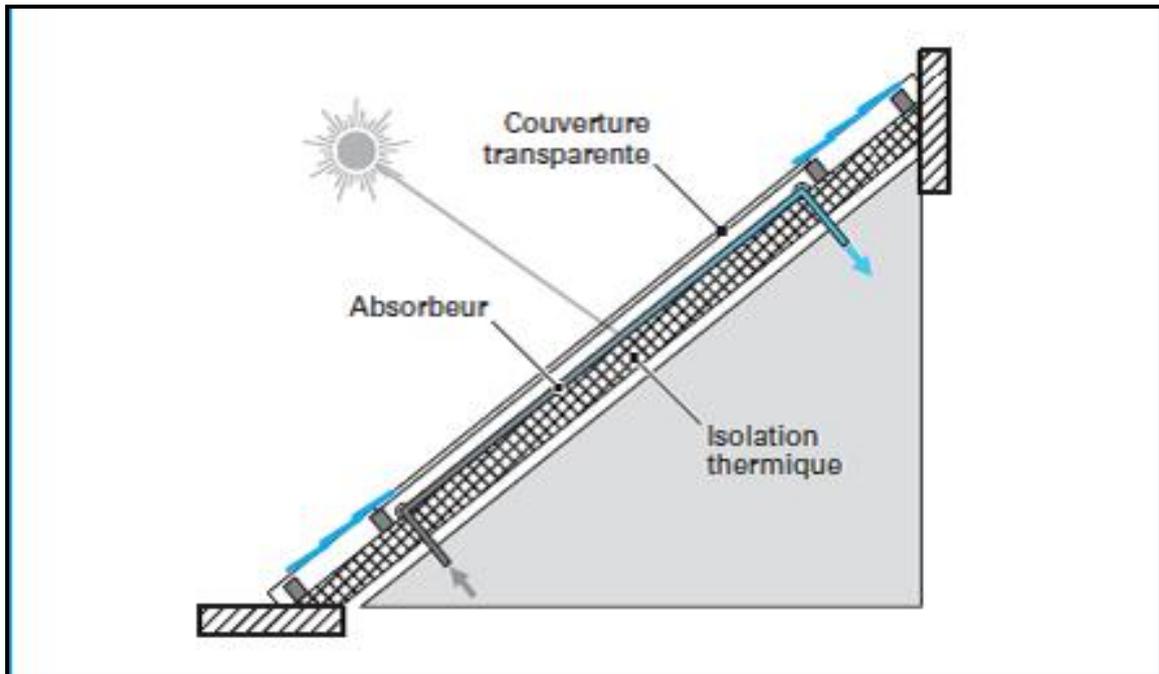


Fig II.9: Schéma d'un capteur plan à air incliné



Fig II.10: Photo représentant un Chauffage d'habitat par un capteur plan à air

II.4. Principaux composants et différentes caractéristiques d'un capteur plan à air :[8], [9]

II.4.1. Les couvertures :

L'utilisation des couvertures transparentes permet de réduire les pertes thermiques par convection et par rayonnement vers l'extérieur, et elle permet aussi de piéger le rayonnement.

On distingue deux types de couvertures transparentes :

– Le verre :

Ce type de couverture laisse passer entre 84% et 92 % du rayonnement solaire sous une incidence normale, pour une lame de verre de 3mm d'épaisseur, la transmission du verre au rayonnement solaire dépend de la teneur de ce matériau en oxyde de fer (Fe_2O_3), qui absorbe éventuellement les rayonnements de grandes longueurs d'onde de la lumière solaire, et colore en vert 1 tranche des vitres, les expressions montrent que c'est pour des faibles quantités en (Fe_2O_3) qu'on espère obtenir de bonnes valeurs de transmission de l'ordre de 92 %.

Le verre reste le matériau de prédilection. Il peut cependant subir des transformations afin d'améliorer ses qualités.

Le verre trempé a une très bonne résistance aux chocs (chute de grêle). L'ajout de couches d'oxydes métalliques permet d'obtenir des verres sélectifs qui retiennent d'autant mieux les infrarouges (effet de serre).

Il est possible d'obtenir des verres à haute transmission énergétique ($t = 0,92$) en éliminant la plupart des oxydes de fer lui donnant sa couleur verte.

On utilise aussi des verres polis ou prismes qui réfléchissent moins les rayonnements dont les angles d'incidences sont supérieurs à 45° .

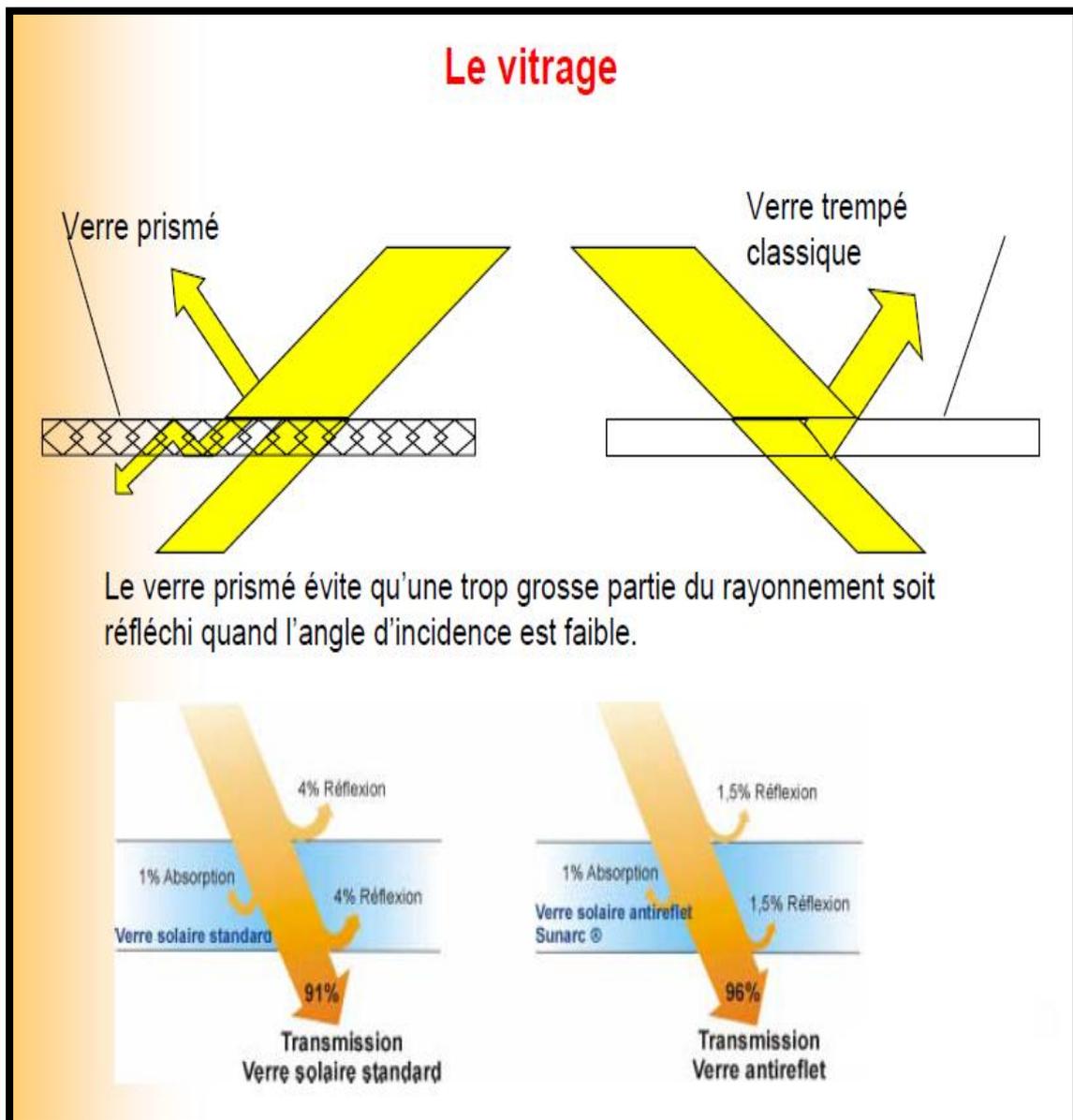


Fig II.10: Schéma représentant les différents facteurs (Transmission, Absorption et Réflexion) dans le verre

– Polycarbonates :

Sont des dérivés de matière plastique à double et à triple lames très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant, leur coefficient de transmission au rayonnement solaire est de l'ordre de 83 % sous une incidence normale à l'état neuf qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans).

Les polycarbonates présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs mécaniques et une faible densité, qui leur permettent d'avoir une faible inertie thermique.

Matériaux	Transmissivité à incidence normale	
	Gamme de longueur d'onde : 0,4 – 2,5 μm	Gamme de longueur d'onde : 2,5 – 4 μm
Le verre	0,83 – 0,91	0,00 – 0,03
Les plastiques en feuilles	0,76 – 0,92	0,02 – 0,06
Les plastiques en films	0,85 – 0,87	0,2 – 0,26

Tab II.1: Transmissivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible de l'infrarouge.

II.4.2. Absorbeur :

L'absorbeur est l'élément principal dans le fonctionnement d'un capteur plan, c'est une surface constituée d'un corps noir de trois fonctions :

- Absorber le rayonnement solaire,
- Le transformer en chaleur,
- Transmettre cette chaleur au fluide caloporteur,

Le choix d'un absorbeur revient à l'analyse de :

- Facteur d'absorption aussi voisin que possible de l'unité.
- Pouvoir émissif dans l'infrarouge aussi faible que possible.
- Bonne conductivité thermique.
- Faible inertie thermique.

Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation); cette surface doit être douée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevée possible.

Couleur	α	ρ	ε	α/ε
Peinture blanche	0,2	0,8	0,91	0,22
Peinture vert	0,5	0,5	0,9	0,56
Peinture noire	0,96	0,04	0,9	1,00

Tab II.2: Absorption, réflectivité et émissivité des différentes couleurs de surface

Les matériaux utilisés sont :

- Le cuivre : c'est le meilleur absorbeur, mais le plus coûteux.
- L'aluminium : sa légèreté et sa conductivité sont appréciables, il est parmi les métaux qui résiste à la corrosion grâce à la couche d'alumine (AL₂O₃) ou (ALO), sa surface est recouverte d'une couche mince de peinture noir, afin d'augmenter le pouvoir d'absorption.
- Les matières plastiques : ont l'avantage par rapport aux métaux, d'être plus légères et insensibles à la corrosion.

Matériaux	Température en °C	Conductivité thermique (λ) en <i>W/m.K</i>
Aluminium	100	0,49
	200	0,55
Cuivre	20	0,934
	100	0,908
	200	0,890
Magnésium	100	0,370

Tab II.3: Conductivité thermique λ des différents absorbeurs

II.4.3. Fluide caloporteur :

La chaleur collectée par l'absorbeur est transportée par l'intermédiaire du fluide d'échange thermique : appelé fluide caloporteur qui est soit de l'air.

Les capteurs solaire plans à air présentent de faibles performances thermiques comparativement aux capteurs à liquide, mais ils ont un avantage par rapport à ces derniers qui est l'absence des problèmes de gel et de corrosion et la facilité des

travaux d'entretien ce qui donne au capteur une durée de vie importante.

II.4.4. Isolant :

Il permet de diminuer les pertes et ralentit le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- Une faible conductivité thermique.
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de services.

Désignation	$\lambda(W/m.K)$	$\rho(Kg/m^3)$	Température maximale d'utilisation	Observation
Laine de verre	0.034 à 0.053	70	150	Sensible à l'humidité
Mousse de verre	0.57	123	150	Sensible à l'humidité
Bois	0.13 à 0.4	123	150	
Liège exposé	0.045	100		
Polystyrène	0.042	15	85	Moulé comprimé
Polyuréthane	0.035	35	85	Moulé comprimé

Tab II.4: Conductivité thermique λ , volume massique, Température maximale d'utilisation des différents isolants.

II.5 Les catégories d'un capteur solaire à air :[11], [12]

Plusieurs types de capteurs à air ont été construits et testés à travers le monde.

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

II.5.1. Capteur solaire à absorbeur rainuré

On peut augmenter la surface d'échange de chaleur soit en donnant un pouvoir émissif élevé au dos de l'absorbeur et à la face interne de l'insolation, soit en donnant à l'absorbeur une surface striée ou rainurée.

On peut, par exemple, doubler la surface d'échange de chaleur et la projection de la surface absorbante en utilisant un absorbeur strié de rainures en V avec un angle de 60° .

Le rainurage du fond du canal améliore encore l'échange de chaleur de telle sorte que sa valeur dépendra du coefficient de transfert de chaleur par convection dans le canal

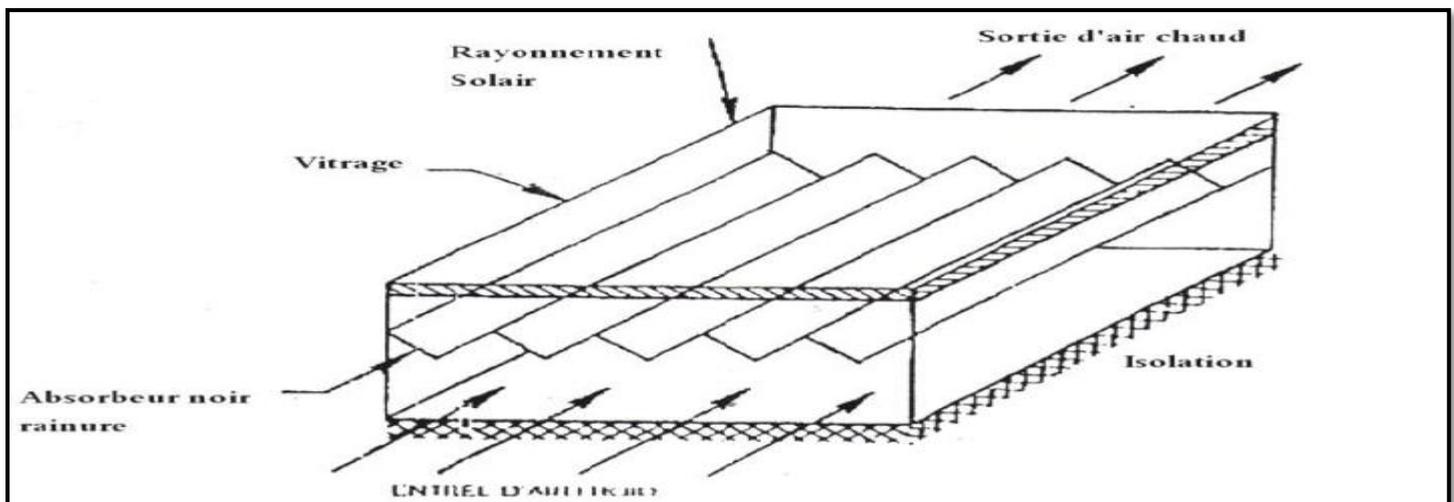


Fig II.11: Schéma d'un capteur solaire à absorbeur rainuré

II.5.2. Capteur solaire à absorbeur poreux

Il existe aussi des absorbeurs poreux qui permettent l'amélioration du rapport de la surface d'échange sur projection de la surface d'absorbeur. On peut employer à cet effet du tissu noir de la fibre de verre noircie, des écrans rainurés et étirés de la laine d'acier ou des assemblages des lamelles comme le montre la figure :

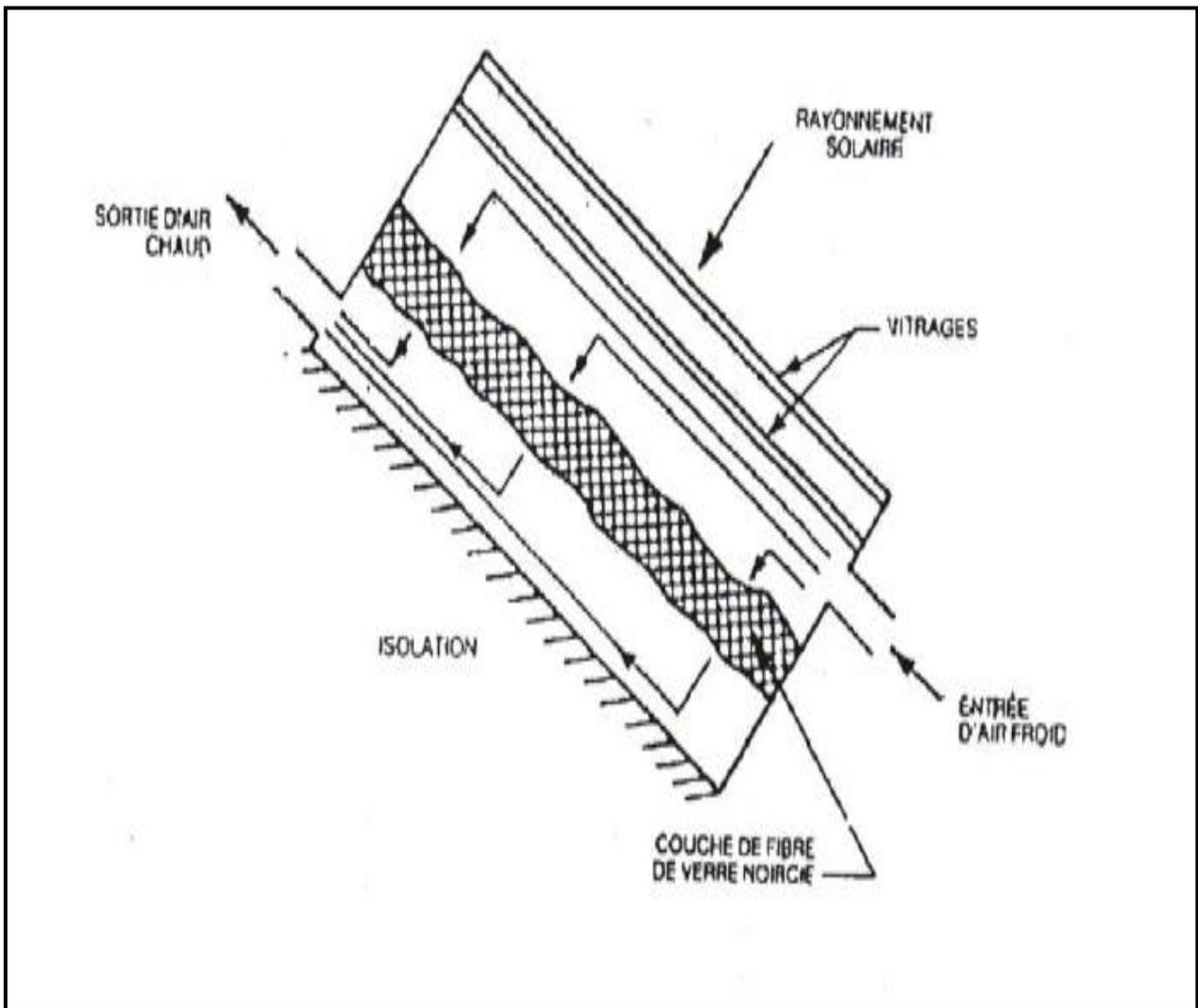


Fig II.12: Schéma d'un Capteur solaire à absorbeur poreux

II.5.3. Capteur solaire à nids d'abeille

Le capteur solaire à nids d'abeille utilise comme intermédiaire entre le couvercle et l'absorbeur une structure en nids d'abeilles qui réduit les pertes de chaleur par rayonnement infrarouge et convection naturelle.

Le rayonnement solaire atteint l'absorbeur par transmission directe ou après réflexion sur la paroi des cellules. Le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur est intercepté par les parois des cellules construites pour absorber cette longueur d'onde, ce qui limite les pertes de chaleur par rayonnement.

La convection naturelle, c'est-à-dire le mouvement gravitaire de l'air entre l'absorbeur chaud et le couvercle froid, est très limité par les parois des cellules, ce qui limite les pertes de chaleur par convection. Il existe des capteurs à nids d'abeilles avec ou sans transpiration suivant que l'air est soutiré ou non de haut en bas à travers le nid.

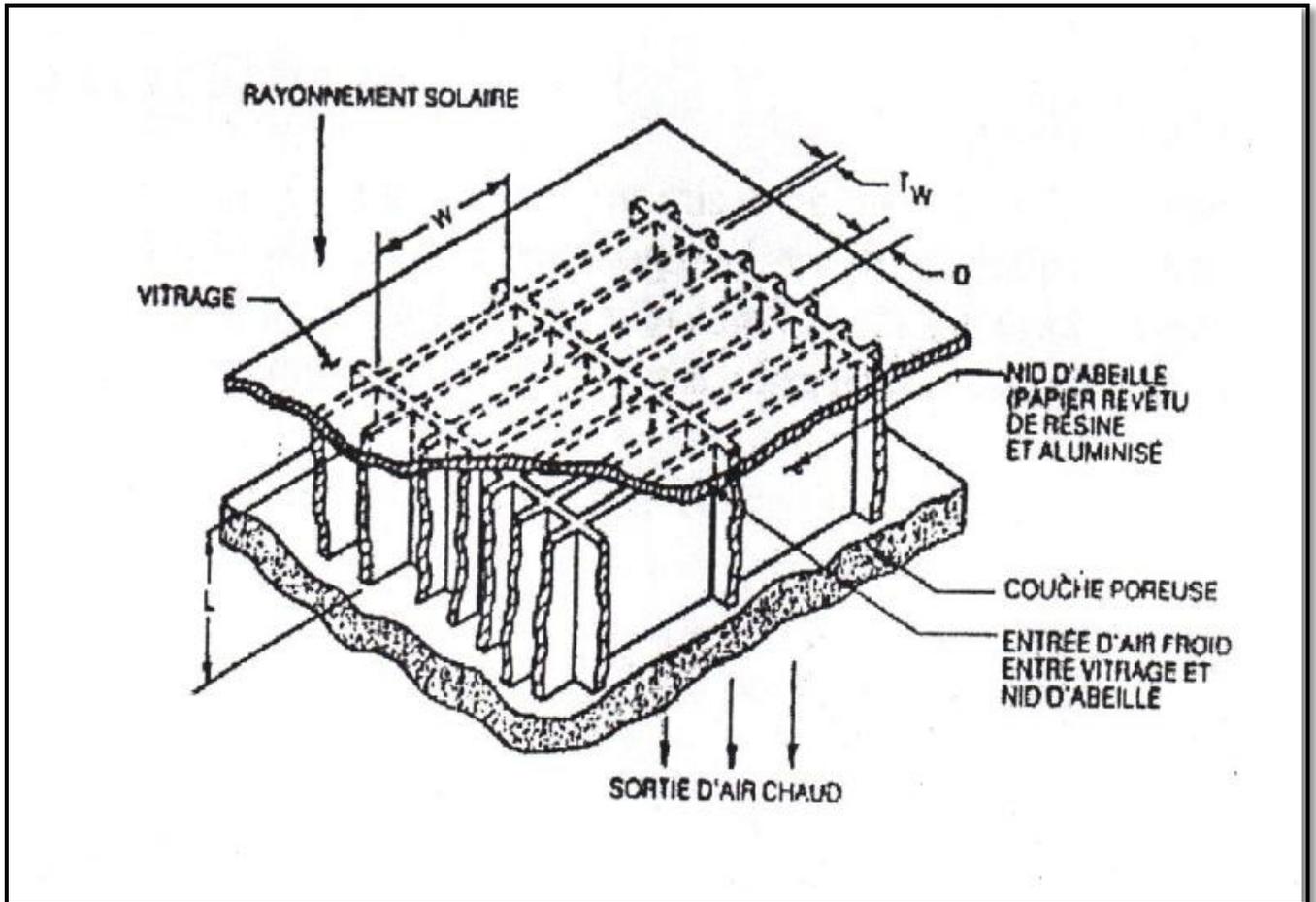


Fig II.13: Schéma d'un capteur solaire à nids d'abeille

II.5.4. Capteur solaire à absorbeur plan

Pour ce type de capteurs, l'absorbeur est une plaque en tôle plane, leur variété réside dans le nombre de vitres qui les composent et dans le nombre des veines d'écoulement d'air.

On cite plusieurs sortes de capteurs selon leur écoulement :

- Capteur plan à air à simple passage.
- Capteur plan à air à plusieurs passages.

- Capteur plan à air à simple passage

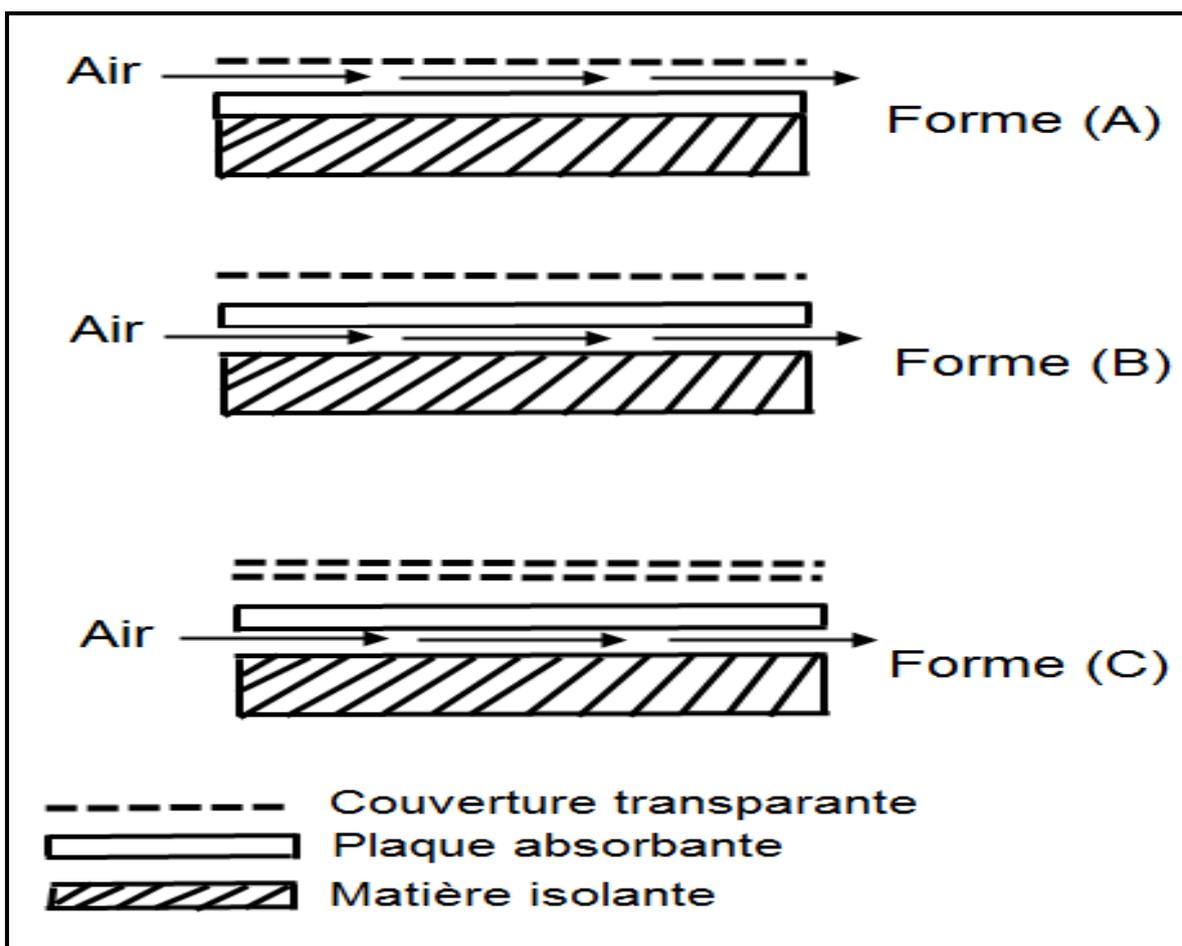


Fig II.14: Schéma représente un capteur solaire à simple passage

Les expériences montrent qu'un capteur muni d'un seul vitrage et dont l'air circule entre l'absorbeur et l'isolant (Forme B), est plus performant que celui qui a une circulation d'air entre vitrage et l'absorbeur (Forme A), cette meilleure performance est due à la présence d'une veine d'air immobile réduisant ainsi les pertes par l'avant du capteur par convection.

En modifiant ce type de capteur par utilisation d'une double couverture transparente (Forme C), on constate que la performance ne peut que s'améliorer.

• **Capteur plan à air à plusieurs passages**

En fait, il s'agit de deux veines mobiles.

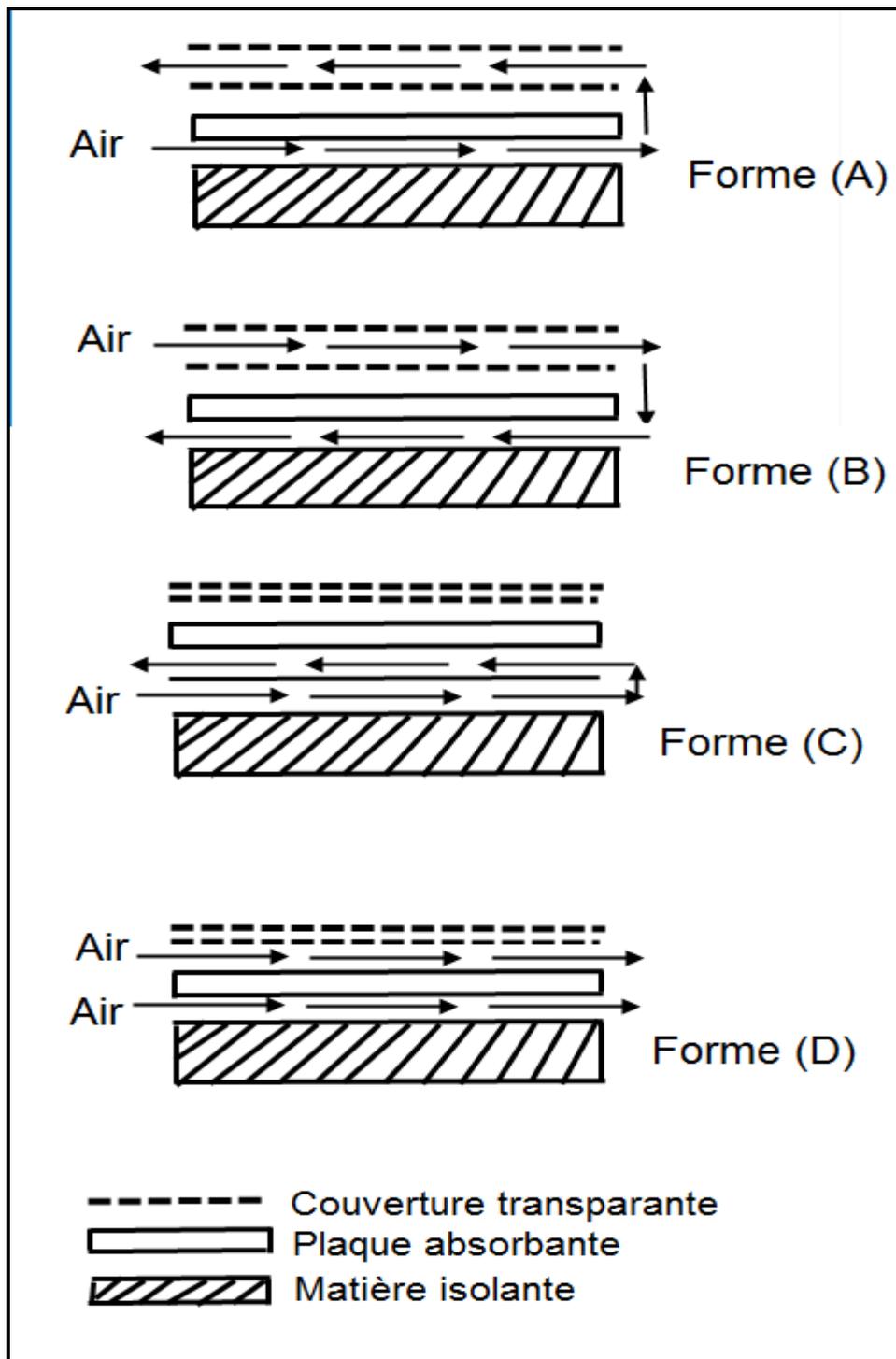


Fig II.15: Schéma représente un capteur solaire à plusieurs passages

L'étude des performances de ces capteurs montre que le type de capteur sur la (Forme B) présente une bonne performance par rapport aux autres.

Le type de capteur sur la (Forme D) divise le fluide caloporteur en deux tranches, présente une performance faible par rapport aux autres.

L'inconvénient des capteurs sur la (Forme A) est la création de la buée en cas où l'air contient de la vapeur d'eau, ce qui réduirait la transmissivité solaire.

Et enfin le capteur sur la (Forme C) : le passage d'air à l'inconvénient d'augmenter l'inertie.

II.5. Principe de fonctionnement :[13]

Le principe de capteur solaire à air est basé sur la réalisation de l'effet de serre :

Il repose sur le fait que le verre transmet la quasi-totalité du rayonnement solaire dont les longueurs d'onde sont grandes.

Lorsque le flux solaire traverse la vitre, il chauffe la plaque placée derrière ; celle-ci émet à son tour un rayonnement thermique de grandes longueurs d'onde (IR) qui ne peut pas traverser la vitre, il se trouve donc piégé à l'intérieur du capteur, c'est à dire :

La conversion rayonnement-chaaleur s'effectue en surface de l'absorbeur : les photons qui le frappent sont absorbés par la

matière et augmentent l'agitation des molécules, et donc la température du matériau exposé au rayonnement va s'élever.

Cette énergie accumulée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur (air) au contact thermique.

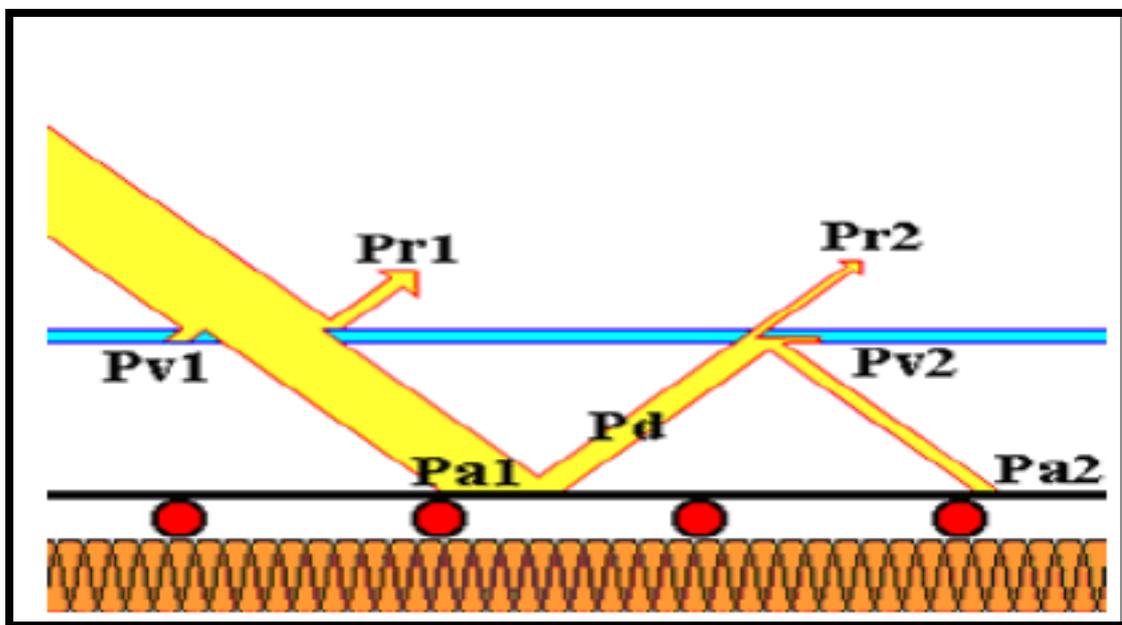


Fig II.16: Principe de l'effet de serre

Le rayonnement solaire symbolisé par les flèches jaunes, ne traverse pas entièrement le vitrage du capteur car une petite partie (Pr1) est réfléchi par la vitre, surtout si l'angle d'incidence est fort. Malgré l'excellente transparence du verre, une petite partie (Pv1) de l'énergie reçue sera absorbée par le verre.

Du rayonnement reçu par l'absorbeur, une partie (Pd) sera ré-émise ou communiquée à l'air ambiant par convection. Une partie (Pr2) de Pd va traverser la vitre et sera perdue définitivement, une autre partie (Pv2) sera absorbée par la vitre et le reste retournera vers l'absorbeur (Pa2). On négligera les pertes au travers de l'isolant.

II.6. L'influence de l'orientation, l'inclinaison et les paramètres liés au site sur le capteur solaire :[11], [14]

Les capteurs solaires plans à air sont généralement montés dans une position fixe avec une orientation et une inclinaison optimisées pour le lieu d'installation et la période de l'année projetée pour le fonctionnement.

Dans la pratique, et suivant les usages souhaités de l'énergie solaire, on adoptera les règles suivantes :

- **L'emplacement du capteur** : où les capteurs doivent être placés de façon à éviter les obstacles (l'effet de masque), qui empêche le rayonnement solaire d'atteindre la surface de captation.
- **L'orientation** : elle dépend essentiellement du fonctionnement du capteur pendant la journée, où on distingue :
 - Fonctionnement pendant la matinée → orientation Est ;
 - Fonctionnement pendant l'après-midi → orientation Ouest ;
 - Fonctionnement durant toute la journée → orientation Sud.
- **L'inclinaison** ; elle dépend du fonctionnement du distillateur pendant l'année :
 - Fonctionnement estival → Angle d'inclinaison =Latitude-10°
 - Fonctionnement hivernal→Angle d'inclinaison =Latitude+20
 - Fonctionnement annuel →Angle d'inclinaison =Latitude+10°

En plus, en tenant compte les paramètres liés au site, comme :

- Les paramètres géographiques tels que la longitude, la latitude et la hauteur du soleil.

- Les paramètres météorologiques dont les plus fréquemment retenus sont : l'intermittence des nuages, le pourcentage du rayonnement diffus, le vent et la température ambiante.
- La nature et situation socio-économique du site : choix des matériaux, degré d'automatisme du système, infrastructure et la main d'œuvre.

II.7. Les applications d'un capteur solaire plan à air :[4], [15], [16]

Le flux solaire peut être directement converti en chaleur par l'intermédiaire des différents capteurs solaires thermiques. Cette technique est applicable en chauffage des habitations, séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits), Ou encore faire fonctionner des moteurs thermiques.

Pour cela on constate :

- Le séchage solaire.
- La production de chaleur pour l'habitat.
- Production de l'énergie mécanique (Moteur STIRLING).

Le séchage solaire :

La technique du séchage solaire répond aux exigences du développement durable, qui tient compte à la fois des conditions économiques, socioculturelles et environnementales pour le respect des générations futures.

Le séchage est, soit un moyen de conservation, soit une étape dans la transformation de certains produits. Il est utilisé dans le monde rural et dans le monde industriel à travers l'agro-alimentaire.

Les séchoirs solaires sont faciles à construire avec des outils et des matériaux localement disponibles et peuvent fonctionner par convection naturelle.

Le séchage nécessite de l'énergie et de la chaleur dépendant de la teneur en humidité de l'air, du système de séchage utilisé, de la température de séchage, des spécificités du produit concerné (épaisseur, superficie et résistance à l'air) et de l'humidité dans l'élément à sécher.

Le fonctionnement du séchoir dépendra directement de la quantité d'irradiation et de l'humidité du lieu d'utilisation.

La production de chaleur pour l'habitat :

On peut obtenir directement de la chaleur à partir de l'énergie solaire ; il suffit d'exposer au rayonnement solaire un corps qui chauffe et qui peut échanger de la chaleur avec un système adapté pour chauffer des maisons. Pour cela, on utilise :

Un mur Trombe-Michel (chauffe uniquement la maison).

Le mur Trombe-Michel :

Il doit son nom au Professeur Félix Trombe, célèbre pour ses travaux sur les fours solaires.

Le mur Trombe-Michel est un système directement incorporé au mur d'une maison. Une des parties d'un mur extérieur est remplacé par du double vitrage derrière lequel est situé un mur de béton (le mur de béton se trouve donc dans la maison).

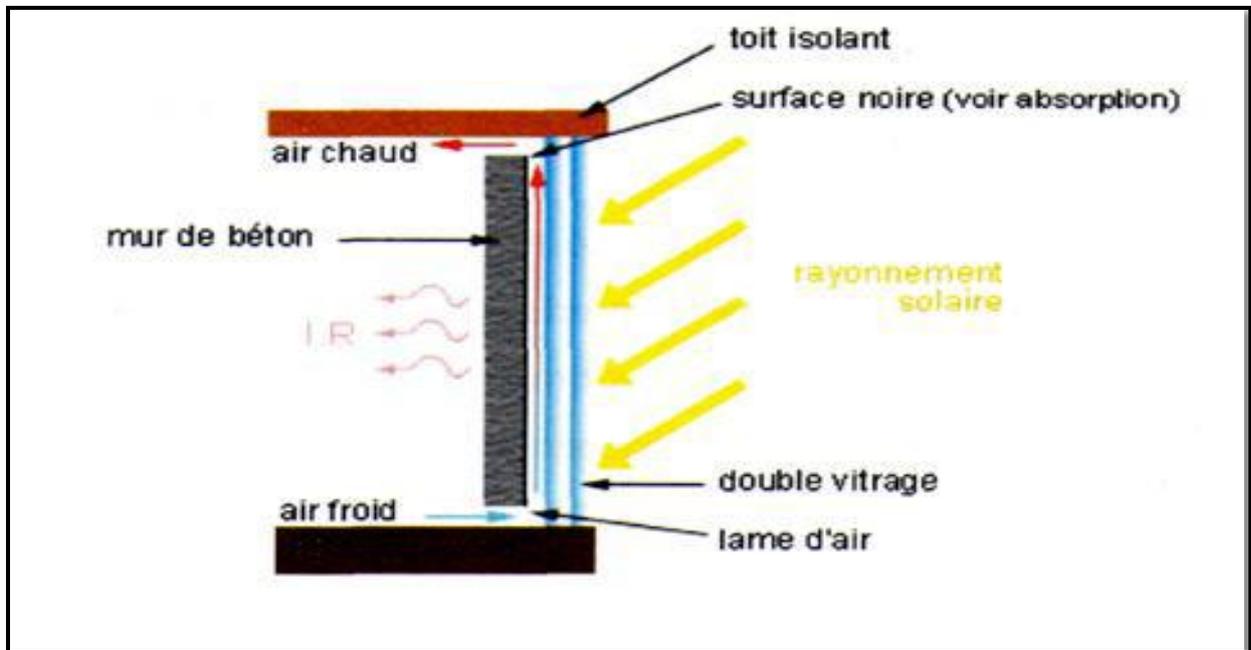


Fig II.17: Schéma représente le mur Trombe-Michel

C'est encore le principe de l'effet de serre qui est utilisé ; le mur capte la chaleur et on utilise une partie pour chauffer l'air situé entre le mur de béton et le double vitrage.

L'air chaud étant moins dense que l'air froid, il monte. C'est cette circulation qui assure le chauffage de la maison (dans la pièce, l'air froid est chassé par l'air chaud entre le mur et le double vitrage).

L'épaisseur du mur est telle qu'elle permet de conserver une partie de la chaleur absorbée durant le jour et de la restituer plus tard (la nuit par exemple). Donc le chauffage se fait :

- Soit directement par l'air ;
- Soit par rayonnement lent (infrarouge) : le mur transmet lui-même par rayonnement (IR) à l'air de la maison une partie de la chaleur qu'il a reçue du soleil.

Production de l'énergie mécanique (Moteur STIRLING)

Le moteur Stirling, appelé parfois moteur à combustion externe ou moteur à air chaud est inventé en 1816 dont on reparle de plus en plus aujourd'hui.

Le moteur de Stirling a été inventé pour répondre aux besoins actuels et futurs de moteurs moins polluants, à meilleur rendement, et plus silencieux que les moteurs existants, leur principe consiste à comporter une chambre étanche dans laquelle le gaz emprisonné était chauffé d'un côté et refroidi de l'autre.

Les variations de pression ainsi produites conféraient au piston un mouvement de va et vient entraînant la pompe via la bielle bas.

Dans le cylindre (ou partie de celui-ci) chauffé se trouve le piston «déplaceur» relié via la bielle à un vilebrequin lui-même accouplé à un volant.

Le gaz de travail chauffé pousse le «déplaceur» vers le haut et actionne ce faisant un deuxième piston, le piston de travail, vers le haut - dans le même cylindre ou dans un deuxième cylindre selon la construction. De ce fait, le piston de travail chasse le gaz froid présent vers le bas.

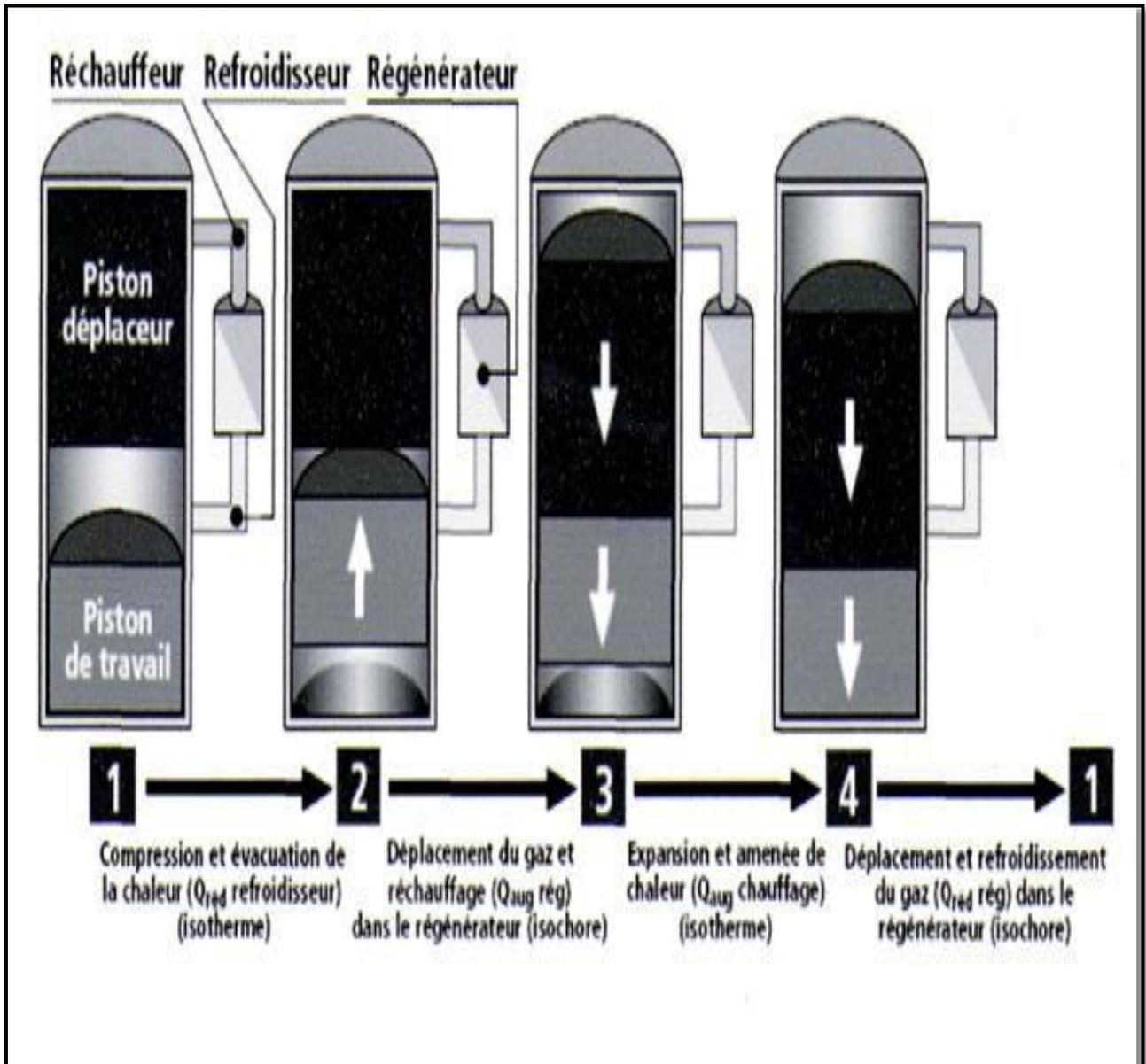


Fig II.18: Schéma représente le Moteur STIRLING

Le piston de travail a lui aussi une bielle qui est accouplée au même vilebrequin. Le décalage des bielles de 90° réduit le volume de gaz de travail dans l'espace froid et l'agrandit dans l'espace chaud. Le déplaceur devance donc toujours d'un quart de tour le piston de travail.

Le cycle du moteur de Stirling est constitué de deux isochores (volume constant) et de deux isothermes. Dans le plan p (pression), V (volume), ce cycle a l'allure suivante:

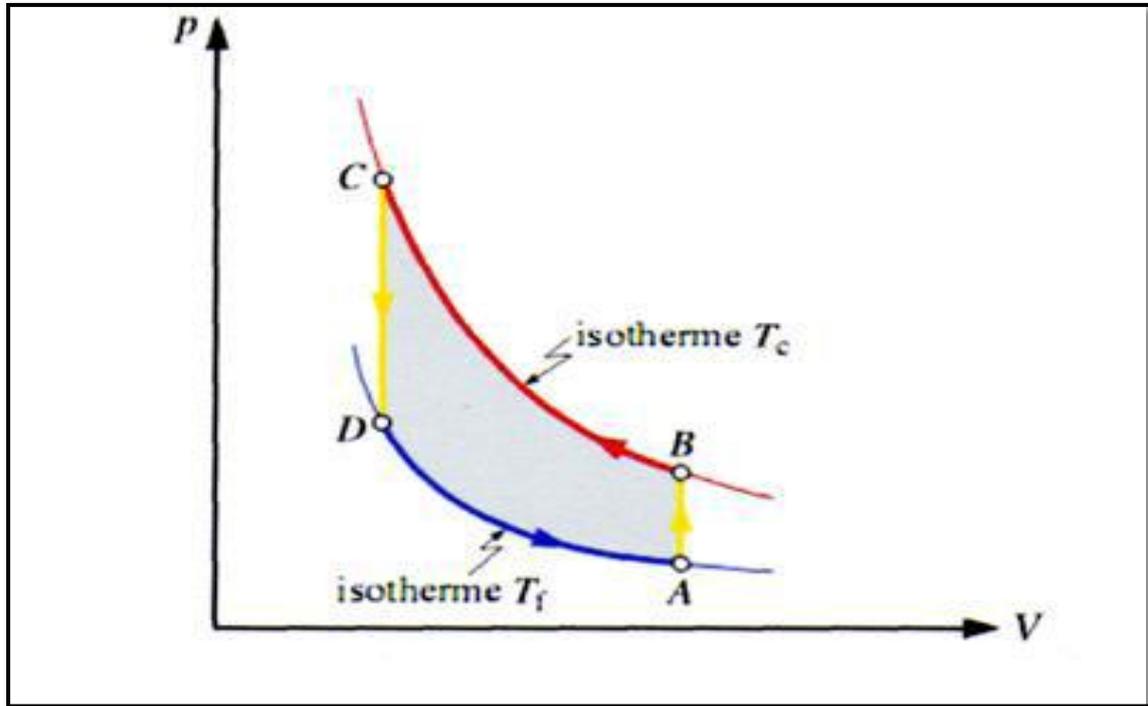


Fig II.19: Le cycle du Moteur STIRLING

II.8. Conclusion

La chaleur du soleil nous parvient à travers les couches de l'atmosphère, donc de l'air.

Or, malgré ses faibles caractéristiques thermo-physiques, l'air peut facilement être utilisé comme fluide caloporteur, dans un système insolateur, vitré ou non. Il est donc capable de contribuer directement au chauffage partiel des locaux, au préchauffage des systèmes de ventilation ou encore au séchage de nombreux produits agro-alimentaires.

CHAPITRE III
Étude Théorique

CHAPITRE III : Étude Théorique

III.1 Introduction [17]

Les capteurs solaires fonctionnent dans les états équilibrés (régime thermique établi).

Dans ces conditions, la résolution des équations des transferts thermiques peut être réalisée par des méthodes numériques ou par méthodes dites approximatives basées sur des corrélations empiriques.

III.2 Comportement des corps vis-à-vis du rayonnement : [5]

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

- La réflexivité (ρ)

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

- L'absorptivité (α)

$$\alpha = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie incidente}} \quad (\text{III. 2})$$

- La transmissivité (τ)

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

On pourra remarquer que pour tous les corps : $\alpha + \rho + \tau = 1$ (III.4)

Cas particuliers :

$\rho = 1$ miroir parfait

$\tau = 1$ transparent parfait

$\alpha = 1$ corps noir parfait

III.3 Préliminaires : [5], [18]

III.3.1 Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, 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 et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\Phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} (T) \quad (\text{III.5})$$

ou sous forme algébrique :

$$\Phi = -\lambda S \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W}) \quad (\text{III.6})$$

avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par conduction (W)

λ : Conductivité thermique du milieu (W/ m. °C)

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

S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m²)

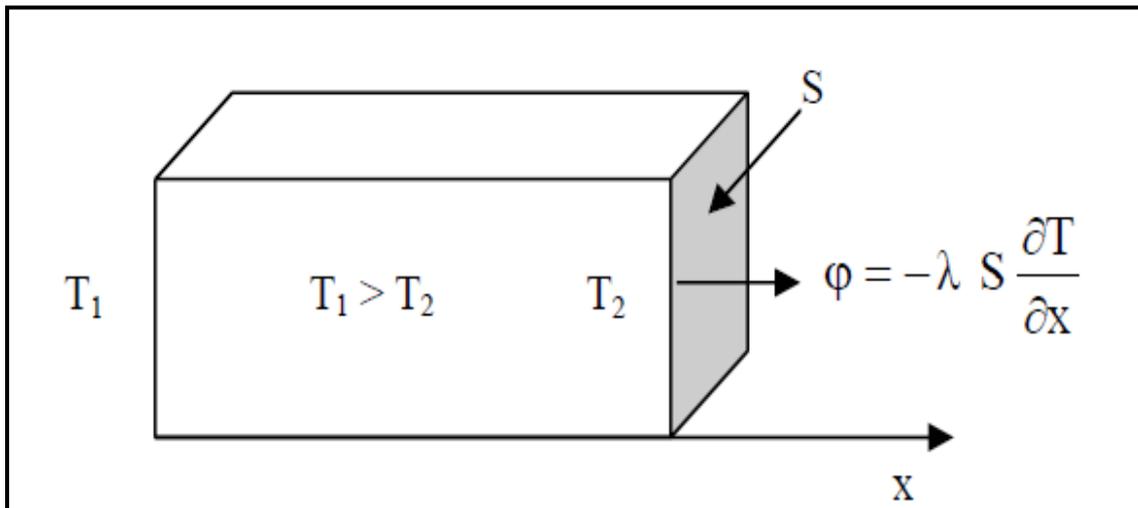


Fig III.1: Schéma représente le principe de la conduction

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

Matériau	λ (W/m °C)	Matériau	λ (W/m °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 λ de certains matériaux.

III.3.2 Convection

C'est le transfert de chaleur entre un solide et un fluide, l'énergie étant transmise par déplacement du fluide.

Ce mécanisme de transfert est régi par la loi de NEWTON :

$$\Phi = h S (T_p - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (\text{III.7})$$

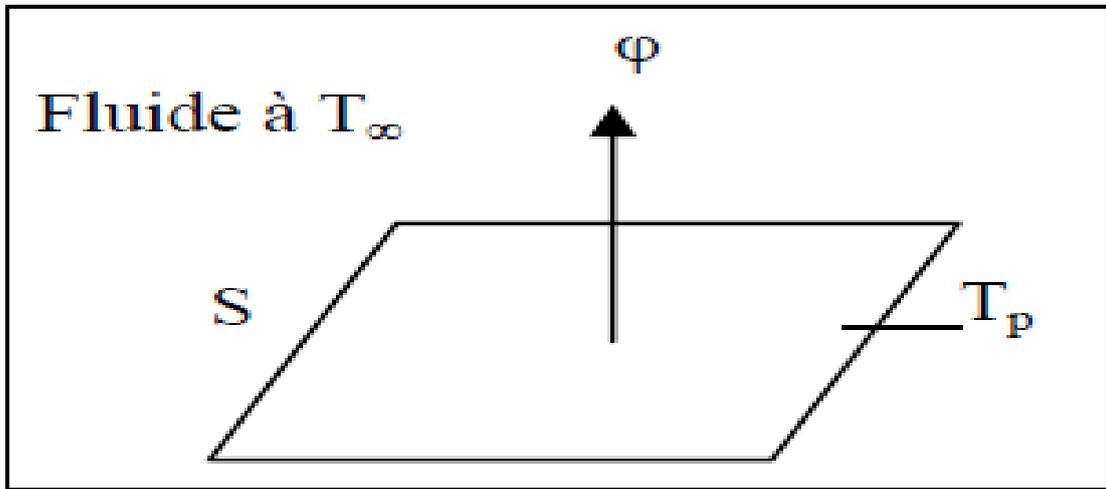


Fig III.3: Schéma représente le principe de la convection

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par convection (W)

h : Coefficient de transfert de chaleur par convection (W/ m² °C)

T_p : Température de surface du solide (°C)

T_∞ : Température du fluide loin de la surface du solide (°C)

S : Aire de la surface de contact solide/fluide (m²)

Remarque :

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.

III.3.3 Rayonnement

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 :

$$\Phi = \sigma \epsilon_p S (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (\text{W}) \quad (\text{III.8})$$

Avec :

ϕ : Flux de chaleur transmis par rayonnement (W)

σ : Constante de Stephan ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)

ϵ_p : Facteur d'émission de la surface

T_p : Température de la surface (K)

T_∞ : Température du milieu environnant la surface (K)

S : Aire de la surface (m^2)

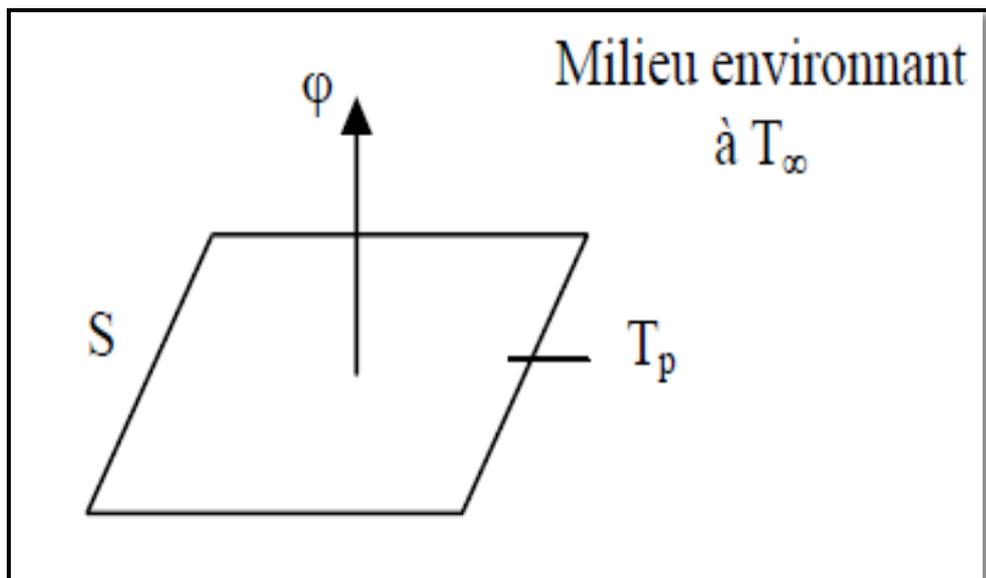


Fig III.4: Schéma représente le principe du rayonnement

III.4 MODELISATION MATHÉMATIQUE :[17], [19], [20]

L'analyse de Hottel, Whillier et Bliss (méthode globale).

Pour simplifier l'étude des transferts de chaleurs dans le capteur solaire à air, on adopte les hypothèses suivantes :

- régime quasi-stationnaire.
- température d'entrée du fluide et température ambiante confondues.
- La puissance absorbée par la vitre est négligeable.
- Les caractéristiques des matériaux sont constantes et indépendantes des conditions météorologiques.
- La température est considérée uniforme pour chaque composant (vitre et absorbeur).
- Les pertes entre la face externe de l'isolant et celle de l'absorbeur sont confondues.
- Les pertes par rayonnement de la face arrière ainsi que de la surface latérale du capteur sont négligeables devant les autres modes d'échanges thermiques.
- La couverture est nette de toute poussière ou autre saleté.
- La température ambiante autour du capteur est uniforme.
- La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour les radiations à grandes longueurs d'onde.
- L'effet d'ombre est négligeable.
- L'écoulement est unidirectionnel.
- Les propriétés thermiques de l'air dépendent de la température.
- La vitesse de l'air est uniforme.
- La température maximale admise par le produit à sécher, il faut qu'elle ne dépasse pas 100 °C.

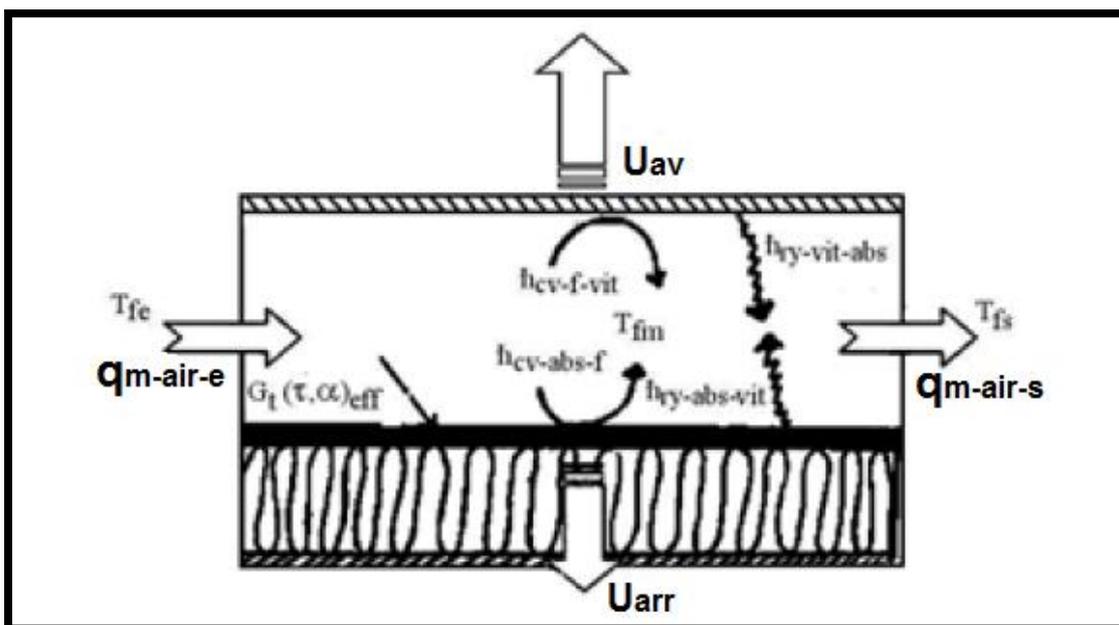


Fig III.5: Vue schématique du capteur solaire plan à air

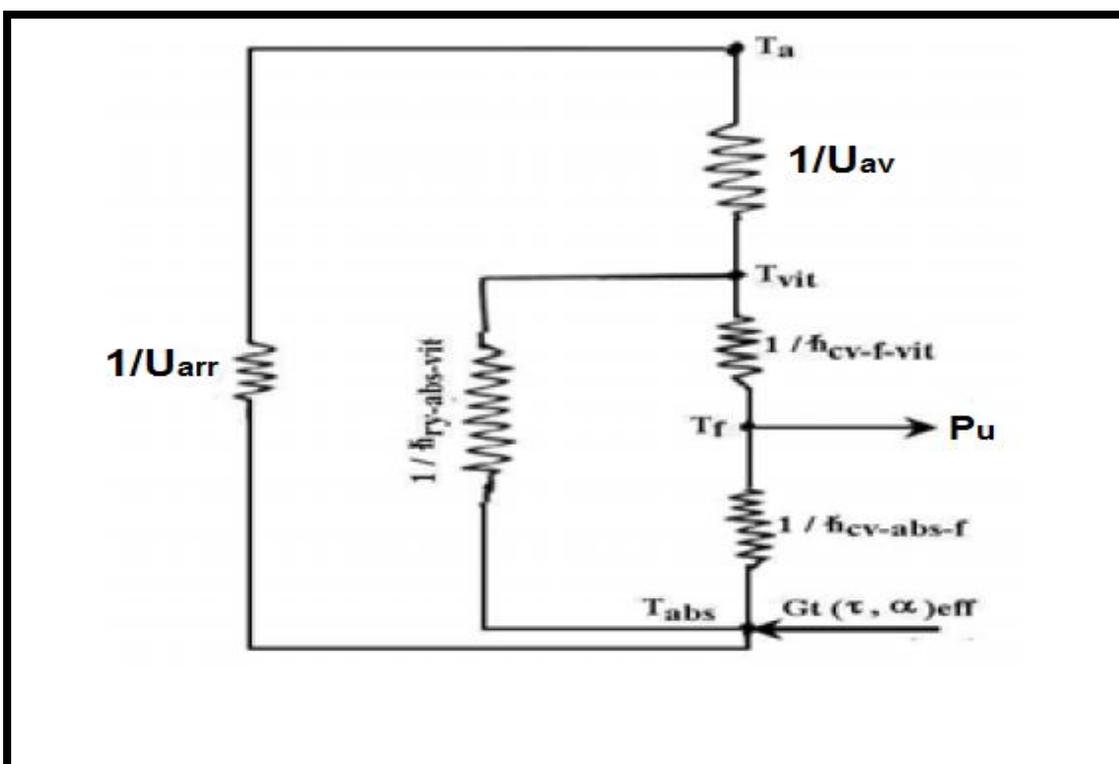


Fig III.6: Schéma électrique de l'insolateur plan à air

III.4.1 Expressions des différents coefficients d'échange thermique :

a) Transfert thermique par convection

- Coefficient d'échange par convection entre le vitrage et l'air ambiant dû au vent :

Ce coefficient est calculé par la relation de **HOTTEL** et **WOERTZ** :

$$h_{\text{vit-am}}^{\text{cv}} = 5,67 + 3,86 V_{\text{vent}} \quad (\text{III. 9})$$

V_{vent} : vitesse du vent [m/s]

- Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le caloporteur:

Pour déterminer le coefficient d'échange thermique convectif interne, ($h_{\text{abs-f}}^{\text{cv}}$) dans le cas des conduites rectangulaires, on utilise les corrélations de **Sieder-Tate** et **Hausen**.

Elles dépendent du régime d'écoulement caractérisé par la valeur du nombre de Reynolds.

Introduisons le nombre adimensionnel de **GRAETZ**, définit par :

$$Gz = Re \cdot Pr \frac{Dh_c}{L_c} \quad (\text{III. 10})$$

- Régime laminaire : **Re < 2100**

Si $Gz < 100$

$$Nu = 3.66 + \frac{0.085Gz}{1+0.047Gz^{2/3}} u \quad (\text{III. 11})$$

Si $Gz > 100$

$$Nu = 1.86Gz^{1/3} + 0.87 \left(1 + 0.015Gz^{1/3} \right) \quad (\text{III. 12})$$

- Régime transitoire : **2100 < Re < 10000**

$$Nu = 0.116(Re^{2/3} - 125) \cdot Pr^{1/3} \cdot \left(1 + \left(\frac{Dhc}{Lc} \right)^{2/3} \right) \quad (\text{III. 13})$$

- Régime turbulent : **Re > 10000**

$$Nu = 0.027Re^{0.8}Pr^{0.33} \quad (\text{III. 14})$$

Avec les nombres de Nusselt, Reynolds et de Prandtl sont définis comme suit :

$$Nu = \frac{h_{abs-f}^{cv} \cdot Dh_c}{K_f} \quad (\text{III. 15})$$

$$Re = \frac{\rho_f \cdot V_f \cdot Dh_c}{\mu_f} \quad (\text{III. 16})$$

$$Pr = \frac{\mu_f \cdot Cp_f}{K_f} \quad (\text{III. 17})$$

Le diamètre hydraulique est donné par la formule :

$$Dh_c = \frac{4 \cdot Sp_c}{P_m} \quad (\text{III. 18})$$

Tout ces corrélation font intervenir par l'intermédiaire de nombres adimensionnels (Nu, Re, Pr, Gz), les propriétés physique de l'air, qui doivent être calculées en tenant compte de la température de l'air à l'entrée du capteur solaire.

- Coefficient de transfert par convection entre le caloporteur et la vitre :

Pour l'échange convectif entre le fluide caloporteur et la vitre, on a:

$$h_{f-vit}^{cv} = h_{abs-f}^{cv} = h_f^{cv} \quad (\text{III. 19})$$

b) Transfert thermique par rayonnement

- Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste :

Le coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste peut être donné par la formule:

$$h_{vit-vc}^r = \sigma \cdot \frac{(T_{vit} + T_{vc}) \cdot (T_{vit}^2 + T_{vc}^2)}{\frac{1}{\epsilon_{vit}}} \quad (\text{III. 20})$$

La température de la voûte céleste est donnée par la formule de **Swinbank** :

$$T_{vc} = 0.0552 \cdot T_{am}^{1.5} \quad (\text{III. 21})$$

- Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'absorbeur :
Le coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'absorbeur est donné par:

$$h_{vit-abs}^r = \sigma \cdot \frac{(T_{abs} + T_{vit}) \cdot (T_{abs}^2 + T_{vit}^2)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1}{\epsilon_{vit}} - 1} \quad (\text{III. 22})$$

c) Transfert thermique par conduction

Le coefficient de transfert par conduction entre l'absorbeur et la tôle arrière du capteur solaire est donné par la formule suivante :

$$h_{abs-arr}^{cd} = \frac{k_{abs}}{e_{p_{abs}}} + \frac{k_{arr}}{e_{p_{arr}}} \quad (\text{III. 23})$$

III.4.2 Pertes globales d'énergies:

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elles se divisent en trois catégories: pertes vers l'avant, pertes vers l'arrière et pertes latérales.

- **Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur**

A l'avant du capteur, entre la couverture transparente et l'ambiance, on enregistre des déperditions par convection et par rayonnement, donc : Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la relation suivante :

$$U_{av} = \frac{1}{\frac{1}{h_{vit-vc}^{cv} + h_{vit-vc}^r} + \frac{1}{h_{abs-vit}^{cv} + h_{abs-vit}^r}} \quad (\text{III. 24})$$

Ainsi, les pertes thermiques vers l'avant sont données par la relation suivante :

$$q_{Pav} = U_{av}(T_{vit} - T_a) \quad (\text{III. 25})$$

- **Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur**

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vu que le capteur est très bien isolé à l'arrière. L'expression évaluant ce coefficient est donnée par :

$$U_{arr} = h_{abs-arr}^{cd} = \frac{k_{is}}{ep_{is}} + \frac{k_{arr}}{ep_{arr}} \quad (\text{III. 26})$$

Donc les pertes thermiques vers l'arrière sont données par la relation suivante :

$$q_{Parr} = U_{arr}(T_{abs} - T_a) \quad (\text{III. 27})$$

- **Coefficient de pertes thermiques latérales**

La valeur de ce coefficient est inférieure à celle du coefficient des pertes arrière, vu que la surface latérale du capteur est peu importante. Ce coefficient est exprimé par :

$$U_{lat} = \frac{K_{is}}{E_{is}} \cdot \frac{A_{lat}}{A_c} \quad (\text{III. 28})$$

Où :

A_{lat} : Aire latérale du capteur.

A_c : Aire du capteur.

E_{is} = Epaisseur de l'isolant.

K_{is} = Coefficient de conductivité thermique de l'isolant.

Donc les pertes thermiques latérales sont données par la relation suivante :

$$q_{Plat} = U_{lat}(T_{iso} - T_a) \quad (\text{III. 29})$$

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur est la somme des trois coefficients précédents déterminés :

$$U_T = U_{av} + U_{arr} + U_{lat} \quad (\text{III. 30})$$

Donc les pertes thermiques globales sont données par la relation suivante :

$$q_{Pt} = q_{Pav} + q_{Parr} + q_{Plat} \quad (\text{III. 31})$$

III.4.3 Equations régissant le transfert de chaleur dans le capteur

Les capteurs solaires fonctionnent dans les états équilibrés (régime thermique établi).

Dans ces conditions, les performances d'un capteur solaire sont décrites par le bilan énergétique global suivant:

$$\Phi_{sa} = \Phi_u + \Phi_p + \Phi_{st} \quad (\text{III. 32})$$

En négligeant l'énergie thermique stockée dans les différents composants du capteur (inertie thermique), on obtient:

$$\Phi_{sa} = \Phi_u + \Phi_p \quad (\text{III. 33})$$

Afin d'établir les équations régissant le transfert d'énergie dans le capteur, on a procédé par élément :

- **Plaque absorbante :**

Cette équation exprime la relation entre la puissance reçue par l'absorbeur et celle dégagée par ce dernier, soit par convection entre l'air et l'absorbeur ou par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre:

$$P_a = E \cdot C \cdot \tau_v \cdot \alpha_a = U_{arr}(T_{abs} - T_a) + h_{abs-vit}^r(T_{abs} - T_{vit}) + h_{abs-f}^{cv}(T_{abs} - T_f) \quad (\text{III. 34})$$

Avec :

$$T_{abs} = T_{moy} \text{ arithmétique} = (T_1 + T_2 + T_3) / 3 \quad (\text{III. 35})$$

E : Éclairement énergétique (densité de flux) au niveau du capteur (W/m^2).

C: facteur de concentration géométrique du capteur ($C=1$ si capteur plan).

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre (%).

α_a : Coefficient d'absorption de l'absorbeur (%).

- **Fluide caloporteur :**

Le fluide caloporteur, qui est l'air, emprunte une certaine énergie, lors de son passage dans la gaine, par convection, d'une part de la plaque absorbante et d'autre part de la vitre, ce qui lui permet d'emmagasiner une chaleur dite: 'utile' :

$$P_u = h_{abs-f}^{cv}(T_{abs} - T_f) + h_{f-vit}^{cv}(T_f - T_{vit}) \quad (\text{III. 36})$$

- **La vitre**

$$h_{f-vit}^{cv}(T_f - T_{vit}) + h_{abs-vit}^r(T_{abs} - T_{vit}) + U_{av}(T_a - T_{vit}) = 0 \quad (\text{III. 36})$$

III.4.4 Calcul de rendement

- **Le Rendement instantané :**

D'après l'analyse de HOTTEL, WHILIER, WORTZ et BLISS, ce rendement est défini comme étant le rapport entre l'énergie utile réellement extraite du système et la quantité du rayonnement frappant toute la surface du capteur.

$$\eta_{\text{ins}} = \frac{P_u}{G_i \cdot S_c} \quad (\text{III. 37})$$

Où

S_c : La surface du capteur.

G_i : Rayonnement Solaire incident.

- **Rendement journalier**

C'est le rapport de la somme des énergies utiles prises au cours de la journée par la somme des ensoleillements correspondants :

$$\eta_j = \frac{\sum P_u}{S_c \sum G_i} \quad (\text{III. 38})$$

- **Le Rendement Optique :**

Il est défini comme étant le rapport entre l'énergie absorbée par la plaque et l'énergie solaire incidente.

$$\eta_{op} = \frac{P_a}{G_i \cdot S_c} \quad (\text{III. 39})$$

III.5 Conclusion

La modélisation mathématique est réalisée par une analyse théorique qui est sujet à d'importantes améliorations des performances du système solaire :

- d'une part en optimisant, les coefficients de transfert convectifs entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur.
- et d'autre part en réduisant les pertes thermiques à travers les différents composants du capteur solaire.

CHAPITRE IV
Étude Expérimentale

CHAPITRE IV : Étude Expérimentale

IV.1. Introduction

La plus grande part de recherche est consacrée au développement du rendement d'un capteur solaire, conçu pour convertir l'énergie solaire en énergie thermique, dépend de la technique choisie et de la façon dont on réduit les pertes de chaleur à la surface de celui-ci.

Dans notre étude, on propose un insolateur à air à simple passe entre l'absorbeur et le vitre, destiné à une application au séchage solaire des produits agro-alimentaires.

Le déroulement des expériences a été effectué au niveau de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (U.R.E.R/M.S) d'Adrar.

Les paramètres caractérisant le site sont : latitude de **(27,88)** degré, une longitude de **(-0,17)** degré, altitude **(264m)** et un albédo : **(0,35)**.

Les paramètres considérés dans notre expérience sont : Eclairement global - Température ambiante - Température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur - Température de l'absorbeur - Température du vitrage.

IV.2. Description et fonctionnement du dispositif expérimental

- Le prototype étudié est conçu et réalisé au laboratoire. Il s'agit d'un capteur plan à air à simple passe d'une surface de captation égale à **1,8 m²**, d'une longueur **L = 1.94 m** et d'une largeur **l = 0.93 m**.

- Nous résumons les principaux composants du collecteur comme suit:
 - Une seule couverture transparente de verre qui assure le phénomène ‘d’effet de serre’.
 - Une plaque absorbante mince (en acier galvanisé peinte en noir mat) qui transmet la chaleur au fluide caloporteur.
 - La veine d’air dynamique d’une hauteur de (**22 mm**) est comprise entre la plaque absorbante (corps noir) et le verre.
 - Les isolations arrière et latérale sont assurées grâce à une mousse expansive (polyuréthane), et également par le boîtier, afin de limiter les pertes thermiques vers l’extérieur.
- Le principe de fonctionnement :

Le rayonnement solaire arrivant sur l’absorbeur est absorbé en partie par celui-ci et transformé en chaleur. Cela se manifeste par un échauffement généralisé de cet absorbeur.

Cette énergie accumulée par l’absorbeur est cédée aux fluide caloporteur (air) au contact thermique avec lui.

IV.3. Caractéristiques Techniques du Capteur

Solaire

Les caractéristiques techniques (thermo-physiques) du l’insolateur sont illustrées dans le tableau suivant :

Désignation	Unité	Nature et Dimensions
<p>Boitier :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nature : – Epaisseur : – Dimension : 	<p>m</p> <p>m</p>	<p>Acier</p> <p>0,07</p> <p>1,94*0,93</p>
<p>Couver :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nature : – Nombre : – Epaisseur : – Dimension : – Transmissivité : 	<p>m</p> <p>m</p>	<p>Verre ordinaire</p> <p>1(deux moitié)</p> <p>0,004</p> <p>0,95*0,92 (chaque moitié)</p> <p>0,9</p>
<p>Absorbeur :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nature : – Epaisseur : – Dimension : – Absorptivité : – Emissivité : 	<p>m</p> <p>m</p>	<p>Plaque en Acier</p> <p>0,004</p> <p>1,84*0,83</p> <p>0,94</p> <p>0.88</p>
<p>Matière Isolante :</p> <ul style="list-style-type: none"> – Nature : – Epaisseur : – Conductivité : 	<p>m</p> <p>W/m.k</p>	<p>Mousse</p> <p>Polyuréthane</p> <p>0,04</p> <p>0,027</p>
<p>La veine d'air</p> <ul style="list-style-type: none"> – Hauteur : 	<p>m</p>	<p>0,22</p>

Tab IV.1: Les caractéristiques techniques du l'insolateur

IV.4. Montage expérimental

Dans ce qui va suivre, on présente la procédure du test de caractérisation du prototype et les moyens utilisés pour réaliser le banc d'essais, puis les résultats préliminaires seront présentés, afin de tirer les remarques et les conclusions qui en découlent.

IV.4.1. Réalisation du capteur solaire

La mise en œuvre convenable d'un projet solaire passe par plusieurs étapes :

- Ramener les différents composants et matériels nécessaires pour réaliser le montage.
- Nettoyage du boîtier consistant au :
 - Grattage de la peinture de la plaque absorbante.
 - Purgation des verres (vitre).
 - Vérification des différentes faces de l'isolant (arrière et latérales).
- Pigmentation de l'absorbeur en noir mat.
- Etalonnage des différents thermocouples, et emplacements comme suit :
 - Un thermocouple à l'entrée du capteur au niveau de la plaque absorbante.
 - Un thermocouple au centre du capteur au niveau de la plaque absorbante.
 - Un thermocouple à la sortie du capteur au niveau de la plaque absorbante.
 - Un thermocouple au niveau de la vitre.

- Un thermocouple à la sortie du capteur au niveau de la veine d'air.
- Un thermocouple à l'arrière du capteur au niveau de la tôle du boîtier.
- Deux thermocouples pour mesurer la température ambiante et le rayonnement solaire.
- Etablissement du verre à la face auparavant du capteur à l'aide de colle et de joint.

IV.4.2. Diaporama

Voici un diaporama succinct des étapes de cette construction :



Fig IV.1: Photos représentent les différents composants et matériels nécessaires pour réaliser le montage



Fig IV.2: Photo représente le grattage de la peinture de la plaque absorbante



Fig IV.3: Photo représente la purgation des verres (vitre)



Fig IV.4: Photos représentent la pigmentation de l'absorbeur en noir mat

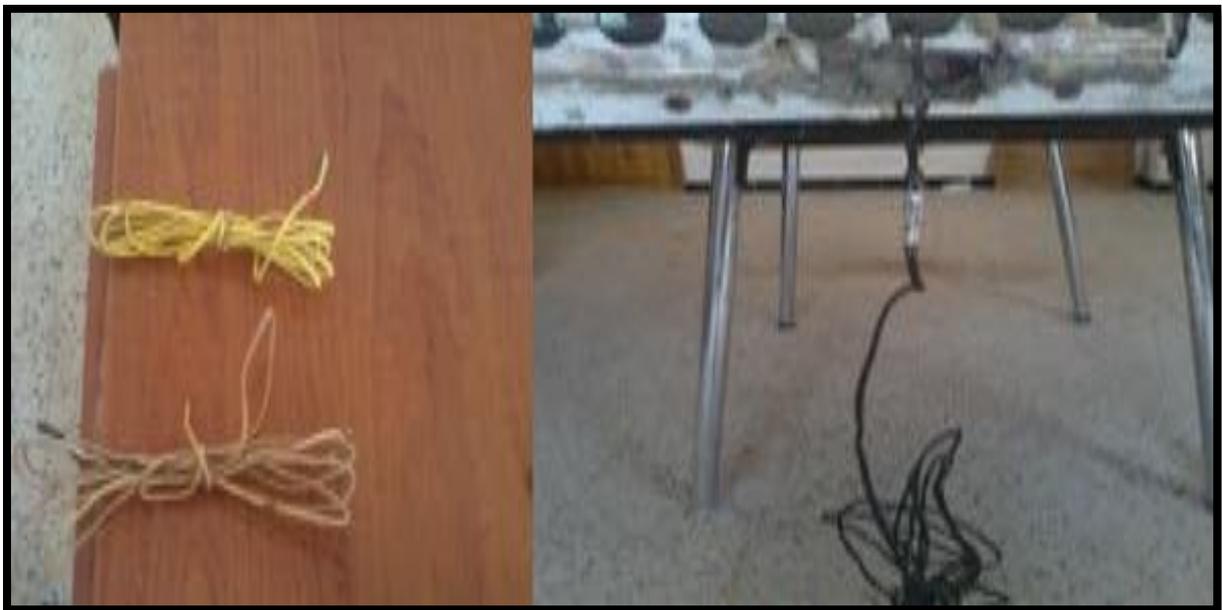


Fig IV.5: Photos représentent l'étalonnage des différents thermocouples



Fig IV.6: Photos représentent l'établissement du verre à la face auparavant du capteur à l'aide de colle et de joint

Une fois les différents composants du système développé sont préparés, l'assemblage et l'installation du prototype sont réalisés au niveau de la plate-forme des essais de l'URER.MS.

Le système complet est orienté plein sud et incliné de (30°) par rapport à l'horizontal, suivant la latitude de lieu (Adrar). Car il est plus avantageux dans la mesure où ce plan permet d'avoir la possibilité de recevoir le maximum du rayonnement solaire.



Fig IV.7 : Photo représente le capteur solaire plan à air monté

IV.5. Instrumentation :

Une campagne de mesures a été effectuée durant la période de 15 jours du mois d'avril 2013 sur la plate-forme des essais de la Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien d'Adrar qui est caractérisée par les coordonnées géographiques suivantes :

- La latitude : sa valeur est de **27,88°** Nord ;
- La longitude : sa valeur est de **(-0,17°)** W ;
- L'altitude est de **264 m** ;
- L'albédo : sa valeur indiquée par l'équipe de gisement solaire de l'SEES/MS est de **0,35**.



Fig IV.8 : Photo représentant la plate-forme des essais de la SEES/MS d'Adrar

Afin de pouvoir estimer l'efficacité du capteur, on a programmé le déroulement des tests durant une période de six (6) jours. Lors de chaque journée, les tests sont pris de 5h du matin jusqu'à minuit avec un pas de temps d'une minute.

L'installation expérimentale comprend:

- La mesure du rayonnement solaire.
- Les mesures de température de l'air ambiant, de température de l'absorbeur, de température du vitrage, ainsi que celle du fluide caloporteur à la sortie du capteur solaire.
- La mesure de la vitesse du vent.

IV.5.1. Mesure des températures :

La température ambiante est mesurée sous abri, à côté du système solaire. Les sondes de mesure des différentes températures sont des thermocouples de type K et J.

Pour l'étude, on a supposé que la température d'entrée du fluide est égale à la température ambiante.

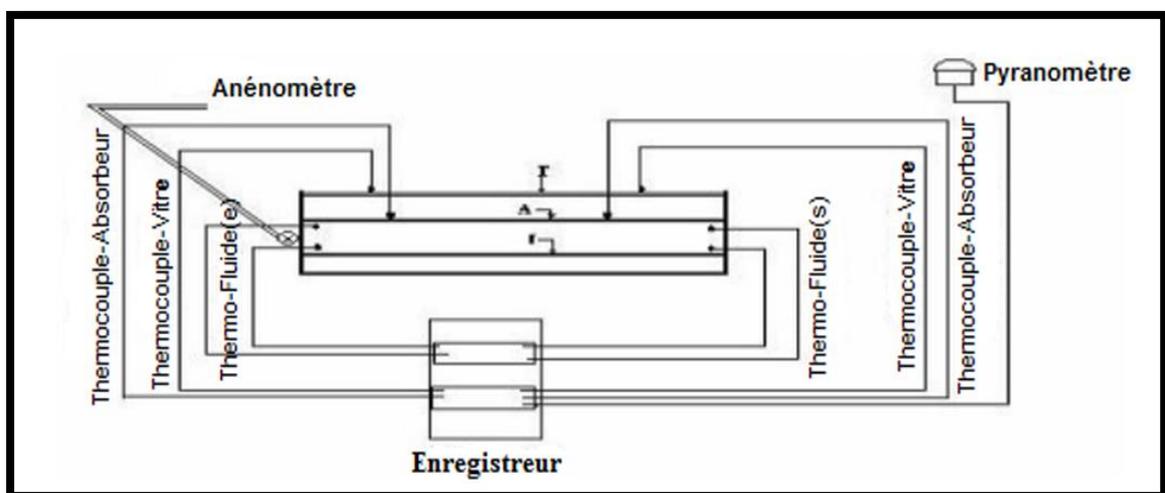


Fig IV.9: Schéma représente l'installation des thermocouples

L'ensemble des thermocouples est relié à un enregistreur appelé « acquisition de données » à carte mémoire de marque FLUKE 2625 A, qui fait les prélèvements à un pas de temps de mesure de 60 secondes pendant toute la durée du test.



Fig IV.10 : Photos représentent le raccordement des différents thermocouples à l'acquisition de données

IV.5.2.Mesure du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire à la surface d'ouverture du capteur est mesuré à l'aide d'un 'Pyranomètre' de type (Kypp & Zonen) de deuxième classe, placé à mi-distance du plus grand côté du collecteur.

Les valeurs du Rayonnement solaire sont enregistrées chaque minute sur la même acquisition.



Fig IV.11 : Photo représente le Pyranomètre

IV.5.3.Mesure de la vitesse du vent

L'équipe de gisement solaire au niveau de la SEES/MS d'Adrar, met à notre disposition un ensemble de données radiométriques. On cite entre autres : la vitesse du vent qui est mesurée à l'aide d'un appareil appelé : 'Anémomètre'



Fig IV.12 : Photo représentant l'Anémomètre

CHAPITRE V
Résultats et Discussion

CHAPITRE V : Résultats et Discussion

V.1. Résultats Obtenus

Afin de pouvoir estimer l'efficacité du capteur, on a programmé le déroulement des tests durant une période de six (6) jours du mois d'avril 2013(19, 20, 21, 22,23 et 24 Avril). Lors de chaque journée, les tests sont pris de 5h du matin jusqu'à minuit avec un pas de temps de 60 secondes.

Les paramètres considérés dans notre expérience sont : Eclairage global - Température ambiante - Température du fluide à l'entrée et à la sortie du capteur - Température de l'absorbeur - Température du vitrage.

Tous les résultats obtenus sont des fichiers de données, qui sont représentés par des tableaux.

Le tableau suivant représente un échantillon des résultats obtenus pour la journée 19/04/2013 :

Date	Heure	minute	seconde	A(Y)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)	G(Y)	H(Y)
	h	m	s	w/m ²	°C						
19/04/13	11	42	53	1053	101,91	103,08	80,571	68,081	89,872	47,092	32,054
19/04/13	11	44	23	1055,1	102,01	102,93	81,517	67,926	91,337	46,915	31,937
19/04/13	11	45	53	1048,8	102,25	104,18	81,579	68,424	94,958	47,298	32,223
19/04/13	11	47	23	1056,7	102,69	104,04	82,322	68,738	92,643	47,417	32,644

Tab V.1: Echantillon des résultats obtenus pour la journée 19/04/2013

Ces résultats se présentent par colonne dans l'ordre suivant :

Date, heure, minute, seconde, éclairement global incident sur une surface inclinée de (30°) par rapport à l'horizontal et les différentes températures au niveau des différents composants (absorbeur, vitre, sortie d'air, arrière de la tôle de boîtier et la température ambiante).

V.2. Traitements des résultats obtenus

Le premier travail entrepris a été d'éliminer les colonnes qui ne seront pas exploitées dans le cadre de notre travail.

Aux environs du lever et du coucher du soleil, les lignes où le rayonnement global est négatif sont éliminées car il ne peut y avoir une valeur d'éclairement inférieur à 0.

Dans une seconde étape, il a été entrepris la conversion du temps légal dans un système sexagésimal vers un temps solaire universel dans un système décimal par l'équation suivant :

$$\mathbf{TSV = (heure + minute/60 + seconde/3600) + E/60 + 61.1} \quad \mathbf{(V. 1)}$$

Avec : **E** : équation du temps en minutes.

On obtient alors un nouveau fichier de données où chaque jour du test.

Le tableau suivant représente un échantillon des résultats traités pour la journée 19/04/2013 :

TSV (décimal)	E_i	T_{ps}	T_{pc}	T_{pe}	T_v	T_{sair}	T_{amb}	T_{arr}
h	w/m ²	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
11,71472	1053	101,91	103,08	80,571	68,081	89,872	47,092	32,054
11,73972	1055,1	102,01	102,93	81,517	67,926	91,337	46,915	31,937
11,76472	1048,8	102,25	104,18	81,579	68,424	94,958	47,298	32,223
11,78972	1056,7	102,69	104,04	82,322	68,738	92,643	47,417	32,644

Tab V.2: Echantillon des résultats traités pour la journée 19/04/2013

Avec :

TSV (décimal) : Temps Solaire Vrai dans un système décimal.

E_i : Éclairement global incident sur une surface inclinée de (30°) par rapport à l'horizontal.

T_{ps} : Température à la sortie du capteur au niveau de la plaque absorbante.

T_{pc} : Température au centre du capteur au niveau de la plaque absorbante.

T_{pe} : Température à l'entrée du capteur au niveau de la plaque absorbante.

T_v : Température au niveau de la vitre.

T_{sair} : Température à la sortie du capteur au niveau de la veine d'air.

T_{amb} : Température ambiante.

T_{arr} : Température à l'arrière du capteur au niveau de la tôle du boîtier.

Et pour la dernière étape, les fichiers de données ont été traduits en graphes grâce au logiciel : « origine ».

V.3. Résultats Traités

Dans ce qui va suivre, on présente les enregistrements traités de chaque journée du test.

V.3.1. La journée 19/04/2013

V.3.2. La journée 20/04/2013

V.3.3. La journée 21/04/2013

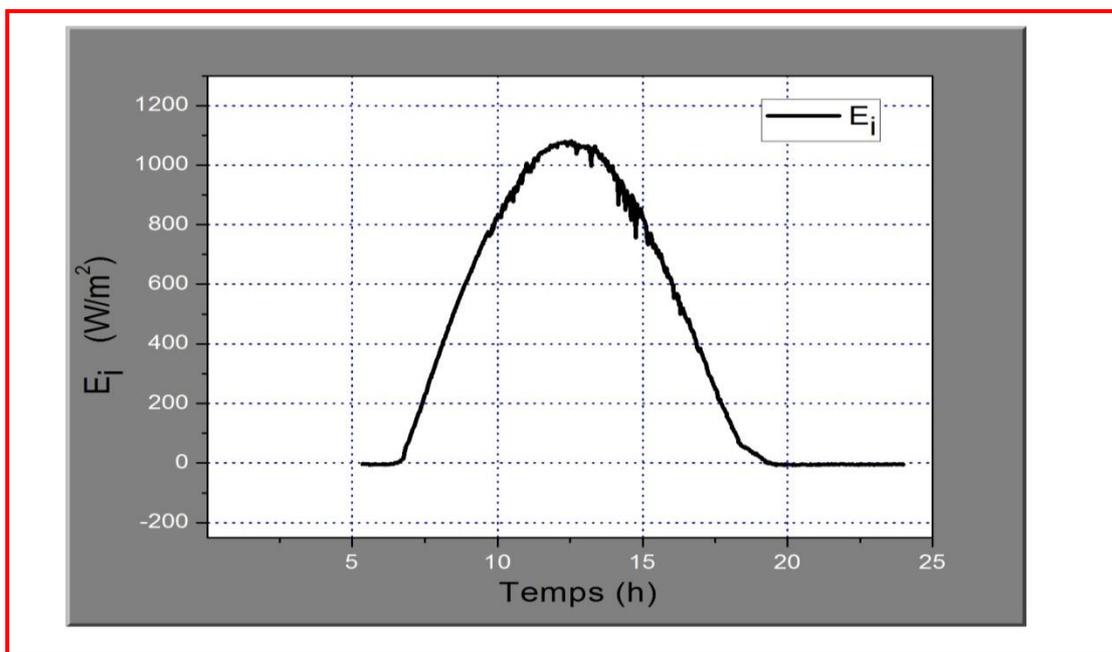
V.3.4. La journée 22/04/2013

V.3.5. La journée 23/04/2013

V.3.6. La journée 24/04/2013

V.4. Graphes

✚ La journée : 19/04/2013



FigV.1 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 19/04/2013

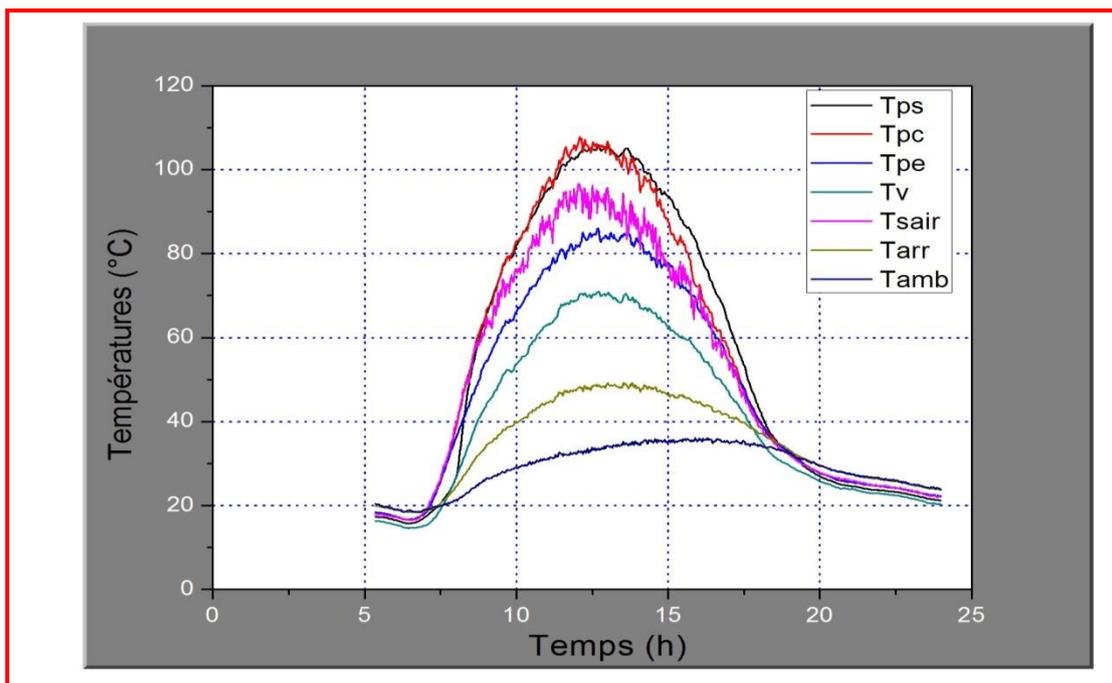
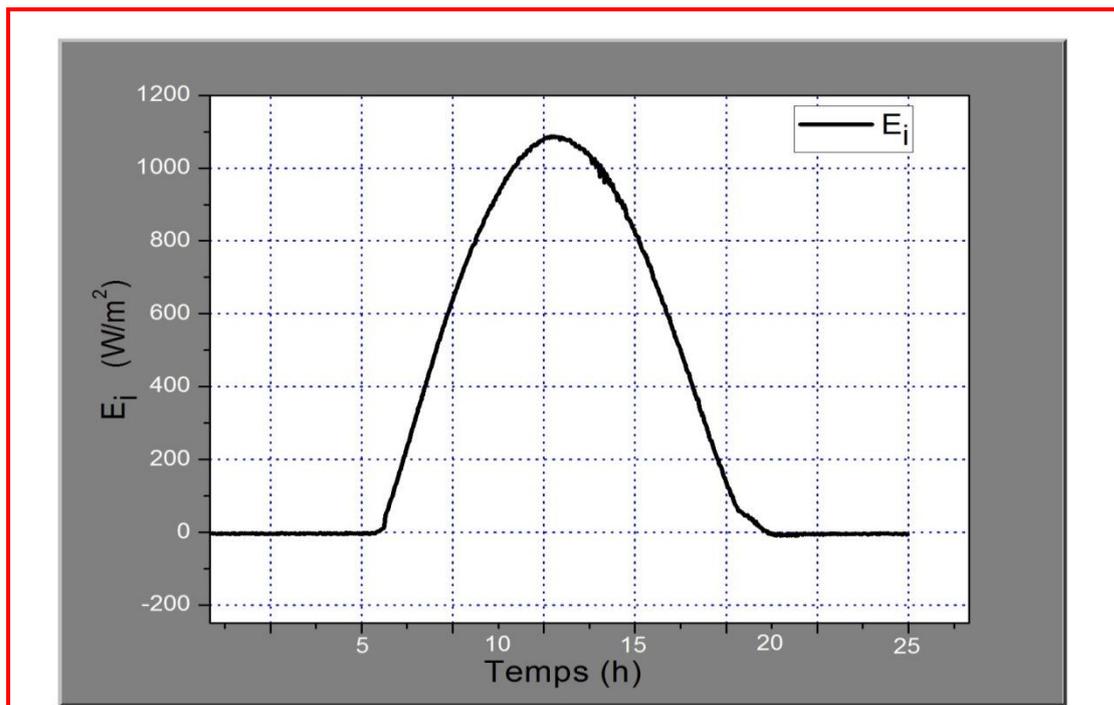


Fig V.2 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 19/04/2013

✚ La journée : 20/04/2013



FigV.3 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 20/04/2013

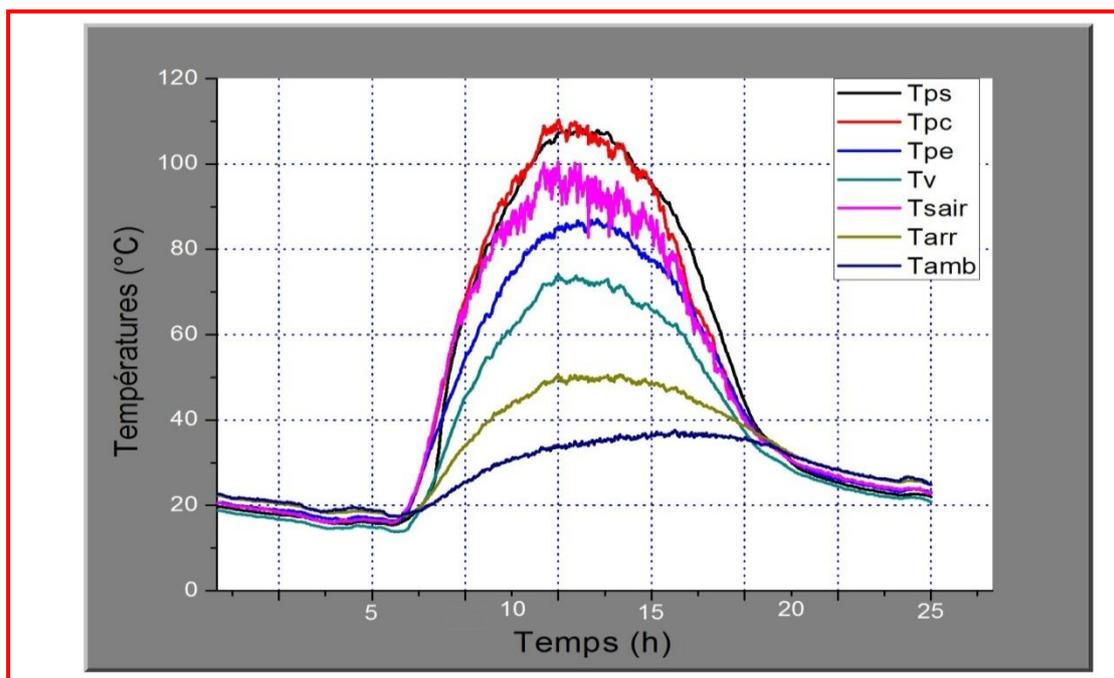
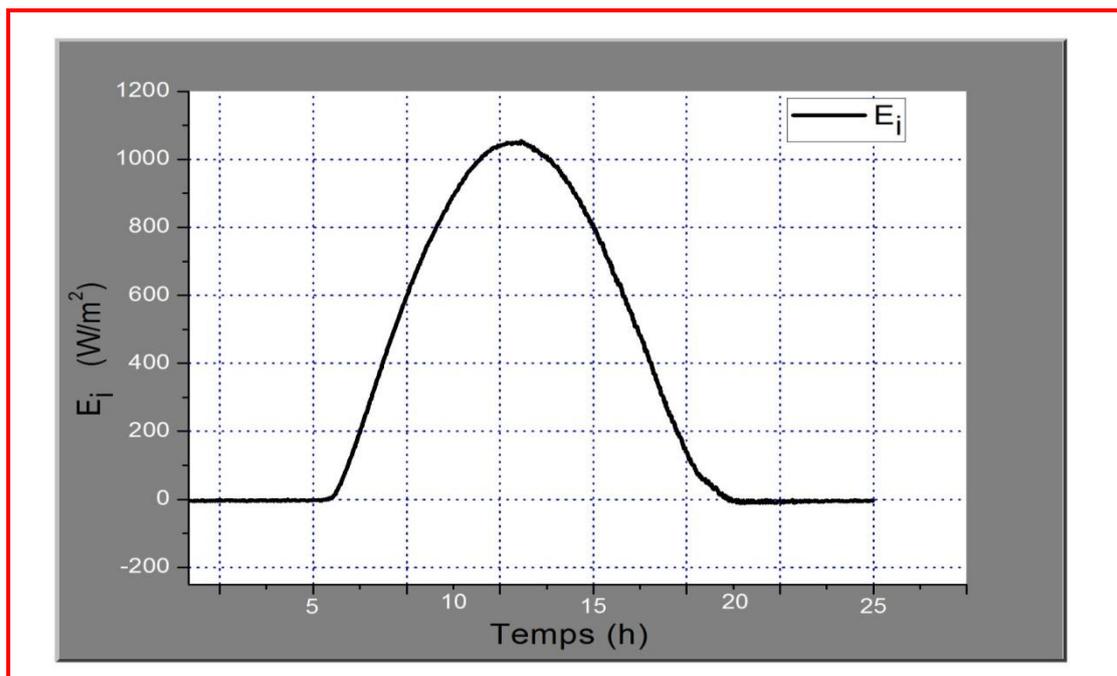


Fig V.4 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 20/04/2013

✚ La journée : 21/04/2013



FigV.5 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 21/04/2013

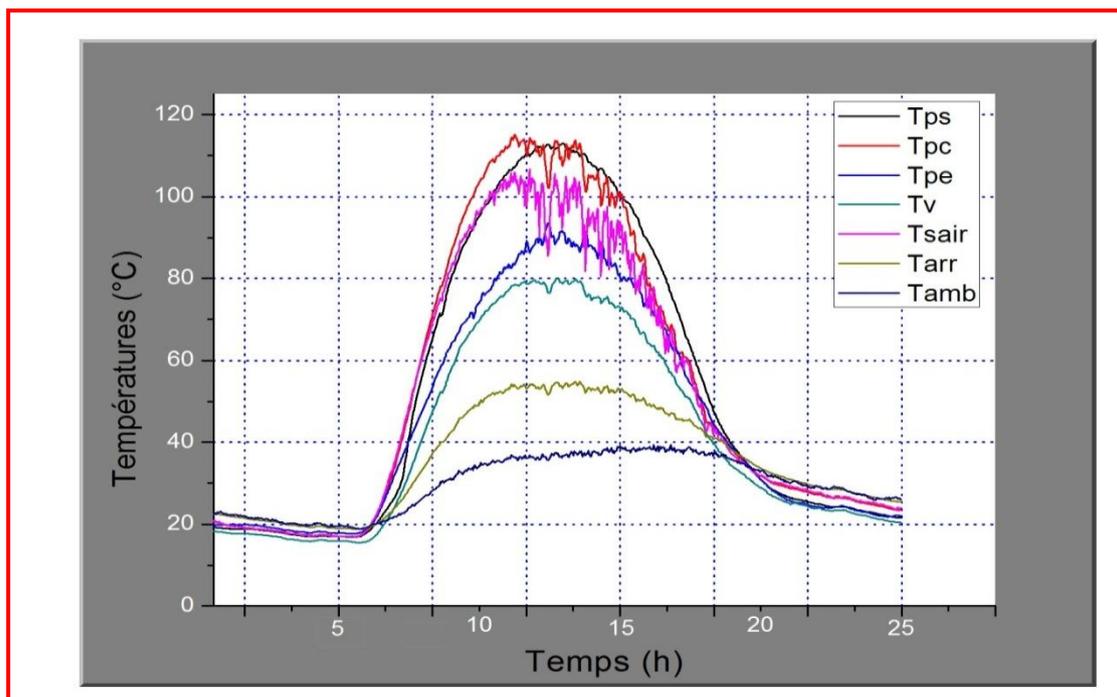
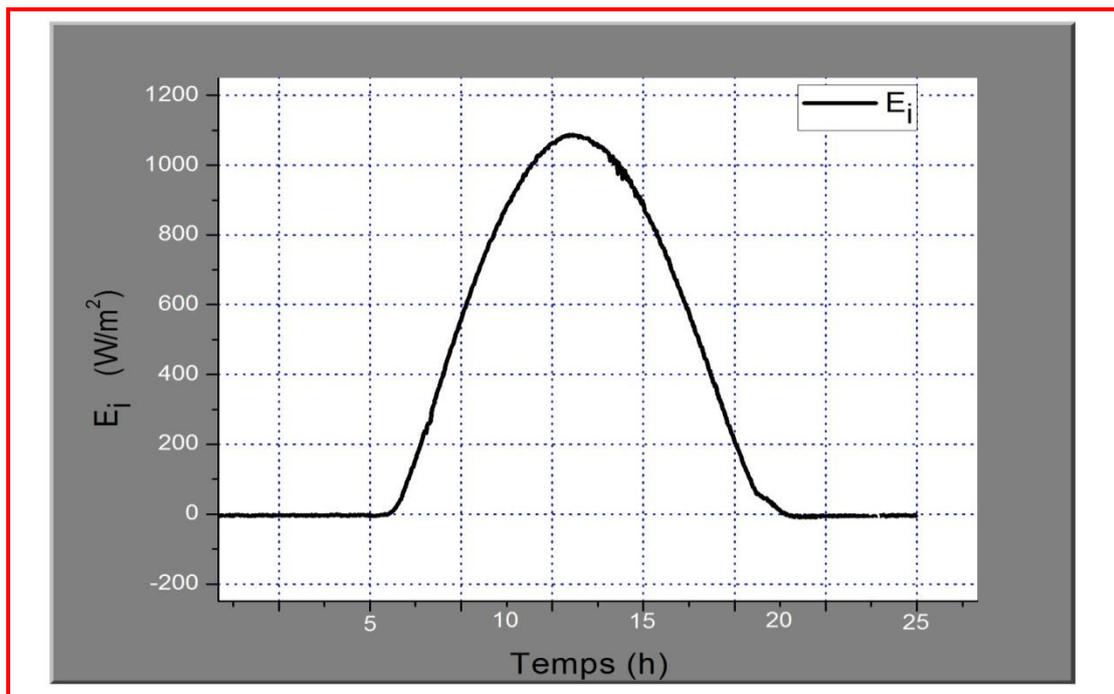


Fig V.6 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 21/04/2013

✚ La journée : 22/04/2013



FigV.7 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 22/04/2013

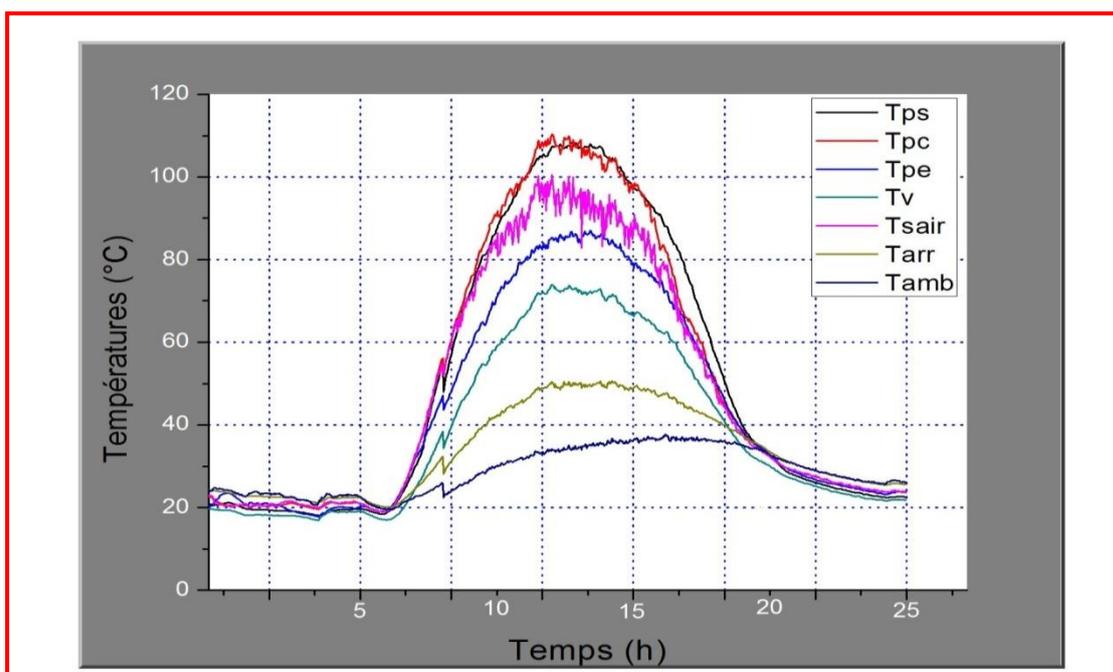
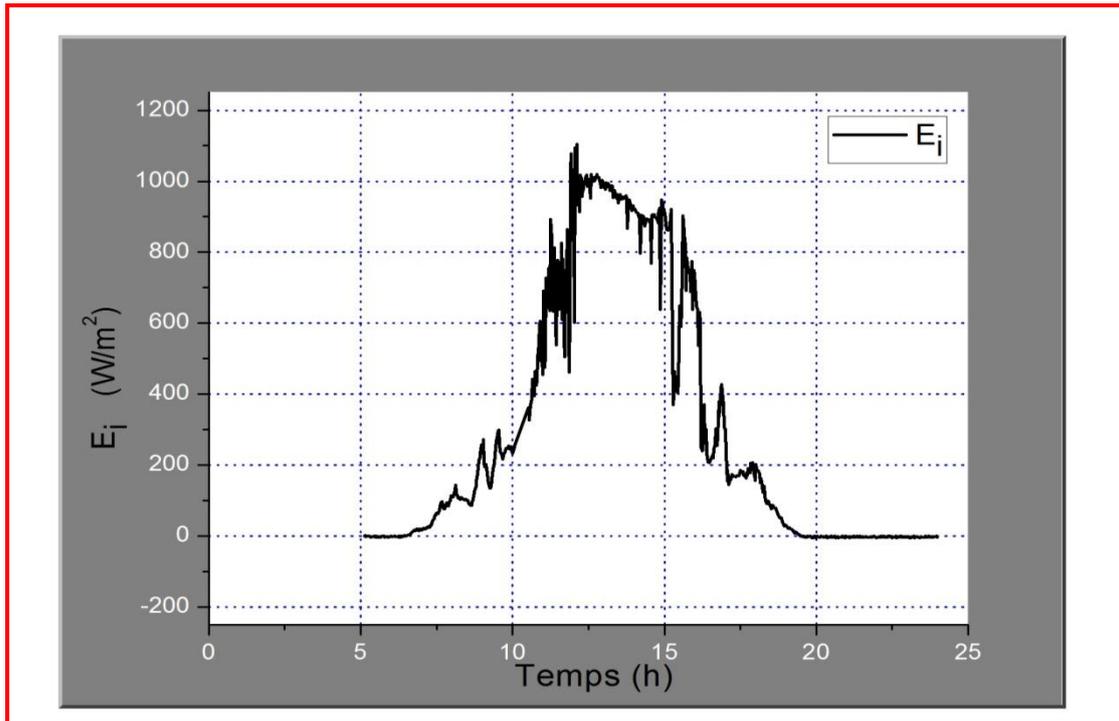


Fig V.8 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 22/04/2013

✚ La journée : 23/04/2013



FigV.9 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 23/04/2013

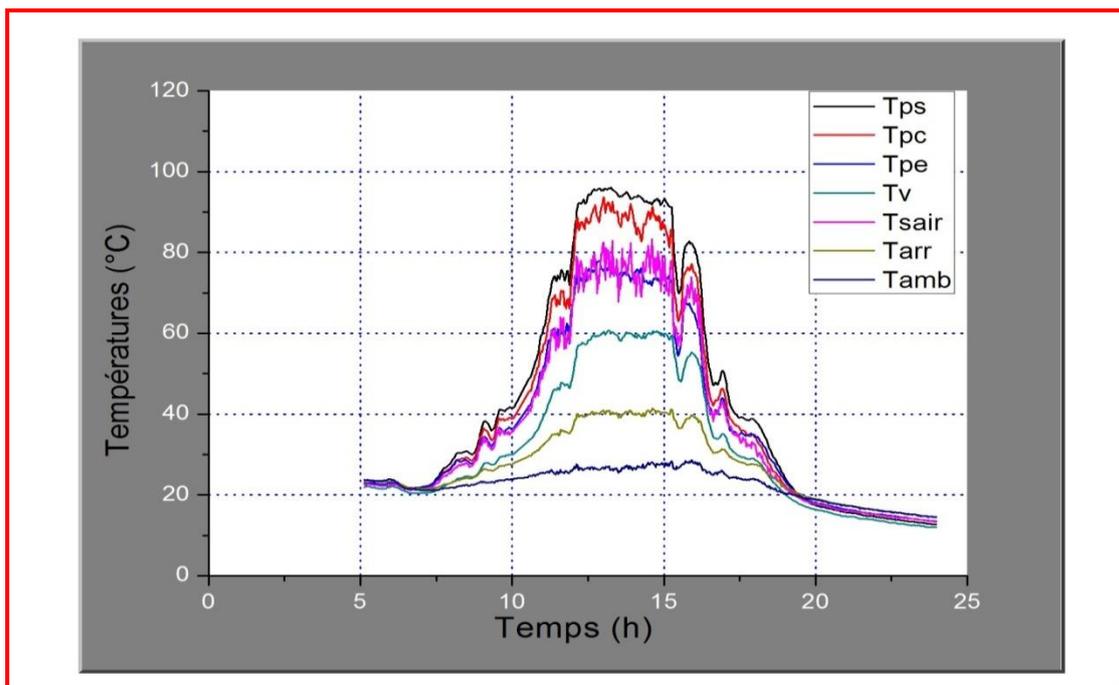
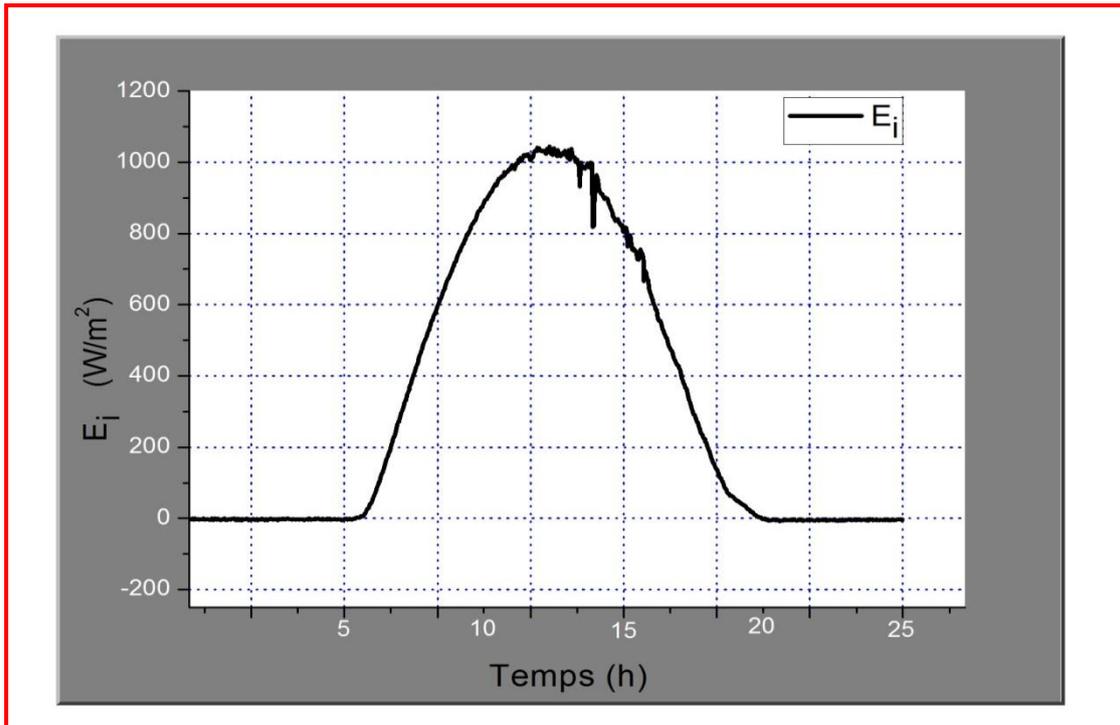


Fig V.10 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 23/04/2013

✚ La journée : 24/04/2013



FigV.11 : Evolution du rayonnement solaire global incliné pour la journée 24/04/2013

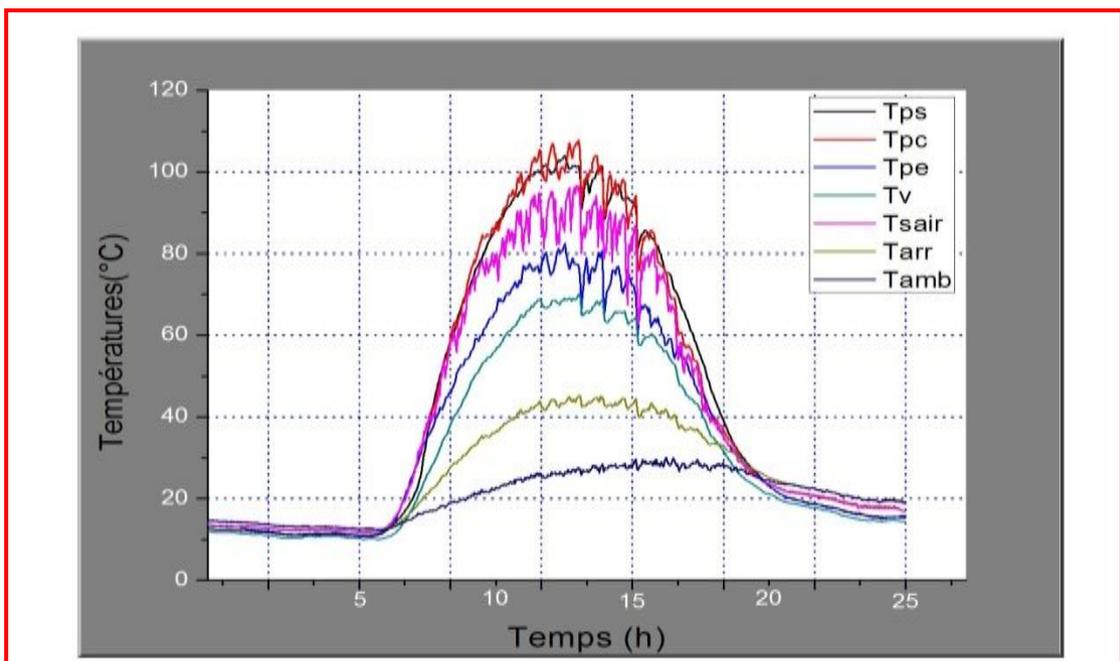


Fig V.12 : Evolution des différentes températures selon les composants pour la journée 24/04/2013

Discussion

A travers les différentes figures, on observe d'une manière générale que ces derniers sont tout à fait presque identiques (due à les même conditions météorologiques le long de la durée du test, sauf pour la journée du 23/04 /2013, qui nous avons remarqués un changement dans les troubles climatiques, ceci été signé à cause l'événement du vent de sables), donc :

- Les figures qui illustrent l'évolution du rayonnement solaire, nous fait voir la variation de ce dernier en fonction du temps, il part d'une valeur nulle au lever du soleil, arrive au sommet à midi TSV et redevient nul au coucher du soleil.

Par ailleurs, son allure évoque parfaitement une parabole dont le sommet est plus élevé en midi TSV, ainsi que la durée d'insolation est plus longue.

- Les figures qui montrent l'évolution des différentes températures, représentent la variation de ces derniers en fonction du temps. D'après ces figures, on remarque que les différentes températures ont la même allure (forme d'une cloche), et atteignent leur optimum entre 11h00et 14h30.

En effet, on constate que les températures des différents composants varient en proportion du rayonnement solaire.

Elles s'accroissent au fur et à mesure que le rayonnement solaire croit, et parviennent à leur valeur maximale en même temps que le rayonnement solaire est à son maximum à midi TSV.

Ce qui permet de déduire que le rayonnement solaire est le paramètre le plus influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.

Comparaison

Dans le tableau qui suit, on présente la récapitulation des résultats aux journées :

	19/04/2013	20/04/2013	21/04/2013	22/04/2013	23/04/2013	24/04/2013
T_{sair} Maximale (°C)	96,306	100,53	106,71	100,53	82,885	95,657
T_{amb} Maximale (°C)	36,031	37,703	39,31	37,163	28,476	29,629
(ΔT) (°C)	60,275	62,827	67,4	63,367	54,409	66,028
E_i Maximal (w/m ²)	1082,4	1087,1	1054,6	1087,7	1017,8	1017,8

Tab V.3: La récapitulation des résultats à différentes journées

Avec :

T_{sair} Maximale : La valeur maximale (entre 11h00 et 14h30) de la température à la sortie du capteur au niveau de la veine d'air.

T_{amb} Maximale : La valeur maximale (entre 11h00 et 14h30) de la température ambiante.

(ΔT) : L'écart de température = (**T_{sair} Maximale** - **T_{amb} Maximale**)

E_i Maximal : La valeur maximale (entre 11h00 et 14h30) de l'Éclairement global incident sur une surface inclinée de (30°) par rapport à l'horizontal.

On remarque que le gradient de température (ΔT) entre l'entrée et la sortie du fluide caloporteur (l'air) est important aux environs de midi TSV, c-à-d : l'écart de température correspond à la valeur maximale de l'éclairement solaire le long de la durée du test.

En raison du (ΔT), on peut constater que notre capteur ne devient performant qu'entre 11h00 et 14h30.

De cela, on peut déduire que le flux solaire influe sur la température de sortie du fluide, qui est très favorable pour l'opération de séchage.

V.5. Analyse des résultats

L'évolution temporelle des différentes températures est proportionnelle à l'évolution temporelle du rayonnement solaire, ce qui explique que ses variations ont la même allure générale des courbes, mais celle de la plaque absorbante est plus élevée par rapport aux autres composants, parce que :

- Comme prévu dans les différentes figures, la plaque absorbante est la température à son niveau le plus élevé, ceci est dû à la puissance absorbée par l'absorbeur qui est plus importante aux autres composants, car la plaque absorbante (en acier galvanisé peinte en noir mat) a des caractéristiques particulières (coefficient d'absorption élevé et coefficient de transmission faible).
- L'absorption du flux solaire, provoque progressivement une augmentation de la température du fluide caloporteur (l'air) lors de son passage dans la gaine, ce qui lui permet d'emmagasiner une certaine énergie en forme de chaleur.
- L'élévation de la température au niveau du verre, est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident, ainsi qu'aux caractéristiques du vitrage qui est en raison de

l'emprisonnement des rayons infrarouges, à l'intérieur du capteur (effet de serre).

- Et comme l'isolant est placé à la face arrière et latérale du collecteur, possède lui la plus faible température selon les composants, ce qui indique qu'il y a une conductivité thermique élevée et le rayonnement solaire n'atteint pas complètement cette surface.

Enfin, on peut dire que notre insolateur fonctionne normalement et donne de bon résultats, non seulement grâce de la forte irradiation solaire et le ciel dégagé, mais aussi qu'il faut minimiser les pertes thermiques en utilisant une bonne isolation des parois du capteur et de la vitre.

Conclusion

Dans cette étude expérimentale, un capteur solaire plan à air a été réalisé et testé au laboratoire dans la région d'Adrar, en matière de captage du rayonnement solaire, dans le but de confirmer que l'insolateur, s'il est bien conçu d'une meilleure manière, il présente une solution forte intéressante pour la satisfaction des besoins en énergie calorifique à basses et moyennes températures.

Notre conception a permis d'obtenir des températures du fluide assez élevées à la sortie, favorables pour les exploiter dans le séchage des produits agro-alimentaires.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

Le capteur plan à air, par la voie solaire revêt une importance et ce pour deux raisons : nécessité d'économie de l'énergie et souci de se procurer de nouvelles ressources.

Pour atteindre ce but, nous avons illustré la meilleure procédure du capteur, vu l'importance du rayonnement solaire, qui représente la seule source d'énergie utilisée dans le captage solaire.

Ceci nous amène à entreprendre une étude des phénomènes physiques qui conditionnent le fonctionnement du capteur solaire (rayonnement, conduction et convection), à travers l'étude et la résolution des différentes équations régissant les échanges thermique pour les différents composants du l'insolateur, à savoir le coefficient, décrivant l'intensité et la qualité du transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur, qui représente un paramètre capital sur le rendement et la performance du capteur.

Après avoir développé ces équations, nous avons élaboré des hypothèses qui nous permettent d'émettre en évidence les différents paramètres influant sur la production du capteur.

L'analyse des différents résultats obtenus, nous a permet de mettre les différentes recommandations - les améliorations relatives aux composants et à la procédure du capteur - permettant une bonne adaptation et par la suite une meilleure exploitation de ces systèmes lorsqu'ils sont installés en milieu Saharien.

En tenant compte des hypothèses considérées, et à travers les résultats obtenus, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

Les différents facteurs qui influent sur la performance thermique du capteur sont :

- Les conditions climatiques, l'énergie incidente, et la température extérieure.
- La géométrie du capteur : caractéristique de l'isolant, débit du fluide caloporteur, caractéristiques du vitrage et de l'absorbeur.

Cependant, pour avoir une meilleure efficacité, on doit maintenir :

- Un large écart de température entre l'entrée et la sortie du fluide caloporteur.
- Une conductivité thermique élevée.

Quant à l'espoir d'assister un jour à la généralisation des applications dans les différents domaines exprimant des besoins compatibles avec les performances des capteurs, il faudra attendre une politique énergétique incitative en la matière comme cela se produit actuellement dans les pays dits développés.

NOMENCLATURE

URER.MS	L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien	
I_0	Constante solaire	[W/m ²]
I_{0n}	La variation de I_0 en fonction de l'année.....	[W/m ²]
n	Quantième jour de l'année.....	
W	L'angle horaire.....	[degré]
TSV	Temps solaire vrai	[heures]
a	Azimut du soleil.....	[degré]
h	Hauteur du soleil	[degré]
i	Inclinaison du capteur.....	[degré]
TS	Temps solaire	[heures]
TL	Temps légal.....	[heures]
$L_{o-réf}$	Longitude de référence	[degré]
L_{o-lieu}	Longitude du lieu	[degré]
E_t	Equation du temps	[heures]
TU	Temps universel	[heures]
TSM	Temps solaire moyen	[heures]
TSVA	Temps solaire vrai astronomique	[heures]
Dj	Durée du jour	[heures]
I	Rayonnement direct : Plan horizontal.....	[W/m ²]
S	Rayonnement direct : Plan incliné.....	[W/m ²]
D	Rayonnement diffus : Plan horizontal.....	[W/m ²]

Nomenclature

D*	Rayonnement diffus : Plan incliné	[W/m ²]
G	Rayonnement globale : Plan horizontal	[W/m ²]
G*	Rayonnement globale : Plan incliné	[W/m ²]
R	Rayonnement diffus du sol	[W/m ²]
Pr1	Partie du rayonnement solaire réfléchi par la vitre..	[W/m ²]
Pv1	Partie du rayonnement solaire absorbée par le verre	[W/m ²]
Pd	Partie du rayonnement sera ré-rayonnée ou communiquée à l'air ambiant par convection.....	[W/m ²]
Pr2	Partie de Pd va traverser la vitre et sera perdue définitivement.....	[W/m ²]
Pv2	Partie absorbée par la vitre.....	[W/m ²]
Pa2	Partie reste retournera vers l'absorbeur.....	[W/m ²]
X	Variable d'espace dans la direction du flux	[m]
S	Aire de la section de passage du flux de chaleur...	[m ²]
h	Coefficient de transfert de chaleur par convection..	[W/m ² .°C]
T_p	Température de surface du solide	[°C]
T_∞	Température du fluide loin de la surface du solide.	[°C]
h^{cv}_{vit-am} ...	Coefficient d'échange par convection entre le vitrage et l'air ambiant dû au vent.....	[W/m ² .°C]
V_{vent}	vitesse du vent	[m/s]
h^{cv}_{abs-f} ...	Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.....	[W/m ² .°C]
Gz	Nombre de Graetz.....	
Re	Nombre de Reynolds	

Nomenclature

Pr	Nombre de Prandtl	
Nu	Nombre de Nusselt	
Dh_c	Diamètre hydraulique	[m]
L_c	Longueur de capteur.....	[m]
K_f	Coefficient de Conductivité thermique du fluide....	[W/m.°C]
V_f	Vitesse de l'air.....	[m/s]
Cp_f	Chaleur spécifique du fluide.....	[j/Kg.K]
Sp_c	Section de passage du capteur.....	[m ²]
P_m	Périmètre mouillée.....	[m]
h_{f-vit}^{cv}	Coefficient de transfert par convection entre le fluide caloporteur et la vitre.....	[W/m ² .°C]
h_f^{cv}	Coefficient de transfert par convection du fluide...	[W/m ² .°C]
h_{vit_vc}^r	Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et la voûte céleste.....	[W/m ² .°C]
T_{vit}	température de la vitre.....	[°C]
T_{vc}	La température de la voûte céleste.....	[°C]
h_{vit-abs}^r	Coefficient de transfert radiatif entre la vitre et l'absorbeur.....	[W/m ² .°C]
T_{abs}	T _{moy} arithmétique de l'absorbeur.....	[°C]
h_{abs-arr}^{cd} ...	Le coefficient de transfert par conduction entre l'absorbeur et la tôle arrière.....	[W/m ² .°C]
k_{abs} ...	Coefficient de Conductivité thermique de l'absorbeur.....	[W/m.°C]

Nomenclature

k_{arr} ...	Coefficient de Conductivité thermique de la tôle arrière.....	[W/m.°C]
$e_{p_{abs}}$	Epaisseur de l'absorbeur.....	[m]
$e_{p_{arr}}$..	Epaisseur de la tôle arrière.....	[m]
$h_{abs-vit}^{cv}$...	Coefficient de transfert par convection entre la vitre et l'absorbeur.....	[W/m ² .°C]
h_{vit-vc}^{cv} ...	Coefficient de transfert par convection entre la vitre et la voûte céleste.....	[W/m ² .°C]
U_{av} ...	Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur.....	[W/m ² .°C]
q_{Pav}	Chaleur perdue vers l'avant du capteur...	[W/m ²]
U_{arr}	Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur.....	
q_{Parr} ...	Chaleur perdue vers l'arrière du capteur.....	[W/m ²]
U_{lat}	Coefficient de pertes thermiques latérales	[W/m ² .°C]
A_{lat}	Aire latérale du capteur	[m ²]
k_{is}	Coefficient conductivité thermique de l'isolant.....	
$e_{p_{is}}$	Epaisseur de l'isolant arrière.....	[m]
E_{is}	Epaisseur de l'isolant latérale.....	[m]
q_{Plat}	Chaleur perdue vers latérales du capteur	[W/m ²]
U_T	Le coefficient de pertes thermiques global vers l'extérieur	
q_{Pt}	Chaleur perdue globale du capteur.....	[W/m ²]
P_a	la puissance reçue pas l'absorbeur	[W]

E.....	Éclairement énergétique (densité de flux) au niveau du capteur	[W/m ²]
C.....	facteur de concentration géométrique du capteur...	
P_u.....	Chaleur emmagasiné par le fluide (chaleur utile)...	[W/m ²]
G_i.....	Solaire incident	[W/m ²]
L.....	Longueur du capteur.....	[m]
l.....	Largeur du capteur.....	[m]
h*.....	Hauteur de la veine d'air	[m]
FLUKE	Marque d'acquisition de données	
Kypp & Zonen.....	Type de deuxième classe d'un « Pyranomètre »	
P_{abs}.....	Eclairement globale incident sur un surface incliné de 30° par rapport à l'horizontale.....	[W/m ²]
T_{ps}.....	Température à la sortie du capteur au niveau de la plaque absorbante	[°C]
T_{pc}.....	Température au centre du capteur au niveau de la plaque absorbante	[°C]
T_{pe}.....	Température à l'entrée du capteur au niveau de la plaque absorbante.....	[°C]
T_v.....	Température au niveau de la vitre	[°C]
T_{sair}.....	Température à la sortie du capteur au niveau de la veine d'air	[°C]
T_{amb}.....	Température ambiante	[°C]

ΔT le gradient (l'écart) de température entre l'entrée et [°C]
la sortie du fluide

LETRES GRECS

δ	La déclinaison du soleil.....	[degré]
θ	Angle d'incidence.....	[degré]
θ_z	Angle zénithal.....	[degré]
ρ	Albédo du sol.....	[degré]
β	Inclinaison du plan récepteur	[degré]
λ	Conductivité thermique	[W/m.°C]
$\bar{\rho}$	Masse volumique	[Kg/m ³]
ρ	La réflexivité.....	[%]
α	L'absorptivité.....	[%]
τ	La transmissivité	[%]
Φ	Flux de chaleur	[W]
σ	Constante de Stephan	[W/m ² .K ⁴]
ϵ_p	Facteur d'émission de la surface	
μ_f	Viscosité dynamique du fluide caloporteur.....	[kg/m.s]
ϵ_{vit}	L'émissivité de la vitre.....	[%]

Nomenclature

$\epsilon_{abs}.....$	L'émissivité de l'absorbeur.....	[%]
$\Phi_{sa}.....$	Puissance absorbée	[W/m ² .]
$\Phi_u.....$	Puissance utile.....	[W/m ² .]
$\Phi_p.....$	Puissance perdu.....	[W]
$\Phi_{st}.....$	l'énergie thermique stockée dans les différents composants du capteur	[W/m ² .]
$\tau_v.....$	Coefficient de transmission de la vitre	[%]
$\eta_{ins}.....$	Rendement instantané	[%]
$\eta_j.....$	Rendement journalier.....	[%]
$\eta_{op}.....$	Le Rendement Optique	[%]

PRÉSENTATION DE L'UNITÉ
(URER.MS)

PRESENTATION DE L'UNITE :

L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) est une structure de recherche, créée par Arrêté ministériel n° 76 du 22 mai 2004 au sein de l'EPST Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah.

Les activités de recherche scientifique et de développement technologique menées à l'URER.MS s'inscrivent dans le cadre du programme national de recherche en énergies renouvelables, considéré par les pouvoirs publics comme prioritaire et mobilisateur.



Fig. 1: Photo représentant la Station d'Expérimentation des Equipements Solaires en Milieu Saharien d'Adrar

La vocation essentielle de l'Unité est la recherche scientifique appliquée et le développement technologique. Elle est chargée d'entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation pour la promotion et le développement des énergies renouvelables dans les régions sahariennes. Il s'agit de:

- Collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes,
- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipements de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse,
- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne,
- Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire et éolienne,
- Entreprendre des travaux de production et de valorisation de la biomasse à des fins énergétiques, environnementales et agronomiques.

L'unité de recherche comprend deux (02) Divisions de recherche :

La Division Conversion Photovoltaïque composée de cinq (05) équipes de recherche :

- Equipe Gisement Solaire.
- Equipe Pompage Photovoltaïque.
- Equipe Froid Photovoltaïque.
- Equipe Electronique des Systèmes.
- Equipe Installations de Puissance.

La Division Conversion Thermique et Thermodynamique composée de quatre (04) équipes de recherche :

- Equipe Chauffage Solaire.
- Equipe Distillation Solaire.
- Equipe Séchage Solaire.
- Equipe Bioconversion.

ANNEXE

NOMBRES ADIMENSIONNELLES

A.1. Nombre de Nusselt

La combinaison du coefficient d'échange de chaleur par convection, de la longueur caractéristique et de la conductivité thermique du fluide est appelée module ou nombre de Nusselt.

C'est le rapport du gradient de température dans le fluide en contact immédiat avec la surface au gradient de température de référence. Il caractérise l'intensité de l'échange de chaleur sur la limite fluide - surface.

$$NU = \frac{h_f^{cv} \cdot Dh_c}{K_f} \quad (\text{A. 1})$$

h_f^{cv} : Coefficient de convection thermique [w/m².°C]

Dh_c : Diamètre hydraulique [m]

K_f : Coefficient de conductivité thermique du fluide [w/m.°C]

A.2. Nombre de Prandtl

Ce nombre représente le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique ; il caractérise les propriétés physiques du fluide.

$$Pr = \frac{\mu_f \cdot Cp_f}{K_f} = \frac{\nu}{a} \quad (\text{A. 2})$$

Cp_f : La chaleur spécifique à pression constante [j/kg.°C]

K_f : La conductivité thermique du fluide [w/m.°C]

μ_f : La viscosité dynamique [kg/m.s]

ν : La viscosité cinématique [m²/s]

a : La diffusivité thermique [m²/s]

Plus la viscosité est grande plus l'énergie dépensée nécessaire pour véhiculer le fluide est élevée et plus la diffusivité est grande plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi.

A.3. Nombre de Reynolds

Ce nombre est une mesure de la grandeur relative des forces d'inertie par rapport aux forces de viscosité dans l'écoulement.

$$\mathbf{Re} = \frac{\rho_f \cdot V_f \cdot Dh_c}{\mu_f} = \frac{V_{ah} \cdot Dh_c}{\nu} \quad (\mathbf{A.3})$$

V_f : est la vitesse caractéristique du fluide [m/s]

Dh_c : Diamètre hydraulique [m]

μ_f : La viscosité dynamique [kg/m.s]

ν : La viscosité cinématique [m²/s]

ρ_f : La masse volumique du fluide [kg/m³]

A.8. Nombre de Graetz

Ce nombre porte le nom de Leo Graetz, un physicien allemand.

C'est un nombre sans dimension, qui caractérise l'écoulement laminaire dans un conduit.

Le nombre est défini de la manière suivante :

$$\mathbf{Gz} = \mathbf{Re} \cdot \mathbf{Pr} \frac{Dh_c}{L_c} \quad (\mathbf{A.4})$$

Re : Nombre de Reynolds

Pr: Nombre de Prandlt

D_{hc} : Diamètre hydraulique [m]

L_c : Longueur de capteur [m]

BIBLIOGRAPHIE

- [1]- Jean Desmons «Aide-mémoire de génie climatique - 3ème édition» Dunod/Pyc Editions 2012.
- [2]- Hermann Recknagel, Eberhard Sprenger, Ernst-Rudolf Schramek, Adélaïde Bodson «Génie climatique» Dunod/Clim pratique 2007.
- [3]- Volker Quaschnig «Undertanding Renewable Ennery Systems» London ; Sterling, VA : Earthscan, 2005.
- [4]-Harmim A. « Contribution à l'estimation des performances énergétiques de différents système solaires en milieu Saharien » Thèse de Magister CDER 1994.
- [5]- Alain Ricaud «Gisement solaire et transferts énergétiques » Université de CERGY-PONTOISE 2011.
- [6]-Majid Ghassemi, Alma Cota, Robert Foster «Solar Energy: Renewable Energy and the Environment» 2010.
- [7]- M^r AZZI., « Cours : Energie Solaire» Université ABOU-BEKR BELKAID –Tlemcen-2013.
- [8]- André JOFFRE «Énergie solaire thermique dans le bâtiment. » Centre français d'exploitation du Techniques de l'Ingénieur. 2008
- [9]- Solar-Energy Engineering Processes and Systems Elsevier 2009.
- [10]- KASBADJI N & MERZOUK M., « Les capteurs solaires plans : conception et performances », CDER Bouzareah, Alger, 2008.
- [11]- BELKACEM.Z et KECHRA.A « Etude Expérimentale d'un capteur solaire thermique à air » Mémoire de fin d'étude, CDER. 2011.
- [12]- MOUMMI A., « Etude global et locale du rôle de la géométrie dans l'optimisation des capteurs solaires plans à air », Thèse de Doctorat , Université de valenciennes et du Hainaut-Cambrésis1994.

- [13]- René Ducroux et Philippe Jean- Baptiste «L'effet de serre : réalité, conséquences et solutions » CNRS, 2004.
- [14]- Merzouk M. « Rapport d'activités scientifique 1986-1990 » CDER.
- [15]- Pierre Odru «Le stockage de l'énergie » Dunod 2010.
- [16]- Robert Celaire « Les chauffe-eau solaires Capteurs-Stockeurs » Gret/GERES/SYNOPTIS.
- [17]-M.Dagunet « Le séchage solaire théorie et pratique » UNESCO, Paris, 1985.
- [18]-M^r KHADRAOUL, « Cours: Transfert de chaleur » Université ABOU-BEKR BELKAID –Tlemcen-2012.
- [19]- Arnold Jorge de Pariva Cruz Costa « Caractérisation et modélisation des capteurs à faibles concentration » Thèse de Doctorat Université de Paris Octobre 1987.
- [20]- Duffie, J. A. and Beckman, W. A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Edition, John Wiley & Sons, USA, 2006.

Résumé

Dans cette étude, on présente les résultats des essais effectués sur le capteur solaire à air à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (U.R.E.R/M.S) d'Adrar.

En premier lieu, on donne la méthode de réalisation du prototype expérimental en se référant aux modèles standards des capteurs à air, ensuite une campagne de mesures a été menée afin de juger les performances thermiques de ce système.

Les paramètres mesurés nous permettront d'appuyer l'analyse théorique, valoriser notre capteur solaire à air, et pour une éventuelle utilisation de notre capteur dans le séchage des produits agro-alimentaires.

Mots clés: Energie solaire - Transfert de chaleur - Convection naturelle - Capteur solaire à air – Expérimentation - Séchage solaire.

Summary

In this study, the results of tests on the solar air to the Unit for Research in Renewable Energy Mid Sahara (ure / MS) Adrar is presented.

First, we give the method of realization of experimental prototype with reference to standard models of air collectors, then a companion measures was conducted to determine the thermal performance of the system.

The measured parameters will allow us to support the theoretical analysis, enhance our solar air collector, and for possible use in our sensor drying of food products.

Keywords: Solar energy - heat transfer - natural convection - air solar collector - Testing - Solar Drying.

ملخص

في هذه الدراسة، نقدم نتائج الاختبارات المنجزة على اللاقط الشمسي على مستوى وحدة البحث في مجال الطاقات المتجددة في الوسط الصحراوي أدرار.

في المقام الأول، نستعرض طريقة إنجاز النموذج التجريبي مع الإشارة إلى النماذج المثالية للواقط الشمسية، إضافة إلى مجموعة من القياسات مصاحبة لهذه الطريقة و هذا من أجل تحديد الأداء الحراري للنظام.

المعطيات المقاسة تسمح لنا بوضع التحليل النظري، تحسين أداء اللاقط الشمسي، وإمكانية استخدام هذا الأخير في عمليات تجفيف المنتجات الغذائية.

كلمات المفتاح: الطاقة الشمسية - نقل الحرارة - الحمل الحراري الطبيعي - اللاقط الشمسي - التجريب - التجفيف الشمسي.