

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : DES SCIENCES  
DEPARTEMENT : PHYSIQUE

N° : .....



DOMAINE : SCIENCE DE LA MATIARE  
FILIERE : PHYSIQUE  
OPTION : ENERGIE SOLAIRE

**Mémoire présenté pour l'obtention  
Du diplôme de Master Académique**

**Par: BENADEL Cilia**

**Intitulé**

**Étude numérique de l'effet des matériaux  
isolants sur les performances thermique des  
capteurs solaires plans**

**Soutenu le 23 / 05 /2017 devant le jury composé de:**

TALOUB Djedid	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Président
BOURAS Abedlkarim	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Rapporteur
HADDAD Zakaria	Université M <sup>ed</sup> BOUDIAF M'sila	Examineur

**Année universitaire : 2016/2017**



---

## *Remerciements*

*Je remercie ALLAH de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*J'exprime mes gratitude, mes reconnaissances et mes sincères remerciements à Dr. Bouras Abdelkrim pour m'avoir encadré tout le long de mon projet.*

*J'adresse mes remerciements à monsieur le président de jury et messieurs les membres de jury d'avoir accepté de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer au jury de ce mémoire.*

*Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de physique.*

*M<sup>lle</sup> BENADEL CILIA*



---

*Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mes chers parents*

*A mes frères*

*A toute la famille Benadel*

*A mon encadreur Mr Bouras Abdelkrim*

*A tous mes collègues et mes amis partout*

*Surtout Lamia, Zakia, Soumia, Aicha, Siham*

*A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science*

*et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien*

*et la prospérité de l'humanité.*

## Résumé

L'objectif de ce travail est motivé par la recherche de procédé, évidemment intermittent, qui saura exploiter gratuitement l'abondance de l'énergie solaire. Notre étude consiste à mettre en relief l'effet des paramètres internes (flux, isolant, débit) sur un capteur solaire plan à eau. La méthode nœuds consiste à découper le capteur en tranches fictives (mailles) de longueur  $\Delta x$  dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à établir les bilans des échanges qui interviennent aux niveaux des nœuds considérés : l'extérieure de la vitre, l'intérieur de la vitre, l'absorbeur, dans le fluide caloporteur ainsi que l'intérieure et l'extérieur de l'isolant. Il est commode pour cela d'utiliser l'analogie qui existe entre les transferts de chaleur et les lois électrique. Les profils des températures au niveau des principaux nœuds ont été commentés.

**Mots clés :** *Rayonnement solaire, capteur plan, matière isolante.*

## Abstract

The objective of this work is motivated by the research of process, obviously intermittent, which will know how to exploit free the abundance of the solar energy. Our study consists of master in relief the effect of internal parameters (flux, insulating material, flow) on a plane solar collector. The nodes method consists in cutting the sensor into fictitious slices (meshes) of length  $\Delta x$  in the flow direction of the heat transfer fluid and in establishing the balance of the exchanges occurring at the levels of the nodes considered: the outside of the window, The interior of the window, the absorber, in the pedestrian fluid as well as the inside and the outside of the insulator. It is convenient for this to use the analogy that exists between heat transfers and electrical laws. The temperature profiles at the major nodes were commented.

**Keywords:** *Solar radiation, plane collector, insulating material*

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هي استغلال الطاقة الشمسية. نقوم بدراسة تأثير العوامل الداخلية (أشعة تدفق، عوازل حرارية) علي لاقط شمسي مائي خاضع لأشعة شمسية متغيرة.

تعتمد طريقة العقد علي تقسيم اللاقط إلي أقسام ذات طول  $\Delta x$  في اتجاه جريان السائل, ثم نوجد المعادلات في العقد الزجاج الخارجي الزجاج الداخلي المادة العازلة السائل أيضا علي مستوى المادة العازلة في الداخل وفي الخارج هذا يقودنا إلي استعمال طريقة التماثل بين انتقال الحرارة والقوانين الكهربائية. ومن ثم نحسب درجات الحرارة في العقد الرئيسية.

**الكلمات المفتاحية :** الإشعاع الشمسي، لاقط مستوي، المواد العازلة.

## Table des Matières

Remerciement	
Dédicace	
Table des matières.....	i
Liste des figures.....	iv
Liste des tableaux.....	v
Nomenclature.....	vi
Introduction générale .....	1
Référence .....	3

### Chapitre 1 : Gisement Solaire

1.1. Introduction.....	4
1.2. Soleil .....	4
1.2.1. Présentation générale .....	5
1.3. Rayonnement solaire .....	7
1.3.1. Rayonnement direct .....	8
1.3.2. Rayonnement diffus .....	8
1.3.3. Rayonnement global .....	8
1.4. Calcul de la position du soleil .....	9
1.4.1. Paramètre de position .....	9
Coordonnées géographiques .....	9
Coordonnées célestes horizontales .....	9
Coordonnées célestes horaires .....	10
1.4.2. Paramètre de temps .....	11
1.5. Diagramme solaire .....	11
Référence .....	13

### Chapitre 2 : Généralité sur les capteurs solaires thermique

2.1. Utilisation directe de l'énergie solaire.....	14
2.2. Énergie Solaire thermique .....	14
2.3. Définition et principe d'un capteur solaire .....	15
2.4. Diversité des capteurs solaires et leur application .....	16
2.4.1. Capteurs solaires thermique à basse température .....	16
2.4.2. Capteurs solaires à haute température .....	16
2.5. Différents types des capteurs solaires thermiques.....	17
2.5.1. Captures solaires planes .....	17
2.5.1.1. Capteurs plans non vitrés .....	18
2.5.1.2 Capteurs plans vitrés .....	19
2.5.1.3. Capteurs à tubes sous vide .....	20
2.5.2. Capteurs à concentration .....	21
2.6. Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires .....	22
2.7. Conclusion .....	24
Référence .....	24

### Chapitre 3 : Etude théorique d'un capteur thermique plan

3.1. Introduction .....	25
3.2. Composants des systèmes solaires plans .....	25
3.3. Composants d'un capteur solaire plan .....	26
3.3.1. L'absorbeur .....	26
3.3.2. Couche sélective de l'absorbeur .....	27
3.3.3. Couverture transparente (vitrage) .....	27
3.3.4. Fluide caloporteur .....	27
3.3.5. Isolation thermique .....	27
3.3.6. Cadre .....	28
3.4. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire.....	28
3.4.1. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires .....	29
3.4. Conclusion .....	30
Référence .....	31

### Chapitre 4 : Etude numérique d'un capteur thermique plan

4.1. Introduction .....	32
4.2. Rappels sur les transferts de chaleur .....	33
4.2.1. Conduction .....	33
4.2.2. Convection .....	34
4.2.2.1. Convections libres ou naturelles .....	34
4.2.2.2. Convections forcées .....	34
4.2.2.3. Calcule le coefficient d'échange par convection .....	34
4.2.3. Rayonnement .....	35
4.3. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire .....	36
4.3.1. Échanges thermiques au niveau de la vitre .....	36
4.3.2. Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur .....	37
4.4. Rendement instantané du capteur solaire .....	39
4.5. Calcul du coefficient de Perte thermiques globale .....	40
4.5.1. Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur .....	43
4.5.2. Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur .....	43
4.5.3. Coefficient de pertes thermiques latérales .....	43
4.6. Mise en équation du problème .....	44
4.6.1. Modèle physique .....	44
4.6.2. Rayonnement global extraterrestre .....	44
4.6.3. Simulation du capteur .....	45
4.6.4. Discrétisation des équations .....	46
4.6. Traitement numérique d'un capteur thermique plan .....	48
4.6.1. Programme principal .....	48
4.6.3. Organigramme général .....	50
Référence .....	51

---

**Chapitre 5 : Résultat et discussion**


5.1. Evolution de température de sortie .....	53
5.2. Influence de flux global sur la température de sortie .....	54
5.3. Évolution de rendement instantané .....	55
5.4. Influence de flux global sur le rendement instantané .....	56
5.5. Conclusion .....	57
<b>Conclusion général</b> .....	<b>59</b>

**Annexe**

**Résumé**

## Liste des figures

Fig.1.1	Structure du soleil .....	6
Fig.1.2	Spectre solaire .....	7
Fig.1.3	Variation mensuelle de la constante solaire .....	8
Fig.1.4	Composants du rayonnement solaire .....	9
Fig.1.5	Coordonnées célestes horizontales .....	10
Fig.1.6	Variation annuelle de la déclinaison solaire .....	10
Fig.1.7	Organigramme permettant de construire le diagramme solaire pour une latitude donnée .....	12
Fig.2.1	Capteur solaire thermique .....	15
Fig.2.2	Vue en coupe d'un capteur plan .....	17
Fig.2.3	Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif .....	18
Fig.2.4	Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif .....	19
Fig.2.5	Capteurs plans vitrés .....	19
Fig.2.6	Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés .....	20
Fig.2.7	Capteurs à tube sous vide .....	21
Fig.2.8	Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide .....	21
Fig.2.9	Concentrateur cylindro-parabolique .....	22
Fig. 3.1	Composants d'un capteur solaire plan .....	26
Fig. 3.2	Principe de fonctionnement du capteur solaire plan .....	29
Fig.4.1	Différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré .....	36
Fig.4.2	Circuit électrique équivalent relative à un capteur solaire plan .....	40
Fig.4.3	Schéma de principe d'un capteur solaire plan .....	43
Fig.5.1	Déclinaison du soleil tout au long de l'année .....	51
Fig.5.1	Evolution de la température de sortie d'eau en fonction de temps .....	52
Fig.5.2	Evolution de la température de sortie d'eau en fonction de l'irradiation globale .....	53
Fig.5.3	Variation de rendement instantané en fonction de L'irradiation globale .....	54
Fig.5.4	Variation du rendement instantané en fonction des propriétés de l'isolant.....	55



---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1	Valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans .....	A
Tableau 2.1	Caractéristiques principales du soleil .....	5
Tableau 2.2	Répartition spectrale du rayonnement thermique .....	7
Tableau 3.1	Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur .....	A
Tableau 3.2	propriétés de quelques revêtements sélectifs .....	A
Tableau 3.3	propriétés de différentes surfaces transparentes .....	A
Tableau 3.4	Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants .....	A

## Nomenclature

$K$ : Coefficient de déperdition du capteur	$[W/m^2/°C]$
$C_0$ : Constante solaire	$[W/m^2]$
$Q_{cd}$ : Le flux de chaleur par conduction	$[W]$
$S$ : Aire de la section de passage du flux de chaleur	$[m^2]$
$\lambda$ : La conductivité thermique	$[W/m \text{ } °C]$
$X$ : Variable d'espace dans la direction du flux	$[m]$
$T_p$ : La température de surface de solide	$[°C]$
$Q_{cv}$ : Le flux de chaleur par convection	$[W]$
$T_\infty$ : La température du fluide avant son contact avec le solide	$[°C]$
$h_c$ : Le coefficient de transmission thermique par convection	$[W/m^2 \cdot °C]$
$U_m$ : vitesse moyenne du fluide	$[m/s]$
$Gr$ : nombre de Grashof	$[ ]$
$Re$ : le nombre de Reynolds	$[ ]$
$Pr$ : le nombre de Prandtl	$[ ]$
$Nu$ : le nombre de Nusselt	$[ ]$
$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann	$[W/m^{-2}K^{-4}]$
$\alpha_v$ : Coefficient d'absorption de la vitre	$[ ]$
$S_v$ : Surface de la vitre	$[m^2]$
$G$ : Le rayonnement global	$[W/m^2]$
$T_{am}$ : La température ambiante	$[°C]$
$h_{cvam}$ : coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant	$[W/ \cdot m^2 \cdot °C]$
$V$ : La vitesse du vent	$[m/s]$
$T_{ciel}$ : La température de ciel	$[°C]$
$h_{rcv}$ : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et ciel	$[W/ m^2 °C]$
$T_{ab}$ : La température de l'absorbeur	$[°C]$
$S_{ab}$ : La surface de l'absorbeur	$[m^2]$
$T_i$ : température de l'isolant	$[°C]$
$S_{abi}$ : surface de contact absorbeur isolant pour la face avant	$[m^2]$
$S_{abil}$ : surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale	$[m^2]$
$\lambda_i$ : conductivité thermique de l'isolant	$[W \cdot m^{-1}/°C]$

---

$\lambda_{il}$ : conductivité thermique de l'isolant	[W. m <sup>-1</sup> /°C ]
$\lambda_{ab}$ : conductivité thermique de l'absorbeur	[W. m <sup>-1</sup> /°C ]
$L_{ab}$ : épaisseur de l'absorbeur	[m]
$L_i$ : épaisseur de l'isolant	[m]
$L_{il}$ : épaisseur de l'isolant latéral	[m]
$h_{cabv}$ : Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur	[W/m <sup>2</sup> °C]
$b$ : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante	[m]
$K_{air}$ : conductivité thermique de l'air	[W/m. °C]
$T_f$ : température du fluide caloporteur	[°C]
$S_{abf}$ : surface de contact absorbeur fluide caloporteur	[m <sup>2</sup> ]
$h_{cabf}$ : coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide	[W/ m <sup>2</sup> . °C ]
$\Omega$ : coefficient de Darcy	[ ]
$d_i$ : diamètre intérieur	[m]
$L$ : longueur du tube	[m]
$D$ : diamètre du tube	[m]
$\lambda_{eau}$ : conductivité thermique de l'eau	[Wm <sup>2</sup> /°C]
$\alpha_{ab}$ : coefficient d'absorption de l'absorbeur	[ ]
$\tau_v$ : Coefficient de transmission de la vitre	[ ]
$G$ : éclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_u$ : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	[W]
$\lambda_i$ : Conductivité thermique de l'isolant	[W m <sup>2</sup> /°C ]
$\lambda_a$ : Conductivité thermique de l'air	[Wm <sup>2</sup> /°C]
$S_{in}$ : Inclinaison des capteurs	[°]
$e_i$ : Epaisseur de l'isolant	[m]
$A_{lat}$ : Surface latérale du capteur	[m <sup>2</sup> ]
$A_c$ : Surface du capteur	[ m <sup>2</sup> ]
$\lambda$ : La longitude	[°]
$L$ : La latitude	[°]
$Z$ : L'altitude	[°]
$U_T$ : Coefficient de déperdition du capteur	[W/m <sup>2</sup> . °C]
$U$ : Le coefficient de transmission surfacique	[W/m <sup>2</sup> . °C]
$C_p$ : Chaleur spécifique	[J/kg.K]

---

## *Introduction générale*

---

Depuis la révolution industrielle du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'utilisation de l'énergie d'origine fossile a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles énergies est devenue nécessaire pour subvenir aux besoins actuels de l'humanité.

En effet, le besoin en énergie à multiplier par 10 avec un accroissement à partir des années 40 du siècle dernier, ce qui a pour conséquence l'épuisement des ressources habituelles en matière d'énergie. Les énergies renouvelables notamment le gisement solaire (le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée) ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contrechoc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes l'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde. Il est la plus simple et la plus directe il se trouve dans des plusieurs application thermiques de l'énergie solaire, telles que le dessalement, les échange des produits agroalimentaires et le chauffage des habitations ou de l'eau sanitaire [1].

L'un des outils utilisés pour exploiter l'énergie solaire est le capteur solaire, le capteur solaire joue un rôle de convertisseur du rayonnement solaire incident en chaleur.

En général est constitué d'un couvert transparent, absorbeur, d'une ou plusieurs vitres et isolant sur la partie non réceptrice. L'évacuation de la chaleur reçue par l'absorbeur se fait par utilisation de divers fluides caloporteurs. Il ya plusieurs type des capteurs utilisé : les capteurs à concentration, les capteurs sous vide, les capteurs non vitré, les capteurs vitré.

Les performances de l'installation à laquelle appartient ce convertisseur dépendent essentiellement du rendement de ce dernier. En pratique, ce rendement est fonction de l'énergie utile qu'on cherche toujours à augmenter :

- par augmentation de la chaleur reçue par l'absorbeur en augmentant la part du rayonnement absorbé (revêtement de l'absorbeur d'une teinture noire mate)
- par diminution des pertes par conduction de chaleur vers les zones non réceptrices conduction (nécessité d'une bonne isolation) perte par convection et vers l'avant du capteur (nécessité d'un doublage des vitre) [2].

Pour réaliser un bon isolant en doit utiliser les isolants a ayant les qualités suivantes:

- ✓ une faible conductivité thermique.
- ✓ une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- ✓ la chaleur massique doit être basse.
- ✓ une grande résistance thermique
- ✓ Masse volumique.
- ✓ Température maximale d'utilisation.
- ✓ Son coût.

On distingue trois types d'isolants : isolants minéraux, isolants d'origine végétale, isolants organiques. Généralement les matières isolantes utilisées elles doivent résistés aux hautes températures qui peuvent être atteintes à l'intérieur d'un capteur plan thermique.

Dans le cadre de ce travail, nous allons intéresser à l'exploitation des différents isolants thermique et on va faire une comparaison entre elle pour déterminer le bons isolants de but d'optimiser la performance des capteurs solaires plan et d'améliorer leurs rendements.

Dans ce sens, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des capteurs solaires plans et ayant surtout pour but l'amélioration de son rendement instantané qui est la performance la plus significative. Le rendement instantané du capteur varie avec la

géométrie du capteur, l'ensoleillement et les conditions extérieures, et les matériaux isolants.

L'objectif de ce travail est l'étude numérique et calcul des performances énergétiques pour les différents isolants utilisés en prenant en compte les différents paramètres (quantité fluides à réchauffer, paramètres de rayonnement solaire, pertes thermique de l'installation, rendements, dans le but de faire le choix des isolants pour des applications données.

Le présent travail comporte cinq chapitres et une partie annexe.

- Introduction
- Chapitre 1 Gisement solaire.
- Chapitre 2 Généralité sur l'énergie solaire et description des capteurs solaires thermique.
- Chapitre 3 Etude théorique d'un capteur thermique plan.
- Chapitre 4 Etude numérique et calcul des performances des capteurs solaires plans.
- Chapitre 5 Résultat et discussion.

Nous terminerons cette mémoire par une conclusion générale sur les résultats obtenus au cours de cette étude et par l'énoncé des perspectives à venir.

## **Référence**

- [1] M. Capderou. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [2] R. Kharchi, N. Aït Messaoudène, M. Belhamelet A. Hamid, Etude Expérimentale du Comportement Thermique d'un Plancher Solaire Direct, Rev. Energ. Ren. : Journées de Thermique, pp 115-119. (2001).



---

# Chapitre

# 1

## *Gisement solaire*

---

### **1.1. Introduction**

Les ressources énergétiques mondiales peuvent être classées en [1,2] :

- Ressources fossiles et fissiles non renouvelables qui se sont accumulées dans l'écorce terrestre au cours des ères géologiques, du fait de processus biologiques ou Physico-chimiques.
- Ressources renouvelables qui trouvent leur origine dans les différents flux énergétiques naturels incidents à la surface de la terre, qui sont :
  - Le rayonnement solaire qui fournit 99.97% de sa densité thermique.
  - La chaleur interne terrestre qui fournit 0.03% de sa densité thermique.
  - Le travail des forces de gravitation.

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

### **1.2. Soleil**

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ 8 mn à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de centaure située à 4.23 années lumières du soleil mais la grande distance qui nous sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre [1,3].

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

### 1.2.1. Présentation générale

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

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

Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau (1.1) :

Tableau.1.1.Caractéristiques principales du soleil [5]

Diameter (km)	1392000
Masse (kg)	$2 \cdot 10^{30}$
Surface ( km <sup>2</sup> )	$6.09 \cdot 10^{12}$
Volume ( km <sup>3</sup> )	$1.41 \cdot 10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m <sup>3</sup> )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5 \cdot 10^{17}$

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

- Le noyau contient 40% de la masse du soleil, c'est là où se crée 90% de son énergie sous forme de rayons gamma et X, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures, cette zone s'étend sur une épaisseur de  $25 \cdot 10^4$  km, elle présente les caractéristiques suivantes [6,7] :
  - Une température de  $15 \cdot 10^6$  °C.
  - Une densité est de  $1015(\text{kg/m}^3)$ .
  - Une pression de 109 atm.
- La zone radiative où la chaleur produite se propage par une diffusion radiative, elle présente les propriétés suivantes [7,8] :
  - Une épaisseur de 244160 km.
  - Une température variant de  $10 \cdot 10^6$  °C à  $50 \cdot 10^4$  °C.

- La zone de convection où la chaleur produite se propage par une convection turbulente, elle présente les propriétés suivantes [6,7] :
  - Une température comprise entre  $50 \cdot 10^4$  °C à 6400 °C.
  - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [9]:
  - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
  - Une épaisseur de 500 km.
  - Une pression de 1/100 atm.
- La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [8,9] :
  - Une épaisseur 2000 km.
  - Une température augmentant de 4200 °C à  $10^4$  °C.
- La couronne : est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [7] :
  - Elle est sans limite précise.
  - La température augmente de  $10^6$  °C à  $2 \cdot 10^6$  °C.

La figure (1.1) montre la structure du soleil :

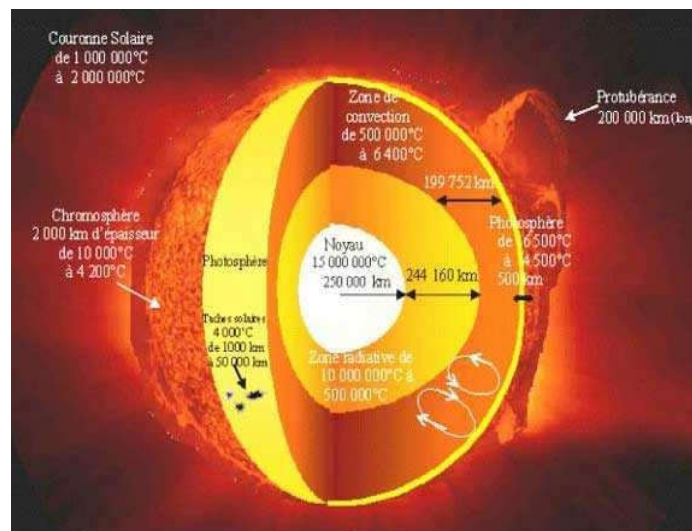


Fig.1.1. Structure du soleil [5]

### 1.3. Rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de  $3.10^8$  m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et  $8\mu\text{m}$  [8].

On pourra supposer avec une approximation acceptable que le soleil rayonne comme un corps noir porté à une température de 5762 K dite température apparente du soleil ne correspondant pas à la réalité physique [9].

La répartition de l'énergie solaire dans les bandes du spectre du rayonnement thermique est donnée dans le tableau (1.2) :

Tableau 1.2. Répartition spectrale du rayonnement thermique [7].

Longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	0-0.38	0.38-0.78	0.78
Percentage (%)	6.4	48	45.6
Energies ( $\text{W}/\text{m}^2$ )	87	656	623

La figure (1.2) illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes.

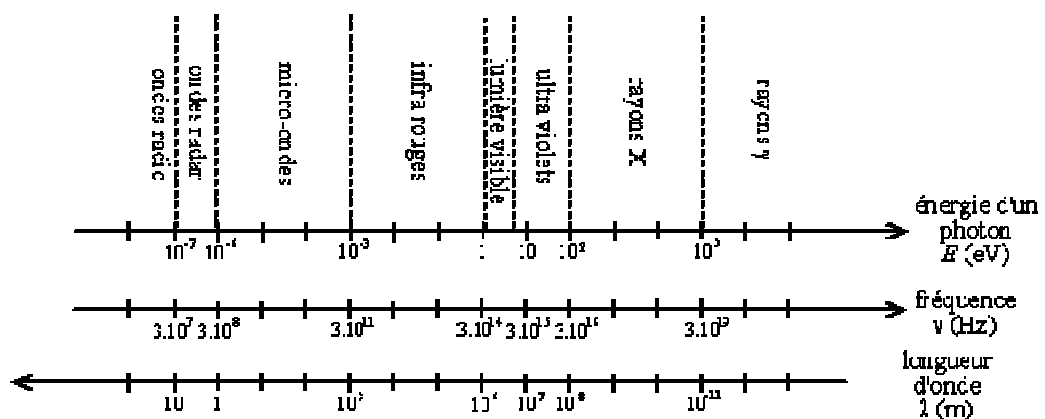


Fig.1.2. Spectre solaire

- **Constante solaire  $C^*$**

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

La variation de la constante solaire suit la relation suivante [7]:

$$c^* = c_0^* \cdot \exp \left[ 1 + 0.033 \cos \left( \frac{360}{365} \times j \right) \right] \quad (1.1)$$

$c^*$  : La constante solaire.

$c_0^* = 1353 \text{ (w/m}^2\text{)}$  est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [6].

$N$ : numéro du jour de l'année.

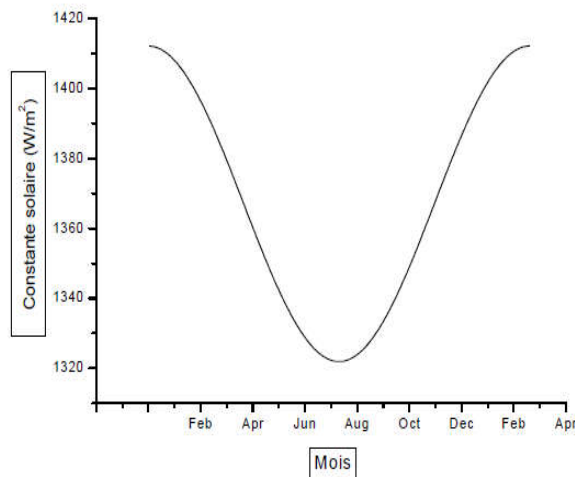


Fig.1.3.Variation mensuelle de la constante solaire [7]

### 1.3.1. Rayonnement direct

Le rayonnement direct est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.

### 1.3.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.

### 1.3.3. Rayonnement global

Le rayonnement global est la somme des rayonnements diffus et direct.

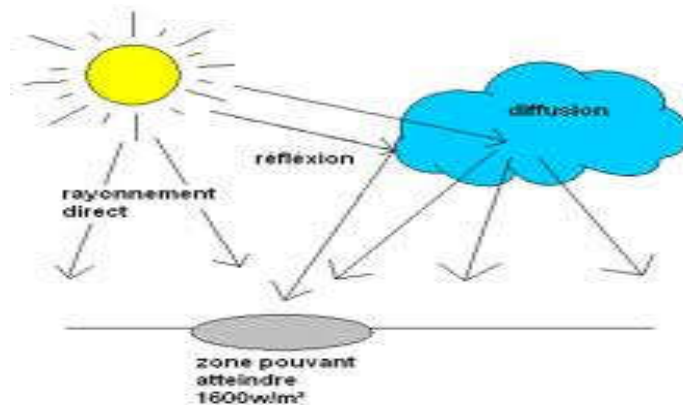


Fig.1.4 .Composants du rayonnement solaire

## 1.4. Calcul de la position du soleil

### 1.4.1. Paramètres de position

#### \* Coordonnées géographiques

Tout point de la surface de la terre est repéré par ses coordonnées géographiques [9, 11,12]:

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

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

#### \* Coordonnées célestes horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles qui sont [9,12]:

- L'azimut (a) est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (figure 1.5). Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \cos(\delta) \frac{\sin(w)}{\sin(h)} \quad (1.2)$$

- La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal (figure I.5), elle est donnée par la formule [9,12]:

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(\delta) + \sin(L) \times \cos(\delta) \times \cos(w) \quad (1.3)$$

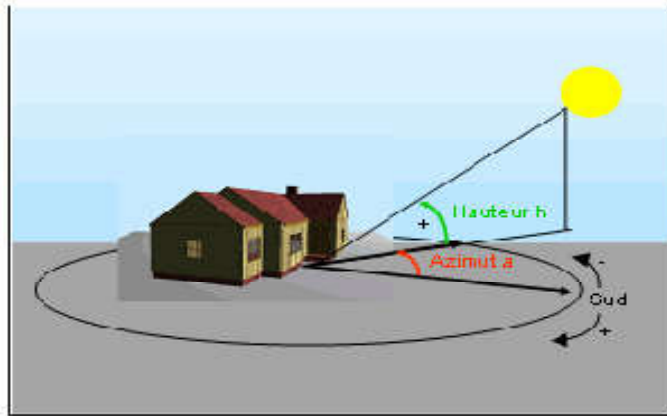


Fig.1.5. Coordonnées célestes horizontales

**\* Coordonnées célestes horaires**

- L'angle horaire ( $w$ ) est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de  $15^\circ$  par heure [1, 8, 13].
- La déclinaison ( $\delta$ ) est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil. elle varie suivant l'équation de Cooper (figure 1.6) [7] :

$$\delta = 23.45^\circ \text{Sin} \left( \frac{360}{365} \times (284 + j) \right) \quad (1.4)$$

$j$  : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du premier janvier.

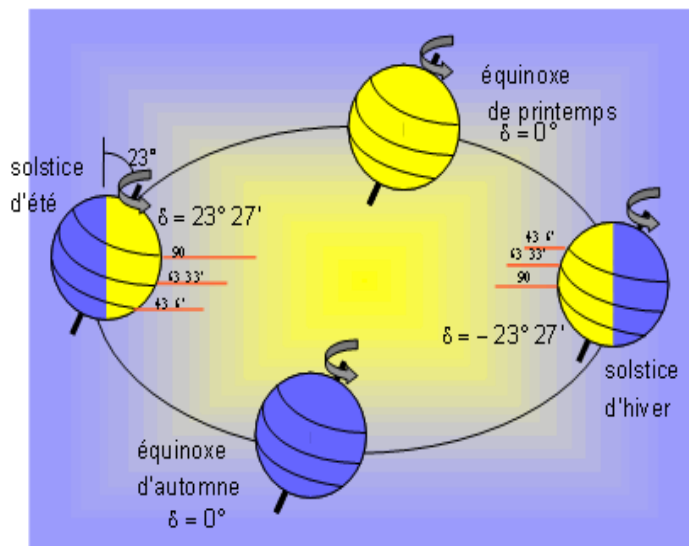


Fig.1.6. Variation annuelle de la déclinaison solaire

### 1.4.2. Paramètres de temps

On distingue :

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

$$TSV = 12 + \frac{w}{12} \quad (1.5)$$

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

$$TSV - TSM = ET \quad (1.6)$$

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

$$ET = 9,87 \times \sin(2 \times N') - 7,53 \times \cos(N') - 1,5 \times \sin(N') \quad (1.7)$$

$$N' = (n - 81) \times \frac{360}{365} \quad (1.8)$$

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

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (1.9)$$

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

$$TL = TU - \Delta H \quad (1.10)$$

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

### 1.5. Diagramme solaire

Pour évaluer les paramètres solaires rapidement et sans calculs fastidieux, on utilise des diagrammes ou des abaques qui fournissent des valeurs approchées.

Le diagramme circulaire ou solaire est le plus utilisé, représente l'azimut  $a$  par des rayons issus de centre de diagramme et la hauteur  $h$  par des cercles concentriques.

Le diagramme solaire est très utilisé pour l'évaluation des effets de masque.

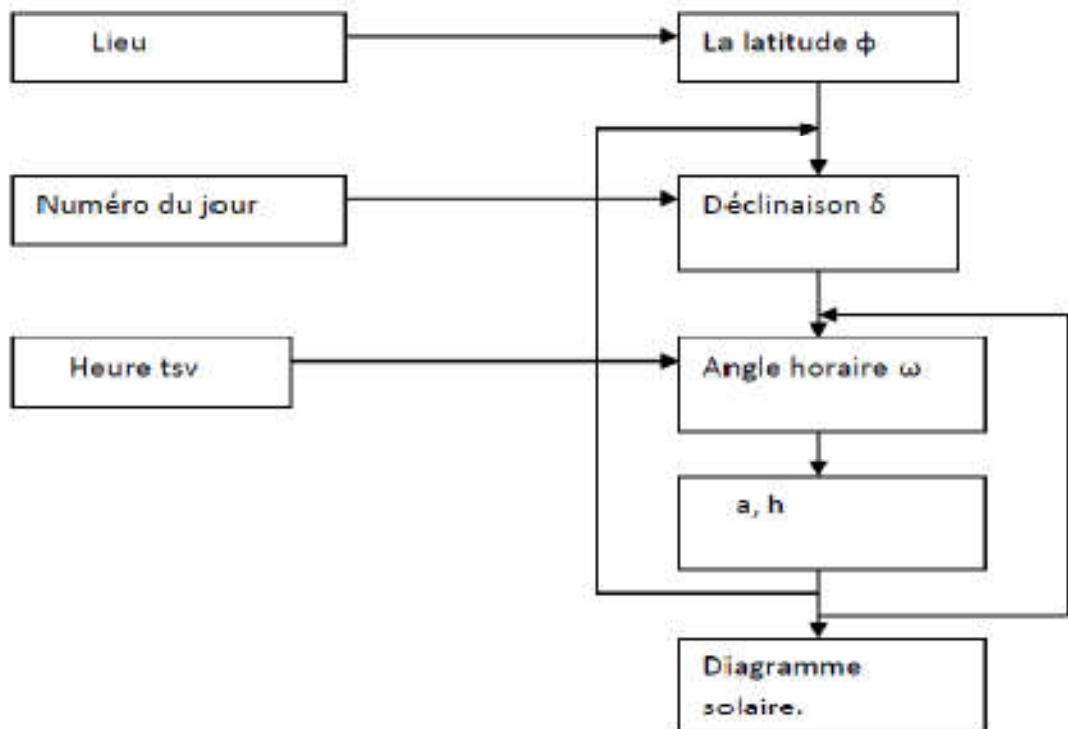


Fig.1.7.Organigramme permettant de construire le diagramme solaire pour une latitude donnée.

## Référence

- [1] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] C. Vauge, Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263. (1982).
- [3] A. H. Khedim, Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [4] Z. Sen, Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [5] S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, (2010).
- [6] R. Bernard, G. menguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [7] J.A, Duffie, W, A, Beckman. Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [8] A. Sfeir, G. Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [9] Ch. Perrin de Brichambaut, C. Vauge, Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982). photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire.
- [10] O. Sotehi, Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [11] J. Bonal; P. Rossetti, Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [12] U. Eike. Solar technologies for buildings, John Wiley Sons , England. (2001).
- [13] P. H. Communay, Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002).

---

# Chapitre

## *Généralité*

### 2

---

#### **2.1. Utilisation directe de l'énergie solaire**

L'énergie solaire permet d'assurer des conditions de température favorables à la vie et anime les cycles de l'eau, des vents et du carbone dans la biosphère. Mais elle peut aussi être utilisée directement pour produire de la chaleur à différents niveaux de température pour divers usages : chauffage et climatisation de locaux, séchage de produits agricoles, production d'eau chaude et de vapeur, production d'électricité par le biais de cycles thermodynamiques. La production solaire au moyen des cellules solaires.

Pour toutes les applications directes de l'énergie solaire, le gisement solaire local doit être caractérisé soigneusement puisqu'il présente des variations géographiques et saisonnières importantes.

#### **2.2.Énergie solaire thermique**

L'énergie solaire thermique consiste à utiliser la chaleur du rayonnement solaire. La chaleur utilise une onde électromagnétique propulsée par des photons lesquels sont des quantas d'énergie résultant de l'interaction électrons-protons. La conversion thermique s'effectue dans un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou panneaux solaires thermiques). C'est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du soleil en convertissant la lumière en chaleur et la transmettre à un fluide caloporteur liquide (eau ou antigel ou air).

Le rayonnement se décline de différentes façons :

- En usage direct de la chaleur (basse température): chauffe-eau, chauffages solaires, cuisson solaire, séchage solaire.
- En usage indirect, la chaleur servant pour un autre usage : climatisation solaire, centrales solaires thermodynamiques.
- Concentration solaire (haute température), fours solaires.

### 2.3. Définition et principe d'un capteur solaire

Un capteur solaire (figure 2.1) est un dispositif qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur qui sera transmise à un fluide "fluide caloporteur". Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre  $0.3 \mu m$  et  $3 \mu m$ ), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante [1].

L'absorbeur émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre  $4 \mu m$  et  $30 \mu m$ ). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par moitié vers la surface absorbante et par moitié vers l'extérieur.

Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur [2].



Fig. 2.1. Capteur solaire thermique avec support de fixation [3]

## 2.4. Diversité des capteurs solaires et leur application

Il existe non seulement plusieurs manières différentes d'usage de l'énergie solaire, mais également différentes méthodes pour capter l'énergie solaire provenant d'un rayonnement incident principalement il y a deux grandes catégories de capteurs solaires [4].

1- Les capteurs solaires photovoltaïques qui transforment l'énergie lumineuse en énergie électrique.

2- Les capteurs solaires thermiques transforment l'énergie lumineuse en énergie thermique. Un capteur à circulation de liquide est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est un liquide.

- Un capteur à air est un capteur dans lequel le fluide caloporteur est l'air.
- Un capteur plan est un capteur sans concentration dans lequel la surface de l'absorbeur est sensiblement plane et l'ouverture du capteur est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur.

Les types les plus répandus de capteurs solaires thermiques présents comme suite :

### 2.4.1. Capteurs solaires thermique à basse température :

- Capteurs plans de types vitrés.
- Capteurs plans sans vitrage.
- Capteurs à plaque perforée sans vitrage.
- Capteurs solaires à passage retour.
- Capteurs solaires à air.
- Capteurs sous vide.

### 2.4.2. Capteurs solaires à haute température :

- Capteurs solaires intégrés.
- Cuisinières solaires.

- Capteurs solaires à circulation de liquide.
- Systèmes à réflecteur parabolique.
- Systèmes à réflecteur cylindro-parabolique.
- Systèmes de centrale à tour.
- Capteurs solaires fixes à concentration.

## 2.5. Différents types des capteurs solaires thermiques

### 2.5.1. Capteurs solaires plans

Les capteurs solaires plans, sont conçus pour la conversion de l'énergie solaire par voie thermodynamique ou bien la conversion thermique de l'énergie solaire. Ils sont constitués d'une surface réceptrice noire qui absorbe le rayonnement solaire incident visible de la bande spectrale ( $0,3 < \lambda < 3\mu\text{m}$ ), du rayonnement direct et diffus. Au-dessus de l'absorbeur se trouve un système de couverture à simple ou à double vitrage, limite les pertes thermiques convectives avec l'air ambiant figure (2.2), ainsi que les pertes radiatives grâce à la propriété du verre pratiquement opaque dans le domaine de l'infra-rouge [5]. Une isolation sur la face arrière du capteur limite également les pertes thermiques par conduction et par convection.

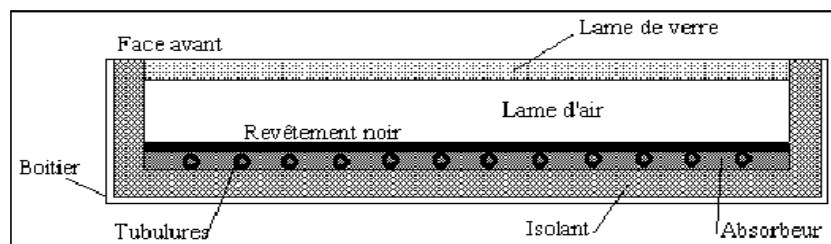


Fig. 2.2. Vue en coupe d'un capteur plan [5]

À partir de ce dispositif de base, on trouve un grand nombre de système plus ou moins performant liés à la qualité de l'absorbeur. Dans le cas d'un capteur plan, le meilleur absorbeur n'est pas un corps noir, mais plutôt une surface sélective fortement absorbante dans le visible et faiblement émissive dans l'infra-rouge. Le rendement maximum du capteur plan à eau  $\eta_{\text{capt}}$  (rapport de l'énergie extraite par le fluide caloporteur sur l'énergie solaire globale incident) se situe entre 60 et 80% [4], et décroît quasiment linéairement lorsque la température de fluide croît. Enfin, un fluide qui circuler dans le capteur est le récepteur final de la chaleur cédée par l'absorbeur,

qui est fournie par le rayonnement solaire, est destinée pour le transport à des fins diverses. On rencontre différents types des fluides caloporteurs, les plus courants sont l'eau et l'air [5].

➤ Avantages

- Cout du capteur relativement bas.
- Le capteur peut être installé au sol comme il peut être aussi intégré architecturalement (toits, balcons,.....).
- Il possède un degré de rendement élevé [6].

➤ Inconvénient

- Baisse du rendement d'utilisation en hiver à cause des pertes thermiques élevées.
- Risque de salissement de la surface de l'absorbeur par dépôt de poussière particulièrement dans les régions arides et semi arides.
- Possibilité de condensation au vitrage de capteur.

### 2.5.1.1. Capteurs plans non vitrés

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire. Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (2.4).

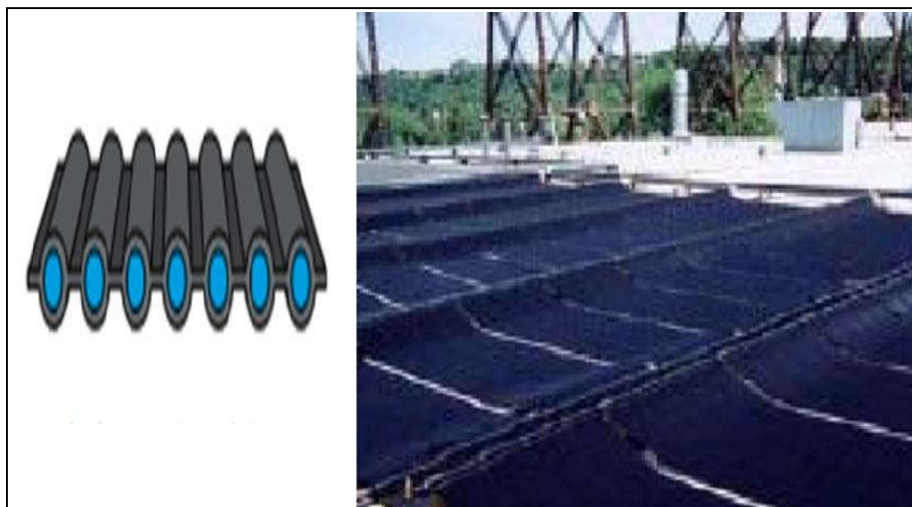


Fig.2.3. Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [4]

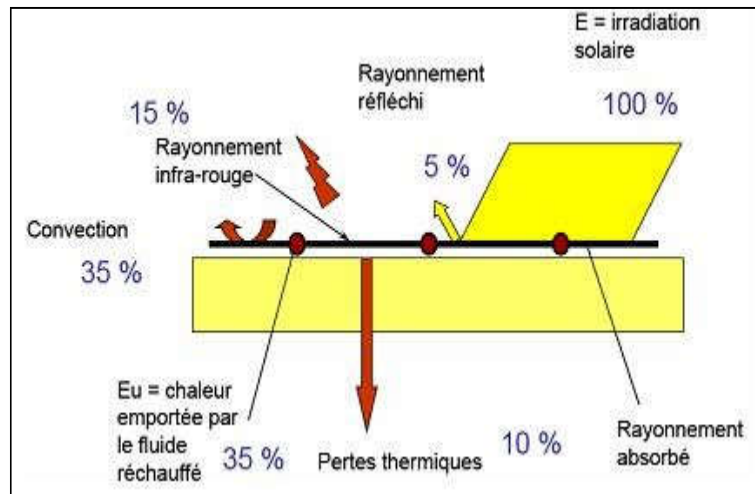


Fig.2.4.Principe de fonctionnement de capteur solaire non vitré à revêtement sélectif [7]

### 2.5.1.2. Capteurs plans vitrés

Ce type de capteurs figure (2.5) peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple), la figure (2.6) montre le principe de fonctionnement de ce type.

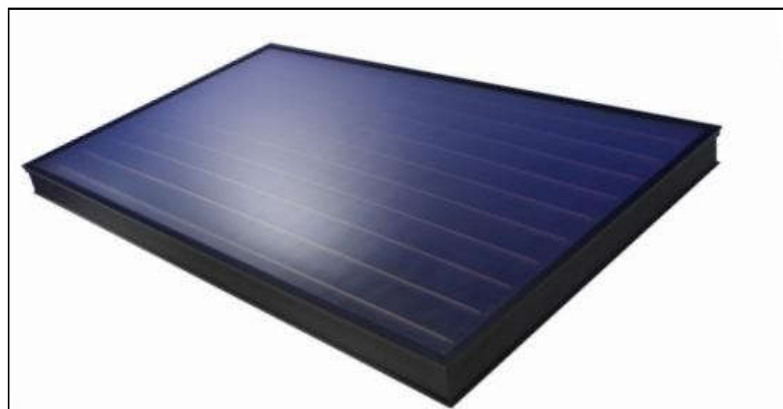


Fig.2.5.Capteurs plans vitrés [2]

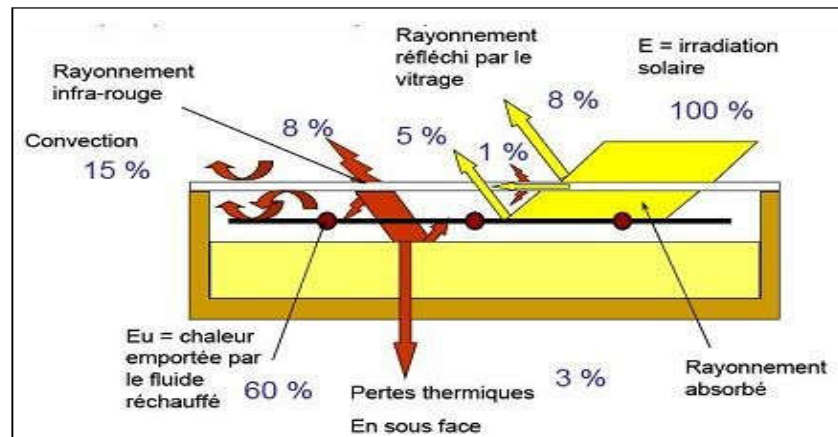


Fig.2.6.Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [9]

### 2.5.1.3. Capteurs à tubes sous vide

Il s'agit d'un tube cylindrique porteur lui aussi d'un traitement de surface qui maximise l'absorption solaire. Suivant les technologies le cylindre sous vide est en fait constitué de 2 tubes concentriques emboîtés l'un dans l'autre. Entre ces 2 tubes est réalisé le vide d'air. Dans cette version, le vide n'est fait qu'entre les 2 tubes, la partie centrale du tube interne n'est pas sous vide. Dans une autre version il s'agit d'un seul tube transparent dans lequel le vide est complet. La restitution de l'énergie captée se fait au niveau d'un collecteur de chaleur placé au sommet du capteur dans lequel les tubes sous vides sont enfichés. La transmission d'énergie thermique au liquide caloporteur se fait par deux méthodes. Le premier fait passer directement le liquide caloporteur au contact de l'absorbeur, l'autre technique utilise un caloduc. Le caloduc est une simple tige de cuivre creuse qui contient un liquide à changement de phase. Au contact de la chaleur ce liquide se vaporise et échange sa chaleur au liquide caloporteur. Cet échange de chaleur le condense et ainsi de suite.

Le capteur à tubes sous vide présenté dans la figure (2.7) avec son principe de fonctionnement dans la figure (2.8).

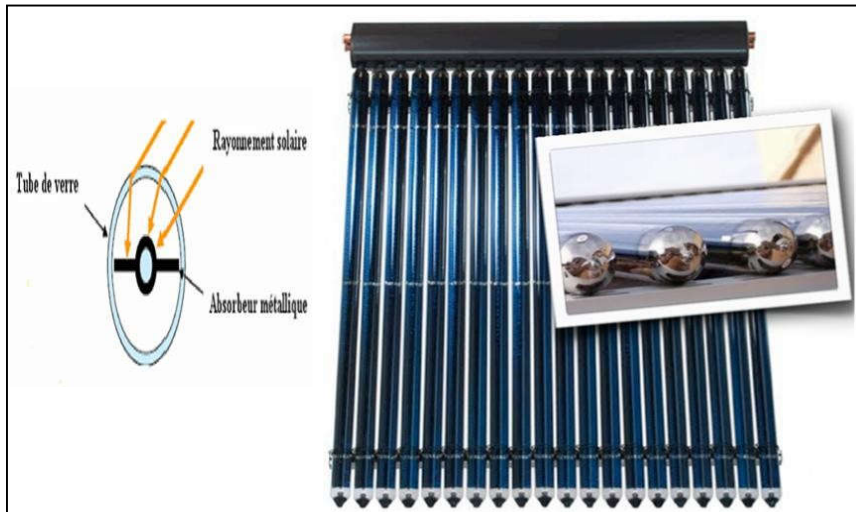


Fig.2.7. Capteurs à tube sous vide [9]

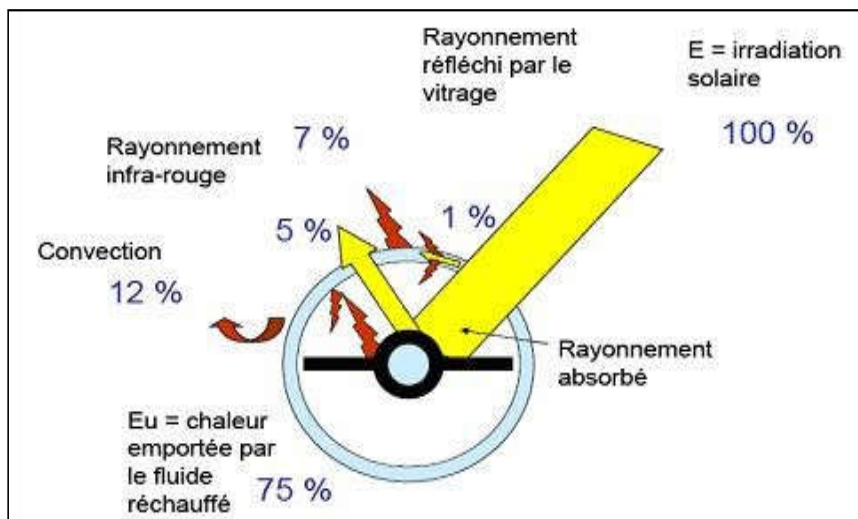


Fig.2.8. Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [2]

### 2.5.2. Capteurs à concentration :

Dans les systèmes à concentration, le rayonnement solaire direct est reçu par une surface de grande taille appelée surface d'ouverture, puis dirigé vers un absorbeur de surface plus petite. Ce résultat est obtenu grâce à une ou plusieurs réflexions sur des miroirs, ou à des réfractions (à travers des prismes, ou lentilles). Dans les dispositifs à concentration on notera la présence de nombreux avantages et inconvénients.

➤ avantages :

- La diminution de la surface de l'absorbeur se traduit par une baisse des pertes thermiques qui sont proportionnelles à la surface,

- Les rendements sont par conséquent plus élevés,
- Les températures obtenues varient d'une certaine de °C à plus de 4000°C en fonction du taux de concentration.
- Inconvénient :
  - Seul le rayonnement direct est utilisé.
  - Les pertes optiques peuvent être importantes, car elles sont dues aux phénomènes de réflexion ou de réfraction, et aux caractéristiques géométriques du système.
  - Les pertes thermiques sont importantes à cause du niveau de température plus élevé de l'absorbeur.
  - Ces capteurs nécessitent un entretien régulier et de conserver la qualité optique des miroirs soumis aux poussières et à la corrosion de l'environnement.



Fig.2.9. Concentrateur cylindro-parabolique [9]

## 2.6. Définition des différentes caractéristiques des capteurs solaires

La puissance d'un capteur dépend du mode de fonctionnement. Plus la différence entre la température intérieure du capteur et la température extérieure est élevée, plus ses déperditions thermiques sont importantes. Le rendement diminue également [6].

Les capteurs sont caractérisés par:

- ✓ Leurs pertes optiques

✓ Leurs pertes thermiques

Ces pertes permettent par ailleurs de calculer le rendement global du capteur, pour une situation de fonctionnement donnée.

❖ **pertes optiques :**

En premier lieu, les capteurs sont caractérisés par leur rendement optique (coefficient  $B$ ). Le rendement optique du capteur représente le pourcentage de la puissance radiative du soleil qui sera réellement absorbée par le capteur.

❖ **pertes thermiques :**

Lorsque le fluide caloporteur qui circule dans le capteur s'échauffe, une partie de la chaleur reçue est perdue par conduction et par convection vers l'extérieur. Ces pertes sont caractérisées par un coefficient  $k$  exprimé en  $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ .

$$P_{th} = K \cdot S \cdot \Delta T \quad (2.1)$$

$K$  : Coefficient de déperdition du capteur  $[W/m^2/^\circ C]$ .

Voir le tableau (2.1) : la valeur du facteur  $k$  pour les différents capteurs solaires plans [9] Annexe A.

❖ **rendement global :**

Le rendement global d'un capteur se calcule à partir des rendements optiques et thermiques dans des conditions données de fonctionnement du capteur.

C'est le rapport entre l'énergie récupérée et l'énergie solaire reçue par le capteur pendant le même intervalle de temps, dans des conditions données de fonctionnement stable. [10] :

L'énergie utile est donc égale à la partie de l'énergie incidente traversant le vitrage moins les déperditions thermiques (proportionnelles à l'écart de température entre le capteur et l'ambiance).

Avec :

$$\eta_g = \beta - \frac{K \times (T_{mf} - T_{ext})}{G} \quad (2.2)$$

- $k$  : coefficient de pertes thermiques en  $[W/m^2 \cdot ^\circ C]$ .
- $\beta$  : le rendement optique.
- $T_{mf}$  : température moyenne du fluide caloporteur en  $[^\circ C]$ .

- $T_{ext}$  : température extérieure en [°C].

### **Conclusion**

Une étude générale est présentée sur les différents type de capteurs solaires thermiques et leur rôle dans la conversion de l'énergie solaire et leur utilité, les différentes composantes et leurs avantages et inconvénients.

### **Référence**

- [1] K. Salima, "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan-captteur et distillateur hot box-captteur". Thèse de magister (2009).
- [2] D. Ababsa, Optimisation du rendement d'un capteur Solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de Magistère, la faculté des sciences-département de physique de Batna, (2010).
- [3] A. H. Khedim, Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [4] Manuel analyse de projet pompes à chaleur géothermique. Retscreen international centre (2005).
- [5] M. Amine Khodja, Etude de l'espace entre l'absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d'un capteur solaire. These de magister en genie climatique, Constantine (2004).
- [6] S. Their, L'énergie solaire et ces applications –EPF. (2010).
- [7] F. Ahmed Taha, Developpement d'un logiciel de simulation des performances Thermiques des capteurs solaires plans» Memoire de magister d l'Universite Mohamed Khider – Biskra (2013).
- [8] R. Guillo, écosource, Les Centrales Solaires à Miroir de Fresnel. (2010).
- [9] G. Lazhar, Etude de calcul des capteurs solaires plans "Application au chauffe-eau" ; mémoire de master ; kasdi- merbah.ouargla (2015).

---

# Chapitre

## 3

### *Etude théorique d'un capteur thermique plan*

---

#### **3.1. Introduction**

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et du corps noir. La chaleur produite par les capteurs peut ensuite être utilisée pour [1]:

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

Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil [1].

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [2,3]

#### **3.2. Différent composants des systèmes solaires plans**

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- Une surface de captation du rayonnement solaire.
- Un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories). Les fluides utilisés généralement comme fluide Caloporteur sont : l'eau et l'air.

- Un stockage thermique.
- Un réseau de distribution.

### 3.3. Composants d'un capteur solaire plan

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente (vitre), d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre (figure 2.1)

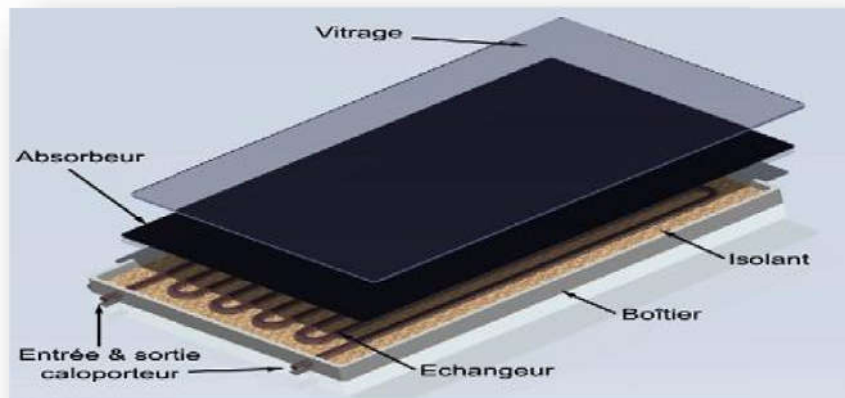


Fig.3.1. Composants d'un capteur solaire plan [4]

#### 3.3.1. Absorbeur

L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire, il absorbe le rayonnement solaire global de courtes longueurs d'onde et le convertit en chaleur [2]. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine.

L'absorbeur ne doit pas être trop mince. En pratique, on emploie généralement une feuille de cuivre ou d'aluminium de 0.2 mm d'épaisseur avec des variantes de 0.15 à 0.3 mm [6]. Tableau (3.1) Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur [5] Annexe A.

### 3.3.2. Couche sélective de l'absorbeur

En général, un absorbeur efficace a une bonne absorptivité ainsi que sa faible émissivité. Cependant, les surfaces métalliques tendent à réfléchir la lumière d'où une perte d'énergie. Pour résoudre ce problème, les surfaces métalliques doivent être enduites d'une surface sélective qui d'une part absorbe le rayonnement solaire de courtes longueurs d'onde avec un rendement élevé et le transforme en I.R par l'effet de décalage de Wien et qui, d'autre part ne perd que très peu d'énergie grâce à son état de surface qui agit comme un piège vis-à-vis du I.R ( $\epsilon < 0.15$ ,  $\alpha > 0.9$ ). Cette surface n'est considérée comme surface noire que pour la lumière solaire, pour les I.R elle agit comme un miroir [2].

Le tableau (3.2) donne les propriétés de quelques revêtements sélectifs, Annexe A.

### 3.3.3. Couverture transparente (vitrage)

C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement I.R, permettant de réaliser un effet de serre. L'utilisation de la couverture transparente du capteur permet d'accroître son rendement et d'assurer des températures de plus de 70°C [7], en créant un effet de serre qui réduit les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur et évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent [5] Le tableau (3.3) regroupe les propriétés de différentes surfaces transparentes ,Annexe A.

### 3.3.4. Fluide caloporteur

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

### 3.3.5. Isolation thermique

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

- **Partie avant de l'absorbeur**

La lame d'air située entre la vitre et l'absorbeur se comporte comme un isolant vis-à-vis de la transmission de chaleur par conduction. Cependant, si l'épaisseur de cette lame est trop grande, une convection naturelle intervient, d'où une perte d'énergie. Pour les températures usuelles de fonctionnement du capteur plan, l'épaisseur de la lame d'air est de 2.5 cm [8].

En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [2].

- **Parties arrière et latérale**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégager aux hautes températures, en plus d'utiliser un isolant pour minimiser les pertes thermiques on peut augmenter la résistance de contact entre la plaque, l'isolant et le coffre en évitant de presser ces surfaces les unes contre les autres car dans le cas d'une forte rugosité, il peut exister entre les deux faces en contact un film d'air qui empêche la chaleur de passer facilement par conduction [2, 6]. Le tableau (3.4) donne les propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [5] Annexe A.

### **3.3.6. Le cadre**

Le cadre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolant, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

## **3.4. Principes de fonctionnement d'un capteur solaire**

Un capteur solaire plan destiné au chauffage des habitations ou à la production d'eau chaude est essentiellement constitué d'une surface absorbante exposée au rayonnement solaire, qui échange avec un fluide caloporteur, les calories produites par absorption du rayonnement incident.

Le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan est très simple (figure 3.2) [9].

Dans un capteur équipé d'une couverture transparente, le rayonnement solaire thermique traverse la vitre et arrive sur l'absorbeur muni d'une surface Sélective où il est converti en chaleur à sa surface. Celle-ci s'échauffe et rayonne à son tour par les deux faces. Une certaine quantité du rayonnement se disperse dans le milieu extérieur et l'autre est

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

Le fluide caloporteur qui circule dans L'absorbeur conduit la chaleur captée vers un échangeur de chaleur, à partir duquel elle est Transmise au consommateur.

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

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

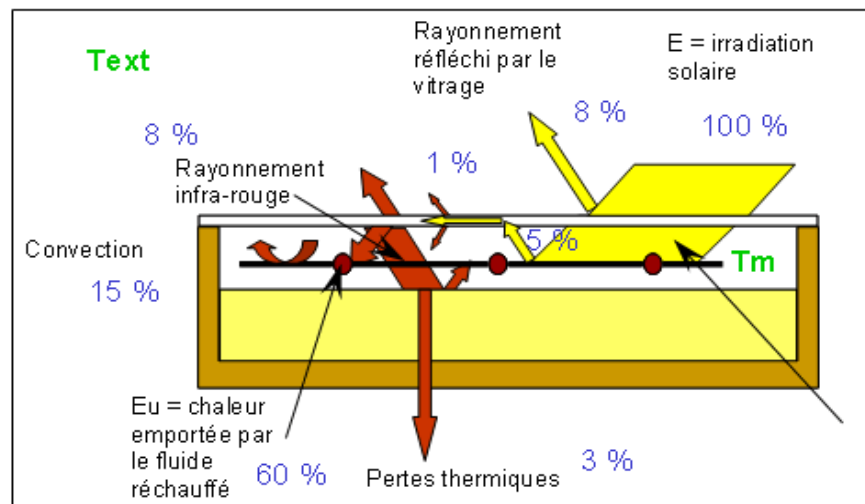


Fig.3.2. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan [9]

### 3.4.1. Paramètres et caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

On a plusieurs caractéristiques qui influent sur le rendement de capteur solaire est classé en trois paramètres : Paramètres externes, Paramètres internes, Paramètres de fonctionnements.

- **Paramètres externes:** les paramètres externes sont représentés par:
  - Paramètre d'ensoleillement : éclairement énergétique du au rayonnement global a la position du soleil et a La durée d'insolation.
  - La température extérieure sèche.
  - La vitesse du vent sur le capteur.
- **Paramètres internes:** les paramètres internes sont représentés par :

- Paramètre de position : l'inclinaison et l'orientation
  - Dimensions de capteur: épaisseur, longueur, la largeur et la surface réceptrice.
  - La section de passage du fluide.
- **Paramètres de fonctionnements** : les paramètres de fonctionnement sont représentés par:
- La température d'entrée du fluide dans le capteur.
  - Les températures des différentes parties du capteur.
  - Le débit du fluide caloporteur.

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

### **Conclusion**

Dans ce chapitre une étude descriptive est présentée sur les capteurs solaires, ses Composants, les caractéristiques et les paramètres de fonctionnement influant sur leur efficacité.

## Référence

- [1] D. K, Edwards, Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [2] J. Bernard, Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [3] R. Bernard; G, menguy, M, Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [4] G. Lazhar, Etude de calcul des capteurs solaires plans ‘‘Application au chauffe eau’’ ; mémoire de master (2015).
- [5] F. Ahmed Taha, Développement d’un logiciel de simulation des performances thermiques des capteurs solaires plans» Mémoire de magister de l’Université Mohamed Khider – Biskra (2013).
- [6] A. Sfeir ; G, Guarracino, Ingénierie des systèmes solaires, Technique et documentation, Paris. (1981).
- [7] R. Bernard; G, menguy; M, Schwartz, Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [8] M. Amine Khodja, Etude de l’espace entre l’absorbeur et la vitre et son influence sur le rendement d’un capteur solaire. Thèse de magister en génie climatique, Constantine (2004).
- [9] N. Bellel, Etude des transferts thermiques le long d’un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).

---

# Chapitre

## 4

### *Etude numérique d'un capteur plan thermique*

---

#### **4.1. Introduction**

Le travail présenté ici s'inscrit dans la contribution de la conception et simulation des convertisseurs thermiques. De part une relative simplicité de mise en œuvre et vu l'importance des besoins énergétique sous forme de chaleur, la conversion photo thermique est encore actuellement la plus usuelle. Concernant la production de chaleur à basse température, on peut de nos jours considérer qu'au moyen de dispositifs de captation dite actifs, les problèmes ne sont plus que d'ordre économique. Le chauffage des piscines par capteur plan est par exemple devenu classique.

Dans ce travail nous présentons l'effet des paramètres externes sur un capteur solaire plan incliné fonctionnant en circulation forcée avec une seule vitre.

L'étude théorique consiste à mettre en équation les échanges énergétiques intervenant au niveau du capteur qu'on divise en mailles, une approche numérique basée sur la méthode itérative de Gauss Seidel a été retenue pour la résolution de ce système d'équations issus des transferts thermiques entre les nœuds au sein de la maille [1, 2, 3].

Afin d'arriver à simuler le comportement d'un capteur plan exposé aux lumineuse à une position géographique et une période donnée nous devons en premier lieu établir les équations mathématiques et les bilans qui régissent les phénomènes thermiques dans le capteur solaire plan.

Dans ce qui suit, on s'intéressera particulièrement à :

- Établir le bilan énergétique au niveau du capteur ;
- Déterminer les différents coefficients des transferts thermiques ainsi que le coefficient d'échange global ;
- Établir l'analogie électrique-thermique ;
- Établir un programme à l'aide d'un code qui simulera le comportement du capteur plan dans un environnement précis puis prévoir ses performances thermiques en se basant sur les équations établies.

## 4.2. Rappels sur les transferts de chaleur

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre. La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristique du système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état final.

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur.

### 4.2.1 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 :

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \overrightarrow{\text{grad}}(T) \quad (4.1)$$

$$Q_{cd} = -\lambda \cdot S \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.2)$$

Avec :

$Q_{cd}$ : Le flux de chaleur par conduction ( $W$ ).

$S$ : Aire de la section de passage du flux de chaleur ( $m^2$ ).

$\lambda$ : La conductivité thermique ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ).

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

#### 4.2.2. Convection

Dans ce cas le transfert de chaleur s'effectue d'un fluide liquide ou gazeux à un corps solide (par exemple entre l'air et une paroi). Les particules se trouvent en mouvement entre elles. On distingue deux types de convection :

##### 4.2.2.1. Convection libre ou naturelle

Le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermo-circulation.

##### 4.2.2.2. Convection forcée

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de température (pompe, ventilation ...). 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 :

$$Q_{cd} = h_c \cdot S \cdot (T_p - T_\infty) \quad (4.3)$$

Avec:

$Q_{cd}$ : Flux de chaleur par convection ( $W$ ).

$S$ : Surface de transmission de chaleur ( $m^2$ ).

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

$T_\infty$ : Température du fluide avant son contact avec le solide ( $^{\circ}C$ ).

$h_c$ : Coefficient de transmission thermique par convection ( $W/m^2 \cdot ^{\circ}C$ ).

##### 4.2.2.3 Calcule le coefficient d'échange par convection

###### a) En convection forcée :

En l'absence de convection naturelle, le coefficient d'échange  $h_c$  par convection est indépendant de la différence de la température de la paroi et le fluide mais il dépend des 6 grandeurs suivantes :

$Um$ : vitesse moyenne du fluide ( $m/s$ ).

$\rho$ : Masse volumique du fluide ( $m^3/kg$ ).

$C_p$ : Chaleur spécifique du fluide ( $J/kg \cdot K$ ).

$\lambda$ : Conductivité thermique du fluide ( $W/m \text{ } ^\circ C$ ).

$D$  : Dimension caractéristique de la surface d'échange ( $m$ ).

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

$$Nu = hc \frac{D}{\lambda}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot u_m \cdot D}{\mu}$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot Cp}{\rho}$$

Les travaux expérimentaux étudiant le transfert de chaleur par convection dans une situation donnée fournissent leurs résultats sous forme de corrélation mathématiques  $Nu=f(Re, Pr)$  qui permettent de calculer  $hc$  par :

$$h = Nu \frac{\lambda}{D} \quad (4.4)$$

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

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

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

#### **b) En convection naturelle :**

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

$$Gr/Pr^2 > 100$$

$$Nu = C (Gr Pr)^n$$

Convection laminaire  $Gr Pr < 10^9 \Rightarrow n=1/4$

Convection turbulente  $Gr Pr > 10^9 \Rightarrow n=1/3$

#### **4.2.3. Rayonnement**

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

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

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S \cdot (T_p^4 - T_\infty^4) \quad (4.5)$$

$Q_r$  : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

$\varepsilon$ : Émissivité thermique du matériau.

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à  $5,6.10^{-8} (W / m^{-2}K^{-4})$ .

$T_p$  : Température de la surface ( $^{\circ}C$ ).

$T_{\infty}$  : Température du milieu environnant la surface ( $^{\circ}C$ ).

$S$  : Aire de la surface ( $m^2$ ).

### 4.3. Différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure 4.1).

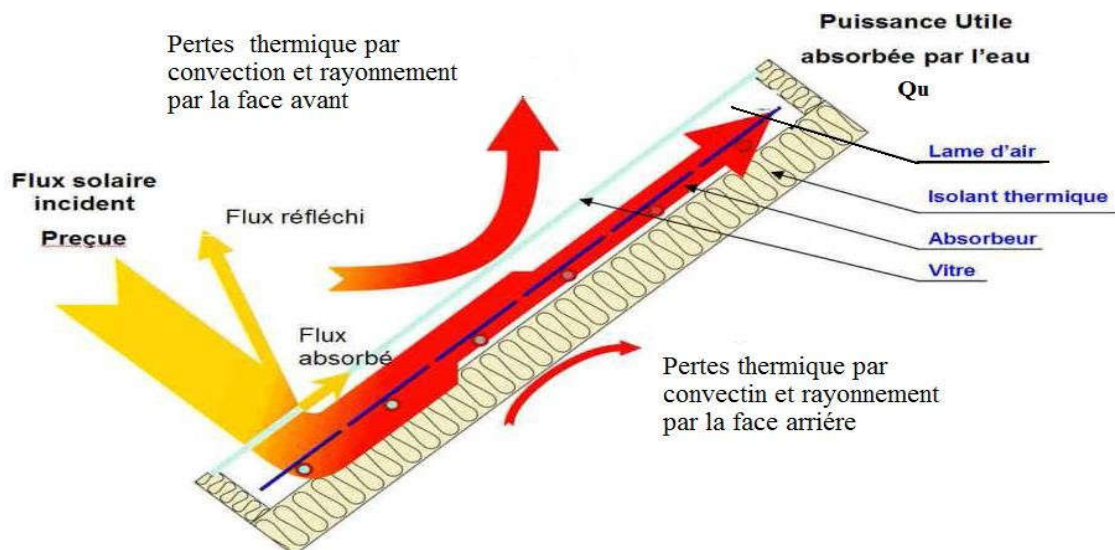


Fig.4.1. Différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré [3]

#### 4.3.1 Échanges thermiques au niveau de la vitre

En plus du flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage, il existe un autre flux de chaleur incident ( $Q_v$ ) qui sera absorbé par la vitre mais avec peu d'importance [4].

$$Q_v = \alpha_v \cdot S_v \cdot G \quad (4.6)$$

$\alpha_v$  : Coefficient d'absorption de la vitre.

$S_v$ : Surface de la vitre ( $m^2$ ).

$G$ : Rayonnement global ( $w/m^2$ ).

- Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant est donné par l'équation (4.7)

$$Q_{cvam} = h_{cvam} \cdot S_v \cdot (T_v - T_{am}) \quad (4.7)$$

$T_{am}$ : température ambiante ( $^{\circ}C$ ).

$h_{cvam}$ : coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. Ce dernier est dû entièrement à la vitesse du vent ( $W/ \cdot m^2 \cdot K$ ). On pourra utiliser la corrélation de Hottel et Woertz.

$$h_{cvam} = 5,67 + 3,86 \cdot V \quad (4.8)$$

$V$ : La vitesse du vent (m/s).

- Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel est donné par l'équation (4.9)

$$Q_{rcv} = h_{rcv} \cdot S_v (T_v - T_{ciel}) \quad (4.9)$$

$T_{ciel}$ : La température de ciel ( $^{\circ}C$ ).

$h_{rcv}$ : Coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et ciel ( $W/ m^2 \cdot ^{\circ}C$ ).

$$h_{rcv} = \varepsilon \cdot v \cdot \delta \cdot (T_{ciel} - T_v) \cdot (T_v^2 + T_{ciel}^2) \quad (4.10)$$

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_{am}^{0.5} \quad (4.11)$$

### 4.3.2 Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur

- Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage est donné par l'équation (4.12) [4].

$$Q_{cabv} = h_{cabv} \cdot S_{ab} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (4.12)$$

$T_{ab}$ : Température de l'absorbeur ( $^{\circ}C$ ).

$S_{ab}$ : Surface de l'absorbeur ( $m^2$ ).

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

$$h_{cabv} = Nu \frac{K_{air}}{b} \quad (4.13)$$

$$Nu = 1 + 1,44 \left( 1 - \frac{1708(1,8 \cdot \sin \beta)^{1,6}}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right) \left( 1 - \frac{1708}{Ra \cdot \cos(\beta)} \right) + \left( \frac{Ra \cdot \cos \theta}{5830} \right)^{0,666} - 1 \quad (4.14)$$

$Pr$ : nombre de Prandtl.

$b$ : épaisseur de la lame d'air séparant la vitre de la plaque absorbante ( $m$ ).

$Gr$ : Nombre de Grashof.

$K_{air}$ : Conductivité thermique de l'air ( $W/m \cdot ^{\circ}C$ ).

$\beta$ : inclinaison du capteur ( $rad$ ).

- Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage est donné par l'équation (4.15).

$$Q_{rabv} = h_{rabv} \cdot S_{ab} \cdot (T_{ab} - T_v) \quad (4.15)$$

$$h_{rabv} = \frac{\sigma \cdot (T_{ab} + T_v) \cdot (T_{ab}^2 - T_v^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{ab}}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right) - 1} \quad (4.16)$$

$\varepsilon_{ab}, \varepsilon_v$  sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.

$\sigma$ : Constante de Stéphane Boltzman  $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4\text{)}$ .

- Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par l'équation (4.17) :

$$Q_{cdabi} = \frac{(T_{ab} + T_i)}{\left(\frac{L_{ab}}{S_{abi} \cdot \lambda_i}\right) + \left(\frac{L_i}{S_{abi} \cdot \lambda_i}\right)} + \frac{(T_{ab} + T_i)}{\left(\frac{L_{ab}}{S_{abil} \cdot \lambda_{il}}\right) + \left(\frac{L_{il}}{S_{abil} \cdot \lambda_{ab}}\right)} \quad (4.17)$$

$T_i$ : Température de l'isolant ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$S_{abi}$  : Surface de contact absorbeur isolant pour la face avant ( $\text{m}^2$ ).

$S_{abil}$  : Surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale ( $\text{m}^2$ ).

$\lambda_i$ : Conductivité thermique de l'isolant ( $\text{W m}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ ).

$\lambda_{il}$ : Conductivité thermique de l'isolant ( $\text{W m}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ ).

$\lambda_{ab}$ : Conductivité thermique de l'absorbeur ( $\text{W m}^{-1}/^{\circ}\text{C}$ ).

$L_{ab}$  : Épaisseur de l'absorbeur ( $\text{m}$ ).

$L_i$  : Épaisseur de l'isolant ( $\text{m}$ ).

$L_{il}$ : Épaisseur de l'isolant latéral ( $\text{m}$ ).

- Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) est donné par l'équation (4.18)

$$Q_{cabf} = h_{cabf} \cdot S_{abf} \cdot (T_{ab} - T_f) \quad (4.18)$$

$T_f$ : Température du fluide caloporteur ( $^{\circ}\text{C}$ ).

$S_{abf}$ : Surface de contact absorbeur fluide caloporteur ( $\text{m}^2$ ).

$h_{cabf}$ : Coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur ( $\text{W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$ ).

Le coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur des tubes  $h_{cabf}$  est calculé suivant Gnielinski. Il a exploité un grand nombre de données expérimentales sur le transfert de chaleur dans les tubes et il a proposé une corrélation utilisable pour le régime de transition et pour le régime turbulent en tenant compte de la longueur d'établissement de l'écoulement. Les propriétés physiques sont calculées à la température moyenne de l'eau.

$$Nu = \frac{\Omega}{8} \left[ \frac{(Re - 10^3) \cdot Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \right] \left[ 1 + \left(\frac{di}{L}\right)^{2/3} \right] \quad (4.19)$$

$\Omega$ : Coefficient de Darcy.

$P_r$ : Nombre de Prandtl.

$R_e$ : Nombre de Reynolds.

$d_i$ : Diamètre intérieur ( $m$ ).

$L$ : Longueur du tube ( $m$ ).

Cette corrélation est utilisable pour  $0.6 < Pr < 2000$ ,  $2300 < Re < 106$ . Le nombre de Reynolds est donné par:

$$Re = \rho \frac{DV}{\mu} \quad (4.20)$$

$D$ : diamètre du tube ( $m$ ).

$\rho$ : viscosité dynamique de l'eau ( $Pa \cdot s$ ).

$V$ : vitesse moyenne du fluide ( $m/s$ ).

Pour un écoulement turbulent hydraulique lisse, le coefficient de Darcy est donné par des relations différentes, suivant le nombre de Reynolds.

Si  $2300 \leq Re \leq 10^5$ , on applique la formule de Blasius :

$$\Omega = 0.3164 Re^{-0.25} \quad (4.21)$$

Si  $10^5 \leq Re \leq 10^6$ , on applique la relation d'Herman :

$$\Omega = 0.054 + 0.3964 Re^{-0.3} \quad (4.22)$$

Le coefficient d'échange de chaleur interne est donné par:

$$h_{cabf} = Nu \frac{\lambda_{eau}}{d_i} \quad (4.23)$$

$\lambda_{eau}$  : Conductivité thermique de l'eau ( $W \cdot m^{-1} / ^\circ C$ ).

$d$  : diamètre du tube intérieur ( $m$ ).

➤ Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur est donné par (4.24) :

$$Q_{ab} = \alpha_{ab} \cdot \tau_v \cdot S_{ab} \cdot G \quad (4.24)$$

$\alpha_{ab}$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur.

$\tau_v$  : Coefficient de transmission de la vitre.

$G$ : Eclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan. ( $W/m^2$ ).

#### 4.4. Rendement instantané du capteur solaire

L'analyse faite dans ce domaine par Hottel, Willier, Wortz et Bliss permet d'aboutir à une équation unique donnant le rendement instantané du capteur que l'on définit par le rapport suivant:[4]

$$\text{Puissance de sortie} = \text{Puissance captée} - \text{Pertes} \quad (4.25)$$

$\eta$  = Puissance thermique utile par  $m^2$  du capteur / flux solaire incident sur le plan capteur

$$Q_u = \frac{Q_u}{Ac.G} = \frac{Ac[(\alpha.\tau)eff.G - UL(T_{ab} - T_{am})]}{Ac.G} \quad (4.26)$$

$Q_u$  : Puissance utile récupérée par le fluide caloporteur ( $W$ ).

$\alpha, \tau$  : Sont respectivement coefficient d'absorption de l'absorbeur et transparence de vitrage.

#### 4.5. Calcul du coefficient de pertes thermiques globales $U_T$

Les pertes thermiques sont dues à la différence de température entre l'absorbeur et le milieu ambiant. Elles se manifestent selon les trois modes de transfert de chaleur. Elles se divisent en trois catégories: les pertes vers l'avant, les pertes vers l'arrière et les pertes latérales. On définit: [4].

$R_1$ : Résistance thermique entre le milieu ambiant et la vitre.

$R_2$ : Résistance thermique entre la vitre et l'absorbeur.

$R_3$ : Résistance thermique entre l'absorbeur et l'isolant.

$R_4$ : Résistance thermique entre l'isolant et le milieu ambiant.

$R_{av}$ : Résistance thermique vers l'avant du capteur.

$R_{ar}$ : Résistance thermique vers l'arrière du capteur.

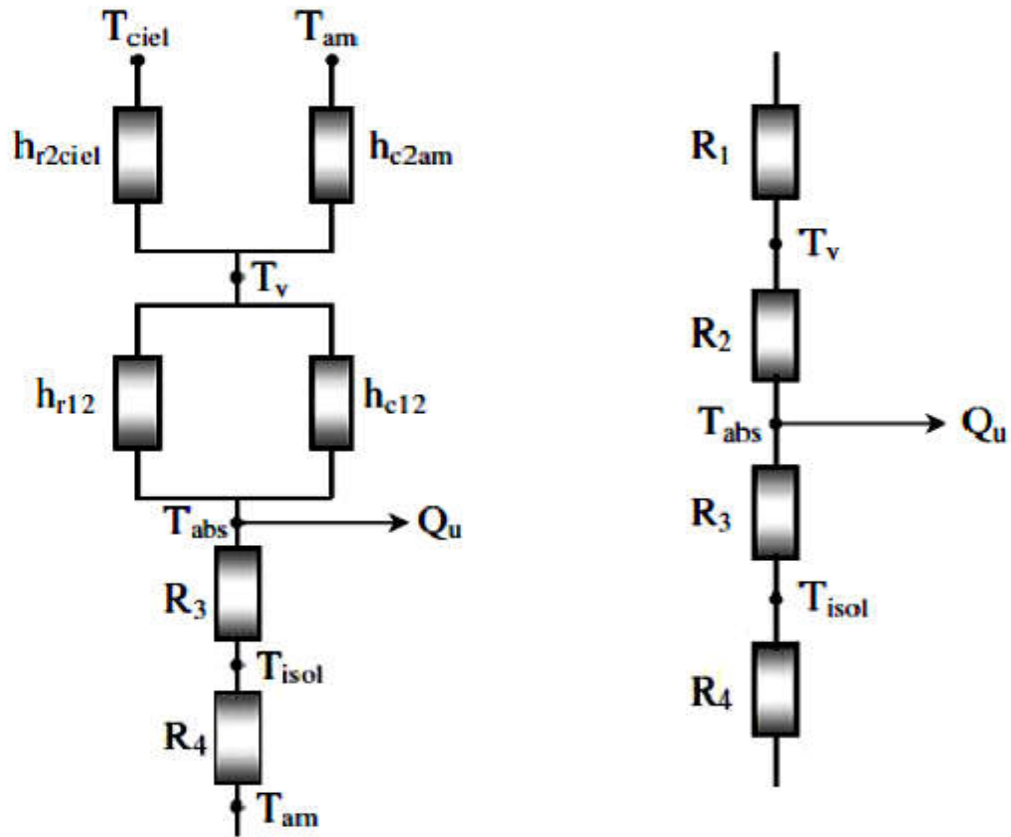


Fig.4.2.Circuit électrique équivalent relative à un capteur solaire plan

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} \quad ; \quad R_2 = \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}}$$

$$h_{r1} = \frac{\varepsilon_v \sigma (T_v^4 - T_{\infty}^4)}{(T_v - T_{am})} \quad ; \quad h_{r2} = \frac{\sigma (T_{abs}^2 - T_v^2)(T_{abs} + T_v)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_{abs}} + \frac{1}{\varepsilon_v} - 1\right)}$$

$$h_{c1} = 5.7 + 3.8 w \quad ; \quad h_{c2} = \frac{Nu \cdot \lambda_a}{b}$$

Dans le cadre de la géométrie étudiée, il existe une corrélation empirique reliant  $G_r$  au nombre de Nusselt où l'angle  $S_{in}$  et l'inclinaison du capteur, sont exprimés en degrés.

$$Nu = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4}(90 - S_{in})] G_r^{0,33}$$

$$R_{av} = R_1 + R_2 \quad ; \quad R_{ar} = R_3 + R_4$$

$$R_3 = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

La similitude électronique permet d'écrire :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} \quad (4.27)$$

Et en utilisant les conductances thermiques :

$$K_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad ; \quad K_{ar} = \frac{1}{R_3 + R_4} \approx \frac{1}{R_3}$$

$$K = K_{av} + K_{ar} \quad (4.28)$$

Avec :

$h_{c1} \text{ et } h_{r1}$ : les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la convection et au rayonnement entre la vitre et l'extérieur ;

$h_{c2} \text{ et } h_{r2}$ : les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la surface absorbante et la vitre ;

$\varepsilon_{abs} \text{ et } \varepsilon_v$ : Coefficients d'émission infrarouge respectivement de l'absorbeur et de la vitre

$\varepsilon_{abs} = 0,95$  et  $\varepsilon_v = 0,83$

$\lambda_i$ : Conductivité thermique de l'isolant ;

$\lambda_a$ : Conductivité thermique de l'air ;

$\sigma$ : Constante de Stefan-Boltzmann.

Duffie et Bekman (1980) ont donné une relation empirique due à Kelvin pour le calcul de  $\phi_{av}$  Avec une erreur inférieure à  $\pm 0,3$  ( $W/m^2$ )

$$\phi_{av} = \frac{T_{abs} - T_{am}}{\left(\frac{C}{T_{abs}}\right) \left(\frac{T_{abs} - T_{am}}{N + F}\right)^{0,33} + \frac{1}{h_{c1}}} + \frac{\sigma (T_{abs}^4 - T_{am}^4)}{\frac{1}{\varepsilon_{abs} - 0,05 N(1 - \varepsilon_{abs})} + \frac{\varepsilon_v}{2N + f - 1} - N} \quad (4.29)$$

Tels que :

$$F = (1 - 0,04h_{c1} + 0,0005h_{c1}^2)(1 + 0,091N)$$

$$C = 365,9 (1 - 0,00833 S + 0,0001298 S^2)$$

$$\sigma = 5,68 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4 \text{ (Constante de Boltzmann)}$$

$$= 4 \cdot 10^{-8} Kcal / h m^2 K^4$$

$S_{in}$  : Inclinaison des capteurs en degrés ( $0^\circ$  horizontale).

$N$  : Nombre de couvertures.

$h_{c1}$  : Coefficient d'échange entre couverture et l'air extérieur.

$W$  : Vitesse du vent ( $m/s$ ).

$T_{abs}$  : Température moyenne de l'absorbeur ( $^\circ C$ ).

$T_{am}$  : Température moyenne de l'air ambiant ( $^\circ C$ ).

La formule s'applique dans les conditions suivantes :

$$320 K \leq T_{abs} \leq 420 K \quad 47^\circ C \leq T_{abs} \leq 147^\circ C$$

$$260 K \leq T_{am} \leq 310 K \quad -13^\circ C \leq T_{am} \leq 37^\circ C$$

$$0 \leq w \leq 10 \text{ m/s} \quad ; \quad 1 \leq N \leq 3 \quad ; \quad 0^\circ \leq S_{in} \leq 90^\circ$$

➤ *Influence du vent sur la plaque*

La vitesse du vent apparaissant dans  $h$  agit sur le coefficient  $K$  et par conséquent sur la valeur des pertes. C'est pour cette raison que la connaissance des données météorologiques sur le vent est importante [5].

#### 4.5.1. Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la Relation suivante : [4].

$$U_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1} + h_{r1}} + \frac{1}{h_{c2} + h_{r2}}} \quad (4.30)$$

#### 4.5.2. Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vu le capteur est très bien isolé à l'arrière. L'expression évaluant ce coefficient est donné par:[4]

$$U_{ar} = \frac{\lambda_i}{e_i} = \frac{1}{R_3} \quad (4.31)$$

$\lambda_i$ : Coefficient de conductivité thermique de l'isolant ( $W/m \cdot ^\circ C$ ).

$e_i$ : Épaisseur de l'isolant ( $m$ ).

#### 4.5.3. Coefficient de pertes thermiques latérales

La valeur de ce coefficient est inférieure à celle du coefficient de pertes arrière, vu que la surface latérale du capteur est peu importante [4].

$$U_{lat} = \frac{\lambda_i}{e_i} \cdot \frac{A_{lat}}{A_c} \quad (4.32)$$

$A_{lat}$ : Surface latérale du capteur ( $m^2$ ).

$A_c$ : Surface du capteur ( $m^2$ ).

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

$$U_T = U_{av} + U_{ar} + U_{lat} \quad (4.33)$$

## 4.6. Mise en équation du problème

### 4.6.1. Modèle physique

Le capteur solaire (le collecteur) considéré est présenté sur la figure (4.3). Ce collecteur permet la conversion de l'énergie du rayonnement électromagnétique émis par le soleil en énergie calorifique.

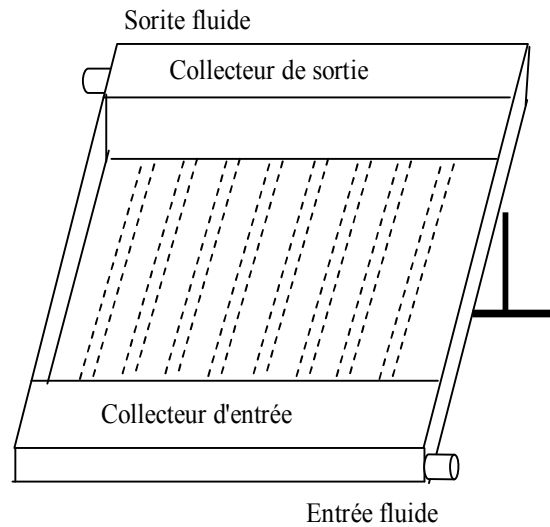


Fig.4.3.Schéma de principe d'un capteur solaire plan

### 4.6.2. Rayonnement global extraterrestre

Le rayonnement global extra terrestre sur un plan horizontal, est donné par l'équation suivant : [6]

$$H_0 = \frac{86400.1367}{\pi} \left( 1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} n \right) \left( \cos \Phi \cos \delta \sin w_s + w_s \sin \Phi \sin \delta \right) \quad (4.34)$$

Où  $\Phi$  : latitude de lieu,  $\delta$  : Déclinaison solaire,  $n$  : numéro du jour dans l'année.

$$\delta = 23.45 \sin \left( \frac{320}{365} (284 + n) \right) \approx 23.45 \sin \left( \frac{360}{365} (n - 81) \right) \quad (4.35)$$

L'indice de clarté [7] :  $\overline{K_T} = \frac{\overline{H}}{H_0}$  (4.36)

$\overline{H}$  : Flux solaire moyen, mensuel mesuré sur une surface horizontale.

$H_0$  : Flux solaire moyen, mensuel hors de l'atmosphère.

$$\frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} = 1.391 - 3.560 \overline{K_T} + 4.189 \overline{K_T}^2 - 2.137 \overline{K_T}^3 \quad (4.37)$$

$$\overline{H_b} = \overline{H} - \overline{H_d} \quad (4.38)$$

$\overline{H_b}$  : Flux moyen, mensuel direct sur une surface horizontale.

$\overline{H_d}$  : Flux moyen, mensuel diffus sur une surface horizontale. [8]

$$r_i = \frac{I^*}{H}$$

$$r_i = \frac{\pi}{24} (a + b \cos w) \frac{(\cos w - \cos w_s)}{\left( \sin w_s - \frac{\pi}{180} w_s \cos w_s \right)} \quad (4.39)$$

$$r_d = \frac{I_d^*}{H_d}$$

$$r_d = \frac{\pi}{24} \left( \frac{\cos w - \cos w_s}{\sin w_s - \frac{\pi}{180} w_s \cos w_s} \right) \quad (4.40)$$

$$I_b = I - I_d ; I_{bi} = R_b I_b$$

$$\frac{I_{bi}}{I_b} = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos w + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos w} \quad (4.41)$$

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

$$I_i = I_b R_b + I_d \left( \frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (4.42)$$

$\rho$ : est l'albédo du sol

$I$ : flux global horaire sur une surface horizontale ( $w/m^2$ ).

$I_d$ : Flux diffus horaire sur une surface horizontale ( $w/m^2$ ).

$I_b$ : Flux direct horaire sur une surface horizontale ( $w/m^2$ ).

$I_{bi}$ : Flux direct sur une surface inclinée ( $w/m^2$ ).

$I_{di}$ : Flux diffus sur une surface inclinée ( $w/m^2$ ).

$I_i$ : Flux global horaire sur une surface inclinée ( $w/m^2$ ).

### 4.6.3. Simulation du capteur

La densité de flux de chaleur échangée entre un point de température  $T_1$  et un autre point de température  $T_2$  peut s'écrire sous la forme :  $Q_{21} = h_{21} S (T_2 - T_1)$

Cette expression est semblable à la loi d'Ohm

On peut appliquer les lois d'Ohm et de Kirchhoff considérons une section spatiale.

Quelconque du système à l'instante  $t$ , soit ( $i$ ) l'un des milieux représentés dans cette section ( $m_i$ ) sa masse (Kg),  $Cp_i$  sa chaleur spécifique  $\left[\frac{J}{KgK}\right]$  et  $T_i$  sa température [K].

Le bilan thermique au nœud  $i$  est :

$$m_i Cp_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ij}} (T_j - T_i) + P_i \quad (4.43)$$

$n$ : ensemble de  $j$  pour les quelles  $T_j$  est un potentiel connecte à  $T_i$

$P_i$  : terme source au puits

La masse de l'écoulement par l'unité de surface du collecteur [8] :

$$\frac{T_{fs} - T_a - \frac{P_p}{u}}{T_{fe} - T_a - \frac{P_p}{u}} = \exp\left(-\frac{F.u}{\dot{M} Cp}\right) \quad (4.44)$$

Cette expression détermine la température  $T_{fs}$  de sortie du fluide caloporteur en fonction de la température d'entrée du fluide  $T_{fe}$ , ainsi la puissance assurée au fluide par mètre carré de collecteur est écrite :

$$P_u = \dot{M} Cp (T_{fs} - T_{fe}) \quad (4.45)$$

Avec [9]

$$F_t = \frac{\dot{M} Cp}{u} \left[1 - \exp\left(-\frac{F.u}{\dot{M} Cp}\right)\right] \quad (4.46)$$

$F_t$ :Facteur de transfert thermique

Ainsi

$$P_u = F_t (P_p - u(T_{fe} - T_a)) \quad (4.47)$$

En effet, le rendement instantané du capteur plan solaire est égal au rapport à la puissance récupérée par le fluide à la puissance solaire incidente [9].

$$\eta = F_t \left(\eta_0^* - u \frac{T_{fe} - T_a}{P_T}\right) \quad (4.48)$$

Pour déterminer les caractéristiques du capteur solaire, une simulation numérique sur la détermination du rendement du collecteur dans le régime permanent a été effectuée.

#### 4.6.4. Discrétisation des équations

Échange entre l'extérieur de la vitre et l'ambiance :

$$\begin{aligned} \frac{m_v Cp_v}{S_v \Delta t} (T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ve}^t(j+1)) &= P_v + h_{rvc} (T_c - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) \\ &+ h_{v.om} (T_{om} - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) + K_v (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned} \quad (4.49)$$

Échange à l'intérieur de la vitre :

$$\begin{aligned} \frac{m_v c p_v}{S_v \Delta t} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^t(j+1)) &= h_{r.nv} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1)) + \\ &h_{vvn} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1)) + K_v (T_{ve}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned} \quad (4.50)$$

Échange au niveau l'absorbeur

$$\begin{aligned} \frac{m_n c p_n}{S_n \Delta t} (T_n^{t+\Delta t} - T_n^t) &= P_n + h_{r.nv} (T_{vi}^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) \\ &+ h_{vvn} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{van} (T_F^{t+\Delta t}(j) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) \\ &+ h_{rni} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_n^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned}$$

Échange au niveau de fluide caloporteur

$$\begin{aligned} \dot{m}_F c p_F (T_F^{t+\Delta t}(j+1) - T_F^{t+\Delta t}(j)) &= h_{van} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_F^{t+\Delta t}(j)) + \\ &h_{vac} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_F^{t+\Delta t}(j)) \end{aligned} \quad (4.51)$$

Échange au niveau de la surface interne de l'isolant

$$\begin{aligned} \frac{m_i c p_i}{S_i \Delta t} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^t(j+1)) &= h_{voi} (T_F^{t+\Delta t}(j) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{mi} (T_n^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) \\ &+ K_{ii} (T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned} \quad (4.52)$$

Échange paroi extérieure de l'isolant et le sol :

$$\begin{aligned} m_i c p_i (T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ie}^t(j+1)) &= K_{cl} (T_{ii}^{t+\Delta t}(j+1) - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) + \\ &h_{ris} (T_{sol} - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) + h_{vs} (T_{om} - T_{ie}^{t+\Delta t}(j+1)) \end{aligned} \quad (4.53)$$

Pour calcul le flux absorbe par l'absorbeur et la vitre

$$P_n = I_{bi} \frac{\tau \alpha_P}{1 - \rho_d(1 - \alpha_P)} + I_{di} \frac{\tau_d \alpha_P}{1 - \rho_d(1 - \alpha_P)} \quad (4.54)$$

$$P_v = I_{bi} \alpha_V + I_{di} \alpha_d \quad (4.55)$$

Avec :

$P_n$  : Flux absorbe par l'absorbeur.

$P_v$  : Flux absorbe par la vitre.

$\tau$  : Facteur de transmission du vitrage.

$\tau_d$  : Facteur de transmission hémisphérique.

$\rho_d$  : Coefficient de réflexion hémisphérique.

$\alpha_d$  : Coefficient d'absorption hémisphérique.

$\alpha_p$  : Coefficient d'absorption de l'absorbeur pour les longueurs d'onde.

On obtient un système d'équation à six inconnues

$$B_{ij} * T_i = F_c$$

Avec  $j=1...6, i=1...6$

Pour la résolution de ce système nous appliquons la méthode itérative de Gauss Seidel [1].

## 4.7. Traitement numérique d'un capteur thermique plan

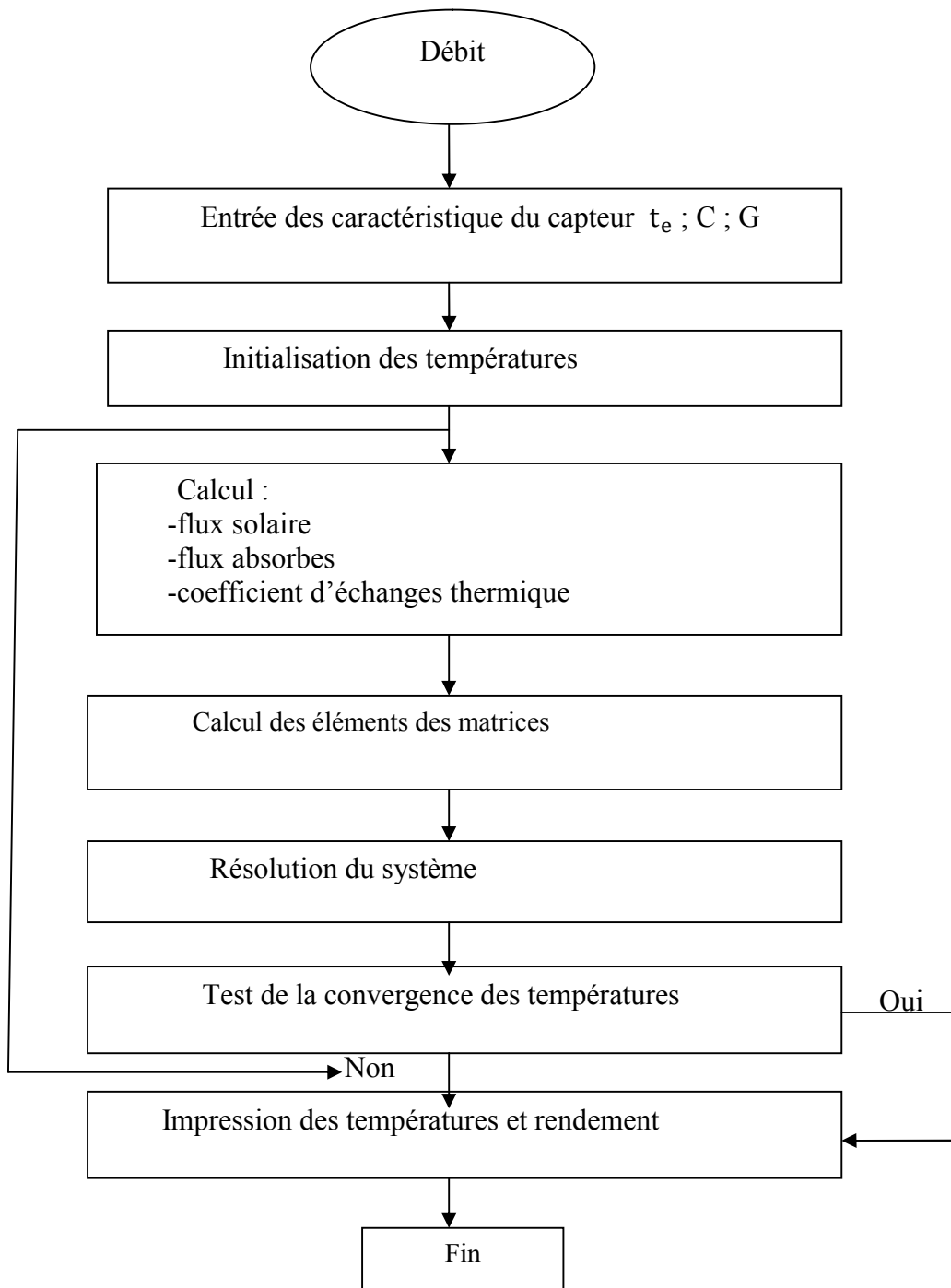
### 4.7.1. Programme principal

- **Première étape** : entrée des différentes caractéristiques du capteur thermique et des données climatiques (gisement, température ambiante et vitesse du vent).
- **Deuxième étape** : on suppose que les températures initiales des différents éléments du capteur sont égales à la température ambiante sauf les températures de la plaque absorbante, du fluide à la sortie du capteur et celle du stockage sont légèrement supérieures. Pour ces températures initiales on calcul :
  - Les propriétés thermo-physiques de l'air entre la plaque absorbante et le vitrage et celles du fluide caloporteur à savoir :
    - ✓ La masse volumique,
    - ✓ La conductivité thermique,
    - ✓ La chaleur spécifique,
    - ✓ La viscosité cinématique.
  - Les coefficients d'échanges thermiques, à savoir :
    - ✓ Les coefficients d'échanges par rayonnement entre le vitrage et le ciel et entre la plaque absorbante et le vitrage,
    - ✓ Les coefficients d'échanges par convection entre le vitrage et l'ambient et entre la plaque absorbante et le vitrage,
    - ✓ Les coefficients d'échanges par conduction au sein de l'isolant (par le fond et par les faces latérales).
  - Les déperditions thermiques du capteur, à savoir :

- ✓ Les pertes à l'avant du capteur.
- ✓ Les pertes à l'arrière du capteur,
- ✓ Les pertes par les faces latérales du capteur.
- Les déperditions thermiques de la cuve de stockage.
- Le débit massique du fluide caloporteur.
- Le facteur de conductance de la plaque absorbante.
- L'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur.
- **Troisième étape** : calcul le flux solaire, flux absorbés, coefficient d'échanges thermique.
- **Quatrième étape** : résolution du système d'équations par la méthode de Gauss-Seidel.
- **Cinquième étape** : impression de la température et calcul du rendement instantané du capteur.

Les différentes étapes citées plus haut sont représentées dans l'organigramme qui suit.

### 4.8. Organigramme général



## Référence

- [1] A. Gourdin, M. Boumahrat, (1991). Méthodes numériques appliquées, OPU Alger.
- [2] H. Rakotondramiarana, D. Morau, L. Adelard, J. GATINA, (2005). « Modélisation du Séchage Solaire: Application au Séchage en Couche Mince des Boues Solides des Stations d'Épuration », 12 èmes Journées Internationales de Thermique.
- [3] H. Amadou, (2007). Modélisation du Séchage Solaire Sous Serre des Boues de Stations d'Épuration Urbaines; Thèse de Doctorat, Université de Louis Pasteur, Strasbourg.
- [4] S. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires. Option « Electronique et Modélisation » .Thèse doctorat. l'université Abou-bakr-Belkaid – Tlemcen. (2008).
- [5] J. A. Duffie, W.A. Beckman.Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [6] D. Laplaze, Le rayonnement solaire estimation et mesures, La Garenne-colombes, France, 1990.
- [7] C. P. Jacovides, F.S. Tymvios, Comparative study of various correlations in Estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation, Athens, Greece (2006).
- [8] J. A. Duffie, et W .A.Beckman, (1974).Solar Energy thermal Processes, Wiley Inter science.
- [9] J. A. Duffie, W .A.Beckman, Solar Energy thermal Processes, Wiley Interscience, (1974).

---

# Chapitre

## 5

### *Résultat et discussion*

---

Dans ce chapitre on essaiera de présenter les résultats graphiques obtenus qui sont issus de la simulation numérique de l'effet des matériaux isolants sur les performances thermique des capteurs solaires plans. Pour mieux comprendre l'enchaînement des étapes de calculs qui ont été suivis dans ce travail, on a élaboré un programme de calcul informatique, dont le schéma de l'organigramme principal est présenté dans le chapitre précédent.

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

- \* l'inclinaison du capteur est égale à  $0^\circ$  par rapport à l'horizontale .
- \* les températures ambiantes ont été prises comme suit :

$$T_a(t) = \frac{(T_{a\max} - T_{a\min})}{2} \cdot \sin \frac{\pi}{12}(t-8) + \frac{(T_{a\max} + T_{a\min})}{2}$$

- \* la température d'entrée d'eau caloporteur est égale à  $35^\circ$ .
- \* avec une zone de la condition normale pour un albédo  $\rho = 0.2$ .
- Puisque l'épaisseur de l'absorbeur est petite, donc nous mettrons la température du plaque de l'absorbeur est les mêmes, et nous négligeons l'échange thermique entre la plaque et l'isolation parce que les coefficients de l'échange thermique entre la plaque et l'isolation est négligeable comparant aux coefficients de l'échange thermique entre la plaque et le fluide.

- La solaire déclinaison  $\delta$  varie tout long de l'année ; utilisant la relation

$$\delta = 23,45 \sin \frac{320}{365} (284 + n)$$

Nous obtenons la déclinaison en fonction du nombre du jour  $n$  de l'année ; le graphique de cette variation de déclinaison est montré sur la figure (5.1).

Nous remarquons que la déclinaison varie de  $+23.44^\circ$  à  $-23.44^\circ$ , il est nul aux équinoxes du printemps et de l'automne, maximum au solstice d'été et minimum au solstice d'hiver, et nous notons également que le profil est sinusoïdal.

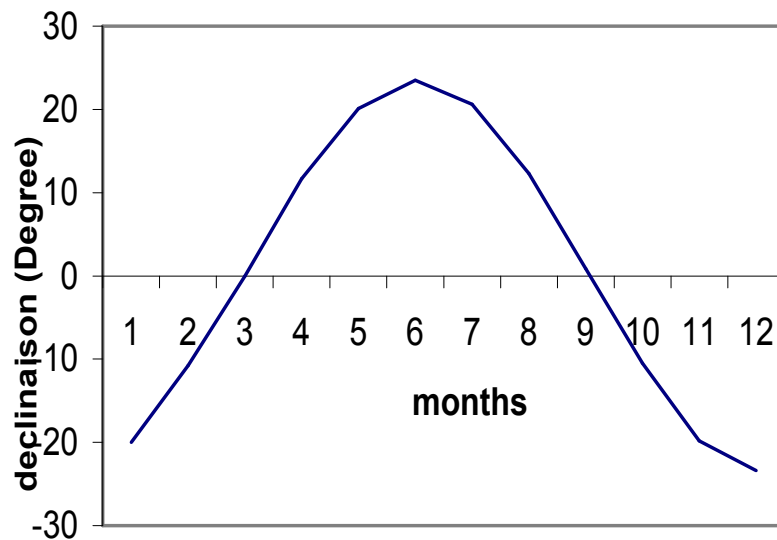


Fig.5.1. Déclinaison du soleil tout au long de l'année

### 5.1. Evolution de température de sortie $T_e$

La figure (5.2) présente l'évolution de la température de sortie de fluide caloporteur eau en fonction de temps pour trois isolants différents. On remarque que ces élévations sont différents pour chaque isolant thermique utilisés.

D'après cette figure on peut noter que la température est en augmentation perpétuelle, heure après heure, quel que soit la nature de la matière isolante, mais cette température se diffère selon la matière isolante. C'est-à-dire on obtient un taux de température plus élevé avec la laine de roche. Tandis qu'avec le plâtre, on a le taux le moins réalisé. Ce qui permet de visualisé que le bon isolant est la laine de roche comparant par les autres isolants utilisés.

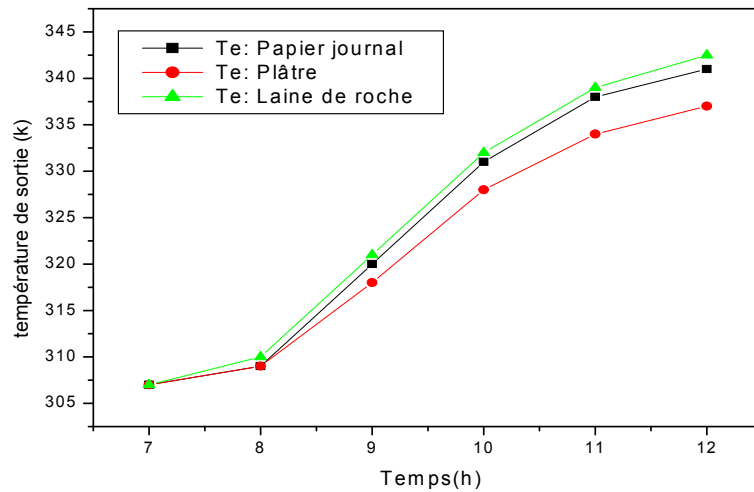


Fig.5.2.Evolution de la température de sortie d'eau en fonction de temps pour la journée du 15 juin

## 5.2. Influence de flux global sur la température de sortie

L'irradiation solaire constitue le paramètre le plus important vu son influence sur le système (capteur solaire thermique). La figure (5.3) présente la variation de température de sortie du fluide caloporteur en fonction du flux global pour les différents isolants testés. Nous remarquons que la température augmente avec l'augmentation de flux global pour les trois isolants où, quand le flux est égal à  $464 \text{ w/m}^2$  la température de sortie du fluide caloporteur est minimum pour les trois isolants (laine de roche, plâtre, papier journal) presque  $307 \text{ K}$ . quand le flux global augmente à  $969 \text{ w/m}^2$ , la température de la laine de roche devient maximum jusqu'à  $342.5 \text{ K}$  par rapport à la laine de roche ( $341 \text{ K}$ ,  $337 \text{ K}$ ) respectivement. On constate également que la température de sortie du fluide caloporteur est élevée pour l'isolant laine de roche, contrairement, plus faible pour le plâtre. C'est-à-dire, quand on utilise l'isolant laine de roche les pertes thermiques sont moindres comparées par l'isolant papier journal ou plâtre qui a un coefficient de perte plus que la laine de roche.

La comparaison entre ces résultats permet de donner une classification entre ces isolants, le meilleur isolant est la laine de roche, puis le papier journal.

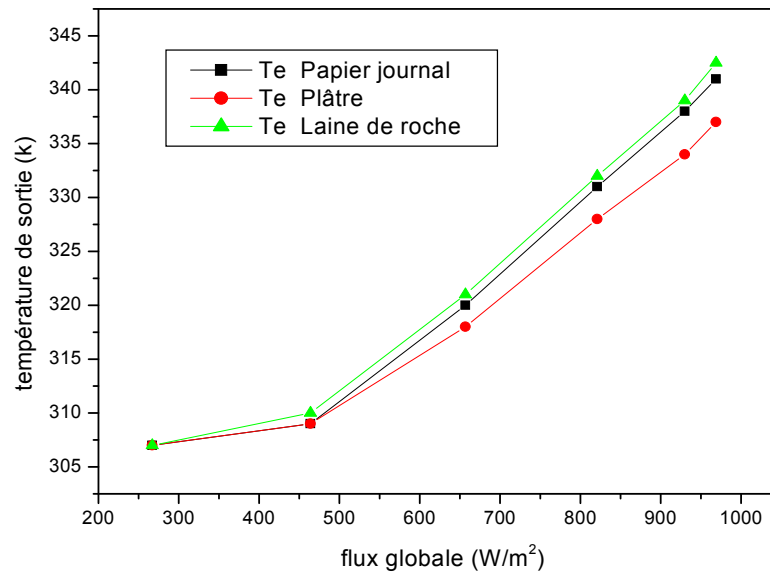


Fig.5.3.Evolution de la température de sortie d'eau en fonction de l'irradiation globale pour la journée du 15 juin

### 5.3. Évolution de rendement instantané

L'irradiation globale est importante pour la température de sortie, cette importance est remarquable sur le rendement instantané la figure (5.4) Cette figure montre que le rendement instantané du capteur est une fonction croissante du rayonnement solaire global pour tous les isolants utilisés. On note que pour une vitesse constante de fluide (débit massique constant) et une puissance du rayonnement solaire incident variable, le rendement thermique du capteur dépend de l'isolant thermique utilisé. C'est-à-dire que lorsqu'on utilise un isolant de faible coefficient de perte, il provoque une augmentation du rendement thermique. Donc l'irradiation globale influe directement sur le rendement instantané.

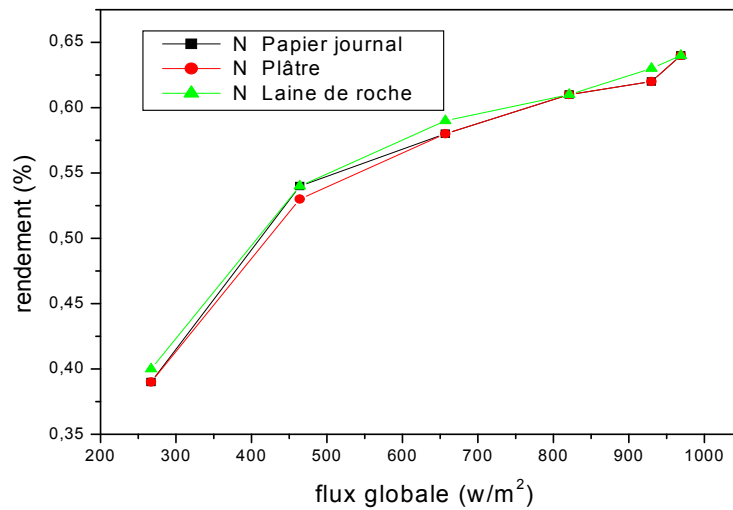


Fig.5.4.Variation de rendement instantané en fonction De l'irradiation globale pour la journée du 15 juin

#### 5.4. Evolution de rendement

Le rendement thermique du capteur plan à eau montre dans la figure 5.5, on voit que pour une vitesse constante de fluide (débit massique constant) et une puissance du rayonnement solaire incident constante, le rendement thermique du capteur dépend de de temps et l'écart de la température du fluide. C'est-à-dire que lorsque l'écart de température entrée sortie démunie, il provoque une augmentation du rendement thermique.

Nous remarquons que la laine de roche donne un rendement meilleur par rapport à la plâtre et le papier journal (figure.5.4) du fait de ses propriétés thermo-physiques, à savoir, une faible conductivité thermique et une chaleur spécifique importante (annexe A).

Et on observe aussi la superposition des profils de rendement pour les trois isolants thermiques on apercevait bien que l'isolant laine de roche assure un bon rendement.

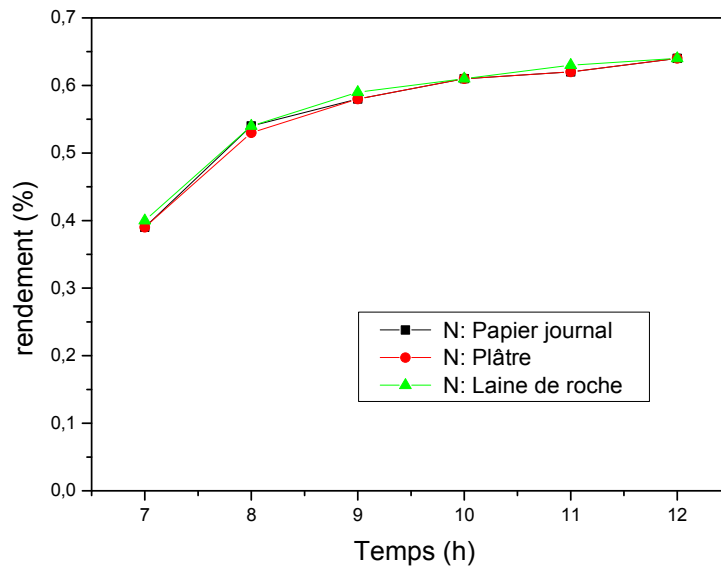


Fig.5.5.Evolution du rendement instantané en fonction des propriétés de l'isolant pour la journée du 15 juin

### 5.5. Conclusion

Dans ce chapitre de notre travail nous sommes intéressé à l'étude numérique des quelques isolants thermiques, nous avons élaboré les équations du bilan thermique de capteur thermique plan à eau, après nous avons fait les simulations numériques pour chaque isolant, enfin nous avons montres les résultats aboutis numériquement de chaque isolant présentées sous forme des graphes.

L'étude numérique des isolants sur les capteurs plans thermiques que nous avons faits permet d'étudier tous les aspects de ces capteurs (rendement, températures,...).

À travers ces exemples de température de sortie du fluide caloporteur pour les trois types des isolants thermiques pendant une période de temps, on constate :

- le rendement du capteur plan thermique à eau augmente lorsque le flux globale augmente.

- le capteur plan thermique à laine de roche et à papier journal nous donne un bon rendement pendant cette période, mais pour les hautes températures l'isolant laine de roche est plus rentable que le plâtre par exemple, (mais coût avantageux à des températures de fonctionnement plus élevées).

Cette étude nous a permis d'aboutir aux résultats suivants:

- ✓ la laine de roche permet d'assurer une bonne isolation thermique (réduisant les fuites de chaleur).

En fin, l'ajout des isolants a grandement amélioré les performances du capteur plan thermique à eau, et le calcul du coefficient de perte global, c'est un indicateur pour juger la qualité de meilleur isolant utilisable.

---

## Conclusion générale

Le capteur solaire est l'élément essentiel pour l'exploitation de l'énergie solaire, il capte le rayonnement solaire et le transforme sous forme de chaleur par effet de serre par des matériaux qui ont des grands coefficients d'absorption. Cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage de l'eau sanitaire ou pour la climatisation des bâtiments. Il peut également transformer le rayonnement solaire en courant à l'aide de matériaux semi-conducteur appelés cellules solaires.

Le rendement des capteurs solaire thermique et photovoltaïque ou hybride (photovoltaïque thermique) reste encore faible, plusieurs facteurs influent sur la performance du capteur. Cela dépend de leur type d'exploitation, de l'amélioration du pourcentage de captation de rayonnement solaire.

Le système est modélisé suivant la méthode nodale qui est basée sur le calcul des bilans thermiques de chaque élément constituant le dispositif de chauffage: fluide caloporteur, plancher et local a été effectuée pour observer l'effet temporaire des paramètres externes et internes (flux, débit, vitesse du vent et la matière isolante).

Ce travail a permis de présenter en premier lieu une étude descriptive sur les différents types à capteur solaires plans, leurs caractéristiques et leurs paramètres de fonctionnement a permis de déterminer qu'avant de concevoir de tels dispositifs, il est d'une grande importance d'accorder une attention particulière à l'effet des paramètres opérationnels internes et externes sur les performances de ces capteurs solaires thermique.

Une simulation numérique a été réalisée pour déterminer les pertes thermiques et le rendement de capteurs solaires plans, qui a permis de faire une analyse comparative de performance de trois isolants proposé : laine de roche, papier journal et plâtre au-dessous l'absorbeur. Et pour faire le choix entre ces isolants pour une application donnée.

Les courbes de rendement des capteurs montrent que pour une puissance de rayonnement variable, les performances des capteurs augmentent.

Il faut donc, pour tirer un meilleur isolant de capteur, utiliser un isolant qui correspond le mieux aux niveaux de températures auxquels on veut travailler. Un capteur avec laine de roche aura un rendement supérieur à un capteur plan avec papier journal ou plâtre pour produire de l'eau à une température élevée pendant une période de temps.

Le capteur plan a l'isolant la laine de roche ou papier journal nous donne un bon rendement, pour les hautes températures, le capteur avec laine de roche est mieux rentable, avec le coût du capteur a autre isolant plus élevé pour une énergie solaire à température de fonctionnement moyenne (mais le coût est avantageux à des températures de fonctionnement plus élevées).

Cette étude nous a permis d'aboutir aux résultats suivants:

- l'irradiation qui reste le paramètre le plus influant par rapport au débit, et matière isolante.
- la laine de roche permet d'assurer une bonne isolation thermique (réduisant les fuites de chaleur).

Les perspectives à venir de ce travail sont :

- Etudier l'influence de vitre sur le rendement d'un capteur plan thermique à eau c'est-à-dire le capteur plan simple vitrage, le capteur à double vitrage, et le capteur sans vitrage.
- Etudier l'influence de débit et la vitesse du vent sur les performances du capteur solaire palan
- Etudier l'influence de corps absorbant sur le rendement.
- Etudier l'influence de la température ambiante sur le rendement.
- Etudier l'influence de la surface solaire nécessaire.
- Pour confirmer nos prédictions, une étude expérimentale sera faire dans l'avenir.

## Annexe A

- Quelque valeur du facteur K selon les types des capteurs solaires plans.

Type de capteur	Valeur du coefficient k
Capteur sans vitre	Entre 20 et 25
Capteur vitré simple	Entre 4 et 6
Capteur vitré sélectif	Entre 3 et 5
Capteur sous vide	Entre 1 et 3

Tableau 2.1. Valeur du facteur k pour les différents capteurs solaires plans [10]

Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan : les caractéristiques thermo-physiques des matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur d'un capteur solaire plan est regroupé dans le tableau (3.1).

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

Tableau.3.1. Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur [6]

Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives figurent dans le tableau (3.2)

Revêtements sélectifs	$\alpha$	$\varepsilon$
Chrome noir	0.93	0.10
Nickel de nickel poli	0.92	0.11
Nickel noir sur le fer galvanisé	0.89	0.12
CuO sur Ir nickel	0.81	0.17
Co3O4 sur l'argent	0.90	0.27
CuO sur l'aluminium	0.93	0.11
CuO sur l'aluminium anodisé	0.85	0.11

Tableau 3.2 : propriétés de quelques revêtements sélectifs [6]

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes [6] sont listées dans le tableau (3.3).

Matière	Réflexion	Epaisseur (mm)	Transmittance $e_{\lambda=0.4 \rightarrow 2.5 \mu m}$	Transmittance $\lambda=2.5 \rightarrow 40 \mu m$	Cp (Kj/Kg .K)	$\rho$ (Kg /m <sup>3</sup> )
Verre	1.518	3.175	0.840	0.70200	0.754	2489
Fibre de verre Polyester renforcé	1.540	6.350	0.870	0.076	1.465	1399
Fibre acrylique (plexiglas)	1.490	3.175	0.900	0.020	1.465	1189
Polycarbonate (lexan)	1.586	3.175	0.840	0.020	1.193	1199
Polytétrafluoroéthylène (teflon)	1.343	5.080	0.960	0.0256	1.172	2480
Fluorure de polyvinylidène (tedlar)	1.460	1.016	0.920	0.07	1.256	1379
Polyester (mylar)	1.460	1.270	0.870	0.178	1.046	1394
Fluorure de polyvinylidène (kynar)	1.413	1.016	0.930	0.230	1.256	1770
Polyéthylène	1.500	1.016	0.920	0.810	2.302	1189

Tableau 3.3. propriétés de différentes surfaces transparentes [6]

Le tableau (3.4) donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants [3].

Matériau	Conductivité thermique ( $w/m.k$ )	Masse volumique ( $kg/m^3$ )	Chaleur massique ( $j/kg.k$ )	Diffusivité ( $10^{-7}m^2/s$ )
Air (à 20° c)	0.025	1.2	1003	208
Mousse de Polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène Expansé	0.040	20	1500	13.3
Papier journal Comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Plâtre	0.35	800	800	5.5

Tableau.3.4 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants [6].

## Résumé

L'objectif de ce travail est motivé par la recherche de procédé, évidemment intermittent, qui saura exploiter gratuitement l'abondance de l'énergie solaire. Notre étude consiste à mettre en relief l'effet des paramètres internes (flux, isolant, débit) sur un capteur solaire plan

La méthode nœuds consiste à découper le capteur en tranches fictives (mailles) de longueur  $\Delta x$  dans le sens de l'écoulement du fluide caloporteur et à établir les bilans des échanges qui interviennent aux niveaux des nœuds considérés : l'extérieure de la vitre, l'intérieur de la vitre, l'absorbeur, dans le fluide caloporteur ainsi que l'intérieure et l'extérieure de l'isolant. Il est commode pour cela d'utiliser l'analogie qui existe entre les transferts de chaleur et les lois électrique. Les profils des températures au niveau des principaux nœuds ont été commentés.

**Mots clés :** *Rayonnement solaire, capteur plan, matière isolante.*

## Abstract

The objective of this work is motivated by the research of process, obviously intermittent, which will know how to exploit free the abundance of the solar energy. Our study consists of master in relief the effect of internal parameters (flux, insulating material, flow) on a plane solar collector. The nodes method consists in cutting the sensor into fictitious slices (meshes) of length  $\Delta x$  in the flow direction of the heat transfer fluid and in establishing the balance of the exchanges occurring at the levels of the nodes considered: the outside of the window, The interior of the window, the absorber, in the pedestrian fluid as well as the inside and the outside of the insulator. It is convenient for this to use the analogy that exists between heat transfers and electrical laws. The temperature profiles at the major nodes were commented.

**Keywords:** *Solar radiation, plane collector, insulating material*

## ملخص

الهدف من هذه الدراسة هي استغلال الطاقة الشمسية. نقوم بدراسة تأثير العوامل الداخلية (أشعة تدفق، عوازل حرارية) علي لاقط شمسي مائي خاضع لأشعة شمسية متغيرة.

تعتمد طريقة العقد علي تقسيم اللاقط إلي أقسام ذات طول  $\Delta x$  في اتجاه جريان السائل, ثم نوجد المعادلات في العقد الزجاج الخارجي الزجاج الداخلي المادة العازلة السائل أيضا علي مستوى المادة العازلة في الداخل وفي الخارج هذا يقودنا إلي استعمال طريقة التماثل بين انتقال الحرارة والقوانين الكهربائية. ومن ثم نحسب درجات الحرارة في العقد الرئيسية.

**الكلمات المفتاحية :** الإشعاع الشمسي، لاقط مستوي، المواد العازلة.