REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

&

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Dr : Yahia Farés de Médéa

FACULTE DES SCIENCES E T DE LA TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE DE LA MATIERE



Projet de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Génie Mécanique

Option **: énergétique et thermique des systèmes**

Thème :

Simulation numérique d'un capteur solaire (photo thermique)

Présenté par :

BELLATRECHE Riyad

Encadré par :

Dr. Chiba Younes

2014/2015

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 gratitudes, mes reconnaissances et mes sincères

Remerciements à Dr. Chiba Younes m'avoir encadré tout le

Long de mon projet.

Dédicace

*Je dédie ce travail à mes très chers **Parents**, pour leur soutien*

Et tous les efforts qu'ils m'ont donné le long de mon parcours et

Je leurs souhaite bonne santé et longue vie.

A Mon frère et Mes chère Sœurs.

A Toute Ma Famille.

A mon encadreur Mr Chiba Younes

A tous mes collègues et mes amis partout

*A Toute la promotion **Mécanique** sans exception*

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.

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : état de l'art (analyse de référence)	
I.1 Introduction	02
I.2 Capteurs solaires	02
I.2.1 Capteurs solaires thermiques	02
I.2.1.1 Capteurs à circulation de liquide	06
I.2.1.2) Capteurs à air	07
I -3) Caractéristiques techniques des capteurs solaires plans	07
I -3-1) Principe	13
I -4) Orientation et inclinaison d'un capteur plan	13
I.4.1 Orientation	13
I.4.2 L'inclinaison	14
I.5) La cuve de stockage	14
I.6) La tuyauterie	15
I.7) L'échangeur	15
I.8) Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	16
I.9) Les type de chauffe-eau solaires	18
Conclusion	
Chapitre II : Le gisement solaire	
II.1 Introduction	19
Le soleil	19
II.2 Le mouvement de la terre	20
II.2.1 Sphère célestes	21
II.3. Coordonnées célestes	21
II.3.1 Coordonnées géographiques	21
II.3.2Coordonnees horaires	22
II.3.3. Coordonnées horizontales	23
II.4. Temps solaires	23
II.4.1. Temps solaire vrais (TSV)	23
II.4.2. Le temps solaire moyen (TSM)	23
II.4.3. Le temps civil	24
II.4.4. Temps universel (TU)	24
II.4.5. Temps légale (TL)	

II.5. Estimation horaire de l'ensoleillement	24
II.5.1. Constante solaire	24
II.5.2. Répartition du rayonnement solaire	24
	25
II.6. Le gisement solaire en Algérie	27
Conclusion	28
Chapitre III : modèle mathématique	
III.1 Rappels sur les transferts de chaleur	29
III.1.1 Conduction	29
III.1.2 Convection	29
III.1.3 Le rayonnement	31
III.2 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire	31
III.2.1 Échanges thermiques au niveau de la vitre	32
III.2.2 Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur	33
III.2.3 bilan thermique du capteur solaire plan en régime transitoire	35
III.3 Perte globale d'énergie	36
III.3.1 Coefficient de pertes thermiques vers l'avant du capteur	37
III.3.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur	37
III.3.3 Coefficient de pertes thermiques latérales	37
III.4 Rendement instantané du capteur solaire	37
III.5 Bilan thermique de la cuve de stockage	38
III.6. Principe de simulation	41
III.6.1 Le programme principal	41
III.6.2 Méthode de résolution numérique	41
III.6.3 L'organigramme général pour le régime transitoire	42
Chapitre IV : Résultats et interprétation	
IV.1 Introduction	44
Résultats et interprétation	45-55
Conclusion générale	56
Références	

Liste des figures

Figure I.1: Coupe d'un capteur solaire plan vitré	3
Figure I.2: Capteur moquette pour le chauffage des piscines	3
Figure I.3: Capteur solaire sous vide	4
Figure I.4: Schéma d'un capteur cylindro parabolique	5
Figure I.5: Schéma représentant les parties mobiles d'un capteur cylindro Parabolique	5
Figure I.6: Schéma d'un capteur à concentration paraboliques	6
Figure I.7: Système de centrale à tour (héliostat*)*	6
Figure I.8: Capteur plan à air	7
Figure I.9: Schéma de principe d'un capteur solaire plan	7
Figure I.10: peinture noire sur absorbeur	8
Figure I.11: Absorbeur à ailettes	10
Figure I.12: Absorbeur à coussin	10
Figure I.13: Absorbeur « Roll bond **»**	10
Figure I.14: Principaux types de réseaux de tuyauteries dans l'absorbeur	11
Figure I.15: Schéma des différentes pertes	13
Figure I.16: La cuve de stockage avec échangeur	14
Figure I.17: Les types d'échangeur	15
Figure I.18: Le schéma synoptique du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	15
Figure I.19: Le chauffe- eau solaire à circulation naturelle sans échangeur de chaleur	16
Figure I.20: Le chauffe-eau solaire en thermosiphon avec échangeur	16
Figure I.21: Le chauffe eau avec circulateur avec échangeur à l'intérieure de réservoir de stockage.	17 17 20 21

Figure I.22 : La chauffe eau avec circulateur et échangeur à l'extérieur du réservoir stockage	21
Figure II.1: Structure du soleil	22
Figure II.1: Mouvement de la terre autour du soleil	22
Figure II.1: La sphère céleste	23
Figure II.1: Repère de coordonnées horaires	26
Figure II.1: les cordonnée horaire	27
Figure II.1-Les coordonné horizontales	28
Figure II.1 : Rayonnement direct, diffus et global	29
Figure II.1 Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel	30
Figure II.1 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné	31
Figure III.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction	32
Figure III.2 : Schéma du transfert de chaleur par convection	36
Figure III.3 : Schéma du transfert de chaleur radiatif	38
Figure III.4 Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré	45
Figure: III.5: Circuit électrique équivalant relative à un capteur solaire plan	46
Figure: III.6: Schéma de la cuve de stockage	47
	48
	49
	49

Liste des tableaux

Tableau I.1 : différents traitements de surface	09
Tableau I.2 : Le coefficient d'absorption et le coefficient d'émission	09
Tableau I.3 : Echanges thermiques dans un capteur plan	12
Tableau I.4 : Quelques propriétés des isolants	12
Tableau II.1 : Caractéristiques principales du soleil	19
Tableau II.2 : coefficients de trouble du ciel	25
Tableau II.3 : Albédo typique de différents types de surfaces	26
Tableau II.4 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	27

Résumé

Ce travail présente la simulation numérique d'un capteur solaire plan. Le capteur est constitué d'une vitre et un vide commun entre la vitre et l'absorbeur qui est teinté en noir pour favoriser l'effet de serre. Le transfert de chaleur au fluide caloporteur s'effectue à l'aide des tubes incorporés dans l'absorbeur. Une étude paramétrique a été effectuée. Les résultats de la simulation incluant le rendement du capteur, le coefficient des pertes thermiques et quantité de chaleur captée et perdue sont présentés et discutés.

Mots clés :
Capteur solaire, simulation numérique, absorbeur, fluide caloporteur, comportement thermique

Abstract:
This work presents the numerical simulation of a solar collector. The collector consists of a glass and a spice between the glass and the absorber which is black colored to favour the greenhouse effect. Tubes incorporated in the absorber has been used for heat transfer to carrier fluid is carried. A parametric study has been effected. The simulation results include the performance of collector, the coefficient of thermal losses and amount of heat exchange are presented and discussed.

Keywords:
Solar collector, numerical simulation, absorber, carrier fluid, thermal behavior

الملخص:

هذا العمل يعرض لنا المحاكاة العددية لجهاز. الاستشعار الشمسي. يتكون جهاز الاستشعار من الزجاج وفراغ مشترك بين الزجاج وجهازا لامتصاص, وهو أسود اللون من أجل ظاهرة الاحتباس الحراري. ويتم نقل حرارة السائل المبرد إلى الخارج باستخدام أنابيب بتم إدراجها في جهاز الامتصاص. وقد أجريت دراسة خصوصية لهذا الغرض . تشمل نتائج المحاكاة لأداء أجهزة الاستشعار، ويتم عرض معامل الضياع الحراري وكمية الحرارة الممتصة والضائعة لمناقشتها

الكلمات المفتاحية :

.ملقط شمسيي. محاكاة عددية . جهاز الامتصاص. سائل ناقل للحرارة. سلوك حراري .

Nomenclature

Symbole	***Désignation***	***Unité***
C_{pi}	Chaleur massique à pression constante	j/kg. °C
E^{i}	Epaisseur d'un corps	M
hc_{ij}	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m2. °C
hr_{ij}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m2. °C
G	Rayonnement global incident	W/ m2
m_i	Masse d'un corps d'indice i	Kg
P_i	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i	W/ m2
Qc_{ij}	Flux de chaleur échangé par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
Q_{cdij}	Flux de chaleur échangé par conduction entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
Qrij	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
T_i	Température d'un corps d'indice i	°C
V	Vitesse du vent	m/s
G	Accélération de la pesanteur	m2/s
S_i	Surface d'un corps d'indice i	m2
Δ	La déclinaison	degré
Ω	L'angle horaire	degré
Φ	Latitude de lieu	degré
Ψ	Longitude de lieu	degré
A	L'azimut	degré
TSV	L'heure solaire	heures
J	Nombre de jour de l'année	jours

Indices	***Désignation***
am	Air ambiant
ab	Absorbeur
f	Fluide
i	Isolant
il	Isolant Latéral
v	Vitre

Lettres grecques	***Désignation***	***Unité***
α	Coefficient d'absorption	Sans unité
β	Inclinaison du capteur	degré
τ	Coefficient de transmission	Sans unité
η	Rendement instantané	Sans unité
λ_i	Conductivité thermique d'un corps d'indice i	W/m. °C
μ	Viscosité dynamique	kg/m. s
ρ	Masse volumique d'un corps d'indice i	kg/m3
ε	Coefficient d'émissivité	Sans unité

Introduction générale

Introduction générale :

Le problème de l'énergie a dominé les scènes économiques et politiques mondiales de ces quarante dernières années. Jamais un thème n'a suscité autant d'enjeux et n'a créé autant de polémiques.
Le recours forcé vers la domination des sources d'énergie tels les champs pétroliers et gaziers, est l'origine de plusieurs conflits régionaux. La crise de 73, dite crise De l'énergie, déclenchée par la guerre d'octobre, a agi comme un détonateur, elle a fait sortir Le monde de sa léthargie et l'a poussé à réfléchir à d'autres alternatives aux ressources conventionnelles existantes, que malgré leur prépondérance, elles ne sont pas pour autant inépuisables. Constituées dans leurs grandes parties des hydrocarbures, elles risquent de s'épuiser dans un très proche avenir, si elles ne sont pas utilisées avec rationalité.
Donc, comme nous l'avons vu plus haut, la fameuse crise de 73 a joué en faveur des énergies renouvelables, énergie solaire, éolienne, et géothermique pour ne citer que les plus connues, Qui ont bénéficiées d'un regain d'intérêt très considérable. Ces énergies douces offre la possibilité d'avoir une production :

- Généralement plus simple.
- Moins traumatisante pour la nature et pour les hommes.
- Plus économique à long terme.
- Décentralisée, utilisation sur place d'une énergie disponible sur place.

Le présent travail comporte quatre chapitres.
- Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique du capteur solaire plan.
-le deuxième chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et Définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Dans le troisième chapitre consacré à l'étude des différents échanges thermiques mis en jeu .
-le quatrième chapitre les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet

. Une introduction générale et une conclusion se rapportant au travail, complètent ce mémoire

Chapitre I

État de l'art (analyse de référence sur les capteur solaire)

-1Introduction:

L'énergie émise par le soleil voyage jusqu'à la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique. Ce rayonnement est semblable aux ondes radioélectriques mais il possède une gamme de fréquence différente.
L'intérêt du solaire est sensiblement le même sur tout le territoire. L'ensoleillement est plus fort dans le sud, mais dans le Nord, les besoins en chauffage sont plus importants et plus étalés sur l'année. L'énergie peut être récupérée par des capteurs solaires thermiques ou photovoltaïques. Le flux solaire peut être directement converti en chaleur par l'intermédiaire de capteurs solaires thermiques.
Cette technique est applicable au chauffage des habitations, des piscines, à la production d'eau chaude sanitaire, ou encore au séchage des récoltes (fourrage, céréales, fruits).

I.2 Capteurs solaires :

Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires :
- Capteurs solaires thermiques.
- Capteurs solaires photovoltaïques.

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

I 2.1 Les capteurs solaires thermiques :

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :
- Capteurs à circulation de liquide.
- Capteurs à air.

I.2.1.1 Capteurs à circulation de liquide :

Ce sont des capteurs où le fluide caloporteur qui circule à travers un circuit solaire c'est un liquide (eau, huile, un fluide thermique, antigel).
Les capteurs solaires à circulation de liquide les plus répandus sont :

- les capteurs plans.
- les capteurs à concentration

a) Capteur plan (ou isolateur) :

Il existe trois types de capteurs solaires plans :
– Capteurs plans vitre.
– Capteurs plans non vitre.
– Capteurs plans à haute performance (sous vides**)**

a.1) Capteurs plan vitrés : C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, transmet cette chaleur à un liquide caloporteur, cet absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement d'une. Pour des niveaux de températures de 35º a 90ºc, il est nécessaire d'utiliser des capteurs avec vitrage.
L'absorbeur est dans ce cas, métallique (en cuivre ou en aluminium), dans un caisson isolé en face arrière, et vitré en face avant.

La fonction du vitrage est de piéger le rayonnement en créant un effet de serre. Ce type de capteur est utilisé généralement pour la production d'ECS (eau chaude sanitaire) le schéma suivant présente la structure d'un capteur plan vitré. Figure (I.1).

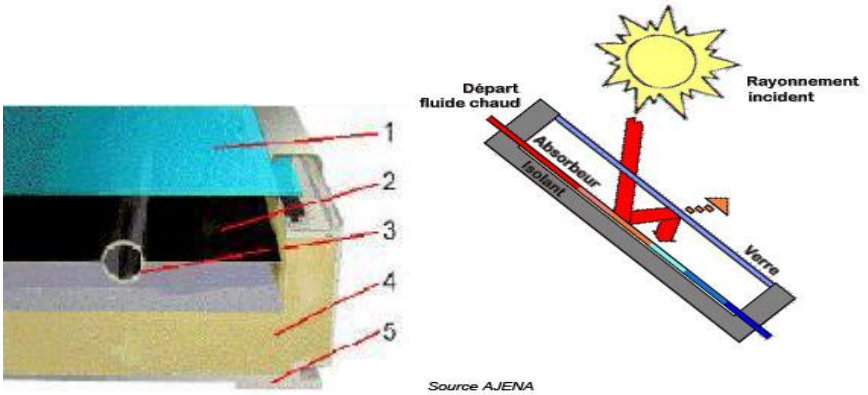


Figure I.1: Coupe d'un capteur solaire plan vitré

1. Un ou plusieurs couverts transparents.
2. Une plaque absorbante.
3. Un circuit hydraulique pour l'évacuation du fluide.
4. Une isolation thermique.
5. Un bac portant le tout.

a.2) Capteurs plans non vitrés:

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs, utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été, ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage bas température planché chauffant et le Chauffage des piscines.



Fig. I.*2 : Capteur moquette pour le chauffage des piscines*

a.3) Les capteurs à haute performance (tubes sous vides) :

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. De diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement. Permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à120ºC).

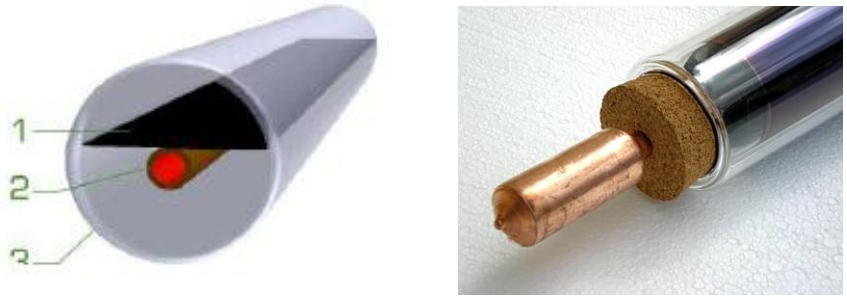


Figure I.*3 : Capteur solaire sous vide.*

1- Absorbeur
2- échangeur
3- tube transparent

Il y a 4 familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique Spécifique :

a. Le capteur à tube sous vide à circulation directe.
b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc".
c. Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos".
d. Le capteur à tube sous vide "Schott".

Il existe d'autres technologies, telles que les capteurs à, les capteurs à Concentrateurs et les capteurs avec stockage intégré (auto stockeur).
Les pays froids ont généralement besoin de dispositifs à rendement élevé, pour ce faire, on
Peut équiper un capteur :
-D'un double vitrage.
-D'un couvert muni d'une couche anti –reflet.

b) Capteurs à concentration :

Il est donc nécessaire de concentrer le rayonnement solaire pour obtenir Des températures exploitables pour la production d'électricité.
Les technologies de concentration solaire se basent sur des collecteurs réflecteurs qui concentrent la radiation solaire et réchauffent un fluide à haute Ou très haute température.

b.1.1) Les systèmes de concentration : La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après Transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration. Les technologies solaires à concentration permettent de transformer le rayonnement solaire en chaleur à un niveau de température situé entre 200°C et1800°C, avec un rendement supérieur à 70%. Cette chaleur

primaire peut ensuite être utilisée dans des procédés de transformation Ou de synthèse de matériaux ou bien être convertie en vecteur énergétique comme l'électricité ou l'hydrogène.

b.1.2) Différents types de concentrateurs: On peut distinguer deux catégories, les systèmes à récepteurs central (à tour) et les systèmes à collecteurs distribués (parabolique et cylindro - parabolique).

b.2) Concentrateurs cylindro-paraboliques : Les réflecteurs cylindro-paraboliques sont des systèmes en forme de ≪U ≫. Ils Concentrent les rayons du soleil sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du Réflecteur. Parfois un tube en verre transparent entoure le tube récepteur afin de Réduire les pertes de chaleur. Ces concentrateurs utilisent souvent un système de pointeur Solaire à simple axe ou à double axe. Les températures du récepteur peuvent atteindre400°C.

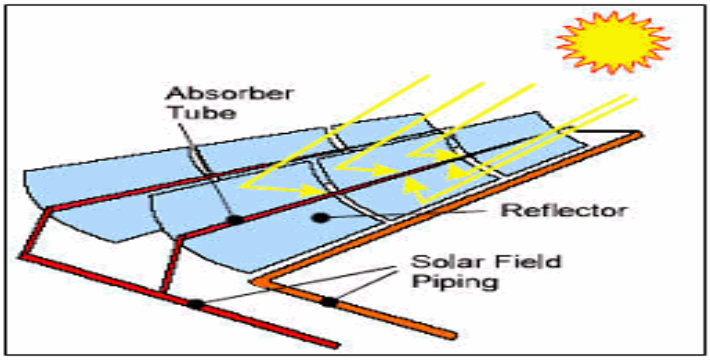


Figure I.*4 : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.*

Les premières centrales industrielles importantes de ce type ont été développées aux Etats - Unis par la compagnie Luz Solar. Deux variantes existent, selon la partie mobile :

- Soit le miroir.
- Soit l'absorbeur.





Figure I.*5 : Schéma représentant les parties mobiles d'un capteur cylindro Parabolique.*

b.3) Concentrateurs paraboliques (type dishes) : Ces capteurs utilisent des surfaces réfléchissantes paraboliques pour concentrer les rayons solaires dans le foyer où se trouve le récepteur (absorbeurs) qui capte la chaleur solaire ainsi concentrée . Naturellement ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil. Les systèmes à réflecteur parabolique peuvent atteindre des températures plus élevées (jusqu'à 1500°) sur le récepteur.



Figure I *6 : Schéma d'un capteur à concentration paraboliques (type dishes).*

b.4) Système de centrale à tour (héliostat) :

Un héliostat utilise un ensemble de pointeurs solaire à double axe qui dirige l'énergie du Soleil vers un grand absorbeur situé dans une tour. Ces capteurs possèdent un ensemble de grands miroirs qui suite le mouvement du soleil. Les miroirs concentrent les rayons du soleil Sur le récepteur en haut de la grande tour. Un ordinateur garde les miroirs alignés afin que Les rayons du soleil, qui sont réfléchis, visent toujours le récepteur, où la température peut dépasser 1000 ° C [18], [19].



Figure I. *7 : Système de centrale à tour (héliostat).*

b.5) Quelques avantages de la concentration :

- Réduction des surfaces réfléchissantes.
- Réduction des pertes thermiques.
- La densité d'énergie au niveau de l'absorbeur est grande donc le fluide caloporteur Peut travailler à température plus élevée pour la même surface de captation d énergie.

I.2.1.2 Capteurs à air :

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur.
Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide.

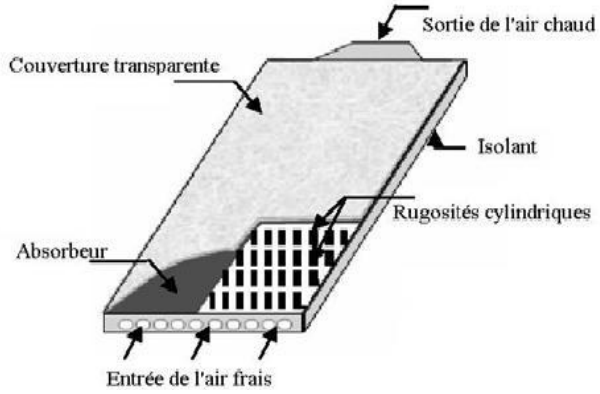


Figure I.8 : Capteur plan à air.

I -5-2) Caractéristiques techniques des capteurs solaires plans :

I -5-2-1) Principe :

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, …).
Le schéma de principe d'un capteur solaire plan est donné sur la figure I.9.

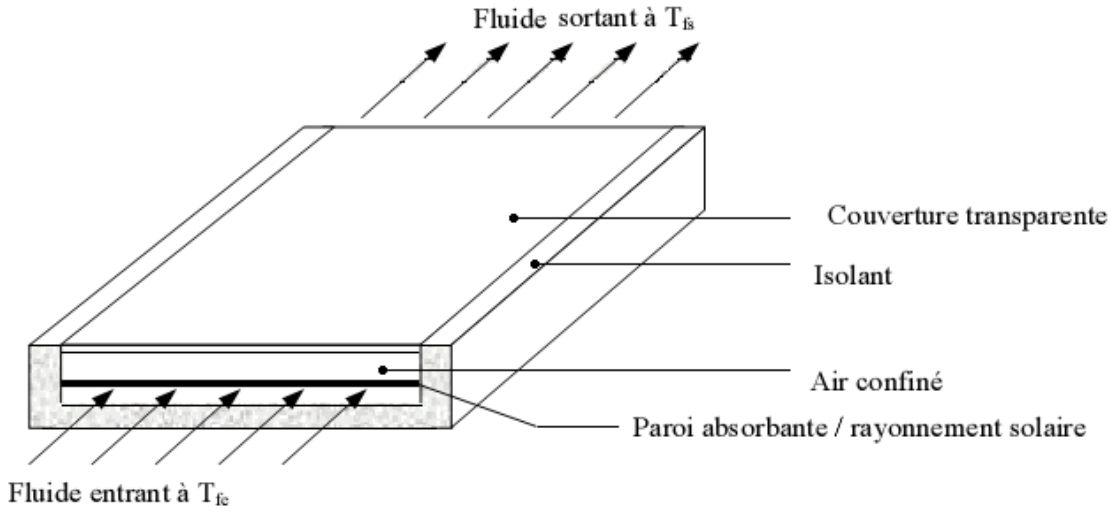


Figure I.9- Schéma de principe d'un capteur solaire plan.

La paroi absorbante s'échauffe sous l'effet de l'absorption du rayonnement solaire incident. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température Tfs – Tfe à la traversée du capteur.

I -5-3) Caractéristiques techniques des différents composants :

Le capteur solaire plan se compose essentiellement des éléments suivants :
- une plaque opaque qui absorbe le rayonnement solaire est transmettre au fluide caloporteur.
- une isolation thermique arrière est latérale.
- une couverture transparente généralement en verre a simple ou a double qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en protégeant de vent.

I -5-3-1) L'absorbeur :

Deux fonctions incombent à l'absorbeur :

1. absorber la plus grande partie du rayonnement solaire possible.
2. transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de perte.

De plus, il devra être le plus léger possible afin de limiter l'inertie de mise en régime et construit avec un bon matériau conducteur. Les absorbeurs sont généralement réalisés avec des feuilles minces de métaux présentant une bonne conductibilité et une bonne tenue mécanique. C'est pourquoi, la plupart du temps, les absorbeurs sont réalisés au moyen d'un support en cuivre de 0,2 mm et sont recouverts par un traitement de surface.
L'absorbeur en général est disposé de 25 mm à 30 mm d'isolant.
Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement et d'en réémettre le moins possible.
Ces types de surfaces absorbant au maximum et réémettant au minimum ont été nommées surfaces « sélectives ».
La sélectivité de l'absorbeur est très importante; elle est améliorée au moyen de traitements de surface qui ajoutent au support des caractéristiques telles que le rayonnement solaire est très bien absorbé et que le rayonnement infrarouge émis (dû à l'échauffement) est limité.

Deux coefficients déterminent les caractéristiques de ces absorbeurs :

- ✓ α : coefficient d'absorption (optimal : 1)
- ✓ ε : coefficient d'émission (optimal : 0)

Les différents revêtements possibles :

a. la peinture noire: la peinture mate noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption α compris entre 0,9 et 0,95. Mais le degré d'émission ε lui est très élevé (0,85).

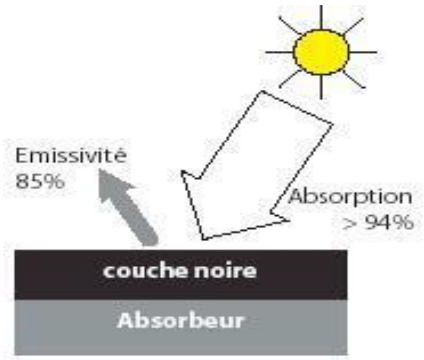


Figure I.10- peinture noire sur absorbeur.

b. Oxyde de chrome*:* le revêtement en "black chrome" (couleur noire) est composé d'oxyde de chrome déposé sur une sous-couche de nickel, le tout formant une couche extrêmement fine sur un support métallique son coefficient d'absorption α est de 0,95 et son coefficient d'émission ε de 0,12 à 0,18.

c. Traitement sous vide : ce revêtement sélectif a été mis au point en 1995 et est facilement reconnaissable de par sa couleur bleu marine, ce procédé consiste à déposer différents métaux (titane, …) sur la surface absorbante en présence du vide. Le coefficient d'absorption α obtenu est supérieur à 0,95 et le coefficient d'émission ε, inférieur à 0,05.
Nous résumons les résultats obtenus par les différents traitements de surface dans le tableau ci-dessous :

Revêtement	Absorption : α	Emission : ε
Peinture noire	0.9-.095	>0.85
Black chrome	0.95	0.12 à 0.18
Dépôt sous vide	>0.95	<0.05

Tableau I.1- différents traitements de surface.

Actuellement le procédé de revêtement sous vide a pris une grande place sur le marché grâce :

- ✓ à ses performances.
- ✓ à sa faible consommation en énergie lors de la fabrication (1kWh par m2 d'absorbeur, c'est à dire moins de 10% de l'énergie nécessaire pour les autres revêtements).
- ✓ à son respect au niveau écologique (pas de dégagements de gaz ou solides, pas de pollution de l'eau).
- ✓
- ✓ On donne un tableau pour les valeurs de ε et α pour les matériaux absorbeur les plus utilisé dans les capteurs solaires plan:

Support et traitement	α	ε
Acier nickel noir sur nickel	0,95	0,07
Acier et chrome noir sur nickel	0,95	0,09
Acier et chrome noir	0,91	0,07
Cuivre et chrome noir	0,95	0,14
Acier galvanise et chrome noir	0,95	0,16
Cuivre et cuivre noir	0,88	0,15
Acier et oxyde de fer	0,85	0,08
Aluminium et oxyde de manganèse	0,70	0,08
Acier et couche organique sur Chrome noir	0,94	0,20
Peinture noir époxy	0,95	0,18
Peinture blanche époxy	0,25	0,91

Tableau I.2 - Le coefficient d'absorption α et le coefficient d'émission ε pour les supports les plus utilisés comme absorbeur.

Par ailleurs, la forme de l'absorbeur influence également le rendement du capteur.

2.2.2.1 Absorbeur à ailettes : Il est constitué d'un tube, généralement en cuivre, sur lequel sont fixées des ailettes en cuivre, acier ou aluminium. Le liquide caloporteur circule dans les tubes (voir la figure 2.2).

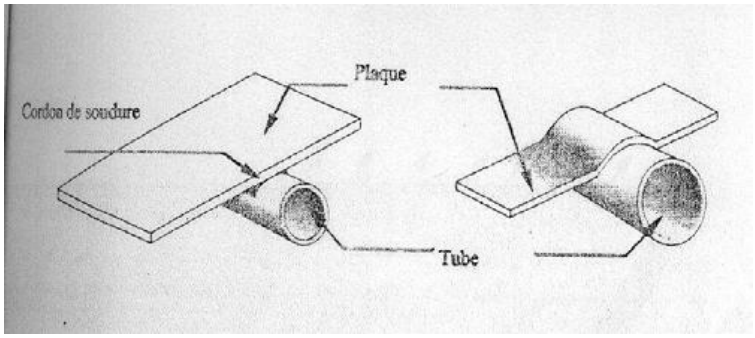


Figure 1.11 Absorbeur à ailettes

2.2.2.2 Absorbeur à coussin : Il est constitué de deux tôles en acier ou en acier inoxydable, soudées l'une à l'autre suivant un dessin bien précis, (figure 2.3).

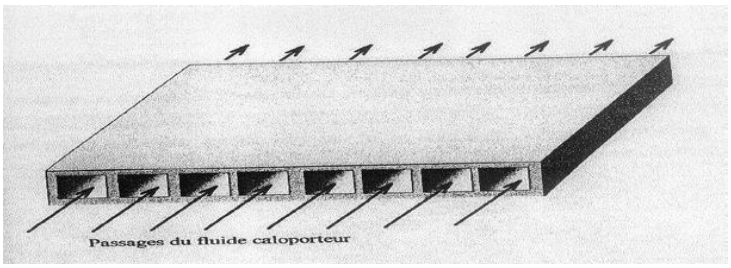


Figure I*.12 Absorbeur à coussin.*

2.2.2.3 Absorbeur «Rollbond » : Il est constitué, tout comme l'absorbeur à coussin de deux tôles, en aluminium assemblées Selon le système «Rollbond», (figure 2.4).

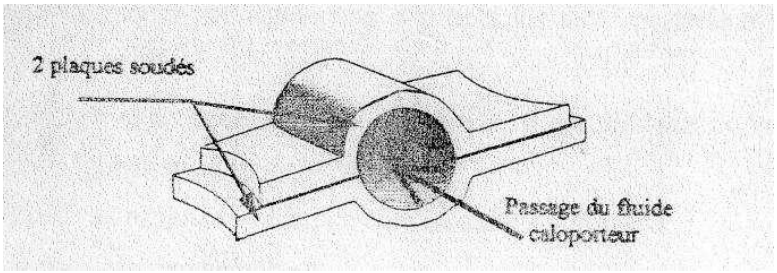


Figure 1.13 Absorbeur « Rollbond »

Ces canalisations peuvent avoir une section de géométrie quelconque (ovale, hexagonale, Circulaire…etc.).

On distingue également les absorbeurs par les différentes formes de réseau de tuyauterie auxquels ils sont liés (figure 1.3) :

a) les absorbeurs à conduites en serpentin.

b) les absorbeurs à conduites parallèles unidirectionnelles.

c) les absorbeurs à conduites parallèles.

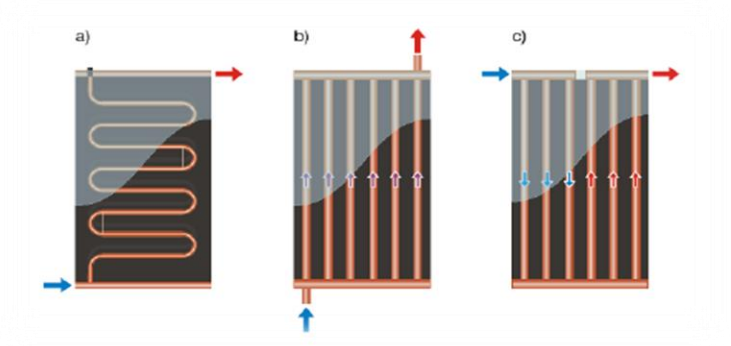


Figure 1.14 : Principaux types de réseaux de tuyauteries dans l'absorbeur (d'après DGS Solar Antalgen .

2.3.2 La couverture transparente (vitrage) :

La couverture a une fonction de protection de l'absorbeur, mais elle joue aussi un rôle important dans le bilan thermique en réduisant les pertes de chaleur. Habituellement, on utilisera le verre comme couverture transparente.
Un tel dispositif représente donc un véritable piège au rayonnement solaire, qui peut être amélioré en munissant le capteur d'une double couverture.
Comme couvertures transparentes utilisées dans la conception des capteurs solaire plans, on distingue:

- ***Le verre :***

La propriété physique intéressante du verre est qu'il permet de laisser passer le rayonnement solaire et d'arrêter le rayonnement infrarouge d'un émetteur tel que celui de l'absorbeur. La chaleur est donc bloquée entre l'absorbeur et la couverture : c'est l'effet de serre.
La couverture doit présenter une bonne résistance aux chocs, aux brusques variations de températures ainsi qu'aux températures élevées.
Une appellation « verre solaire » existe et fait l'objet d'exigences toutes particulières :

- le verre doit être trempé pour résister sans risques aux charges thermiques et mécaniques.
- il doit présenter un haut degré de transmission solaire caractérisé par une faible teneur en fer.
- il doit être doté d'une surface structurée permettant de réduire les reflets directs.

La qualité du verre est caractérisée par son rendement optique ou taux de transmission ζ qui dépend de la nature et de l'épaisseur du vitrage ainsi que de l'angle d'incidence i et de la nature du rayonnement (direct ou diffus) (valeur habituelle de ζ : 0,91).
Actuellement, un nouveau verre, dit « antireflet », équipe certains capteurs. Ce verre a un taux de transmission de l'ordre de 96% et son effet se marque davantage pour le placement de capteurs à la verticale.

- ***Les polycarbonates :***

sont des dérivés de matières plastique à double et à triple lame très fine, reliées entre elles par une multitude de parois pour former des cavités alvéolaires, ces dernières réduisent le mouvement de l'air incarcéré dans cet espace, et permettent de minimiser les pertes thermiques par convection vers l'avant. C'est ce genre de couvertures qu'on utilise dans notre laboratoire. Leur coefficient de transmission au rayonnement solaire, est de l'ordre de 83% sous une incidence normale à l'état neuf, qui diminue légèrement avec le temps (79% au bout de cinq ans). Il faut noter que l'effet de

serre est nettement meilleur avec des couvertures transparentes en verre et en particulier avec des plaques alvéolaires à double paroi. Les polycarbonates, en comparaison avec des couvertures en verre, présentent l'avantage d'avoir une bonne résistance aux chocs thermomécanique.

Tableau I.3 - « transitivité de divers types de couvertures dans les gammes du visible et de l'infrarouge »

Matériaux	Transitivité à incidence normale	
	λ' = 0,4-2,5 μ m	λ' = 2,5-0,4 μ m
Le verre	0.83-0.91	0.00-0.03
Les plastiques en feuilles	0.76-0.92	0.02-0.06
Les plastiques en films	0.85-0.87	0.2-0.26

Tableau I.3.-Echanges thermiques dans un capteur plan

2.2.3 Isolation thermique :

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent Avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par Conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolation doit Généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 5 à 10 cm. Les matières isolantes utilisées sont soient des laines minérales, soient des matières synthétiques (de laine de verre, mousses Expansives de polyuréthanne ou polystyrène). Elle doit résister aux hautes températures Atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants Doivent être considérés :

- La masse volumique ;
- La température maximale d'utilisation en régime permanent ;
- La résistance au feu. aux rongeurs et à la putréfaction ;
- La sensibilité à l'humidité et son coût.
-

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau 2.5.

Isolant	**Conductivité thermique à 500w/m °C max**	**Température max**
Laine de verre	0,041	150
Laine de roche	0,05	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85
Liège expansé	0,042	110

Tableau 1.4- Quelques propriétés des isolants.

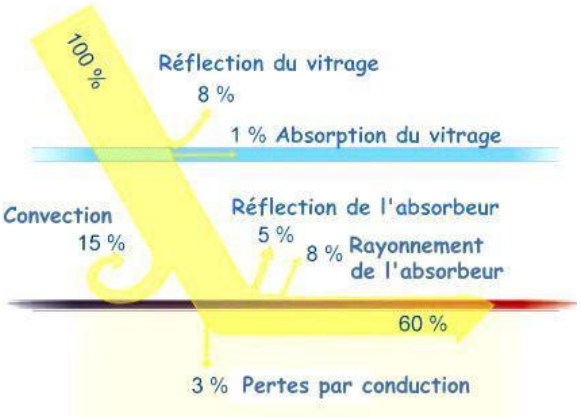


Figure I.15- Schéma des différentes pertes.

I-5-3-4) Le fluide caloporteur :

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

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.
- Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :
- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible (ρ. Cp=1225 J/m3. K) pour
- L'air contre 4.2.10$_6$ J/m3. K pour l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

I.4 Orientation et inclinaison d'un capteur plan :

I.4.1 Orientation :

A cause de répartition intégrale de l'ensoleillement pendant toute la journée, il est nécessaire D'orienter le capteur de telle façon que l'énergie recueilli soit maximale, généralement on oriente les capteurs en plein sud (Pour l'hémisphère nord).

I.4.2 L'inclinaison :

Le problème de l'inclinaison est le plus délicat et nécessite une étude chiffrée, mais nous Constatons néo-moins que la position verticale du capteur favorise la période hivernal, alors que la position horizontale conduit a des meilleurs rendements pendant l'été, la solution idéale serait 'incliner différemment les capteurs suivant la période de l'année.

I.5 La cuve de stockage :

La cuve de stockage est un élément essentiel dans l'installation de chauffage d'eau solaire. Comme son nom l'indique, elle permet de stocker l'eau chaude venant des capteurs pour la restituer au moment des besoins d'utilisation, elle peut contenir ou non un échangeur de chaleur. Voire Figure (I.16).

Aussi pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur, la cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique et économique adéquate. Le stockage est caractérisé par :

- Le mode d'accumulation de chaleur (sensible ou latente).
- La capacité thermique du stock.
- Les pertes thermiques du stockage.

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Stockage long duré (inter- saisonnier).
- Stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures).

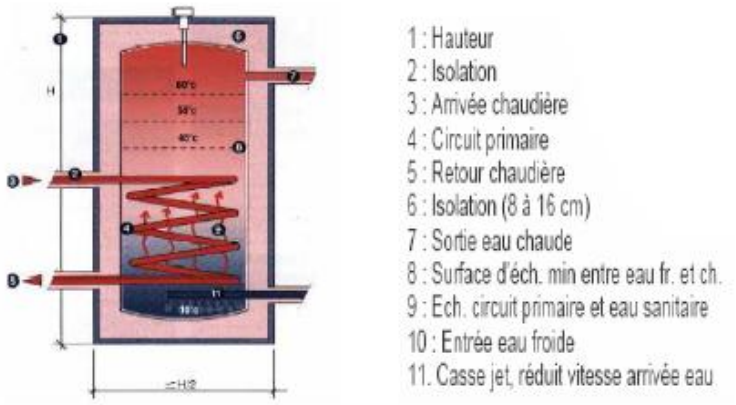


Figure I.16: La cuve de stockage avec échangeur.

I.6 La tuyauterie :

La tuyauterie sert au transfert du fluide caloporteur, son étude et son installation doivent être Suivies avec soin pour éviter de graves ennuis.

Le circuit de tuyauterie doit être le plus simple possible c'est-à-dire court et éviter les Changements de diamètre.

Les tuyaux doivent être soigneusement calorifugés, le circuit de fluide caloporteur comprend Plusieurs appareils dont les principaux composants sont.

- Une Soupape de sécurité.
- Un vase d'expansion.
- Un Purgeur.
- Un clapet de non retour.
- Une isolation.

I.7 L'échangeur

Un échangeur de chaleur est un appareil dans lequel circulent deux fluides séparés par une paroi et qui échangent de la chaleur, l'un se refroidit pendant que l'autre s'échauffe.

Le plus souvent, il est intégré dans la cuve de stockage mais il peut aussi être à l'extérieur. De part sa fonction de transfert thermique, l'échangeur doit offrir une surface de contact la plus grande possible entre fluides, c'est pourquoi la plupart des échangeurs ont l'aspect d'un Serpentin.

Remarque : Les échangeurs externes seront des échangeurs à plaques et les échangeurs internes seront du type à serpentin, dans notre installation l'échangeur utilisé est de type serpentin. La figure (I.17). Montre les deux types des échangeurs.



Echangeur plaque



echangeur integre

Figure I.17 : Les types d'échangeur

I.8 Le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire :

Le fonctionnement est simple, il consiste un transfert de l'énergie solaire absorbée par les capteurs (chaleur) vers un système de stockage (ballon).

Le transfert est exécuté au moyen d'un liquide caloporteur.

Le liquide caloporteur doit se déplacer du capteur solaire vers le ballon (où il échange sa chaleur, pour réchauffer l'eau froide contenue dans celui-ci), l'eau refroidie retournant au capteur ou à nouveau elle sera réchauffée par le rayonnement solaire. Voir *Figure (I.18).*

Dans son trajet capteur - réservoir – capteur, l'eau pourra circuler d'elle-même (circulation Naturelle) où être entraîné par une petite pompe (circulation forcée).

Les positions relatives de l'isolateur et du réservoir sont essentielles pour décider du Fonctionnement de l'ensemble.

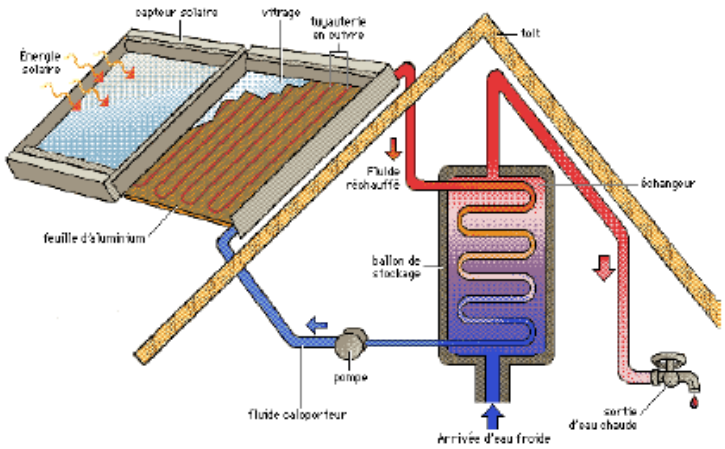


*Figure I.18: Le schéma synoptique du fonctionnement d'un chauffe-eau solaire***.**

I.9 Les type de chauffe-eau solaires :

I.9.1 Le chauffe-eau solaire à circulation naturelle (thermosiphon) :

L'eau chauffée dans le capteur est envoyée dans le réservoir de stockage, elle est remplacée Dans le capteur par l'eau froide, qui s'échauffe à son tour et ainsi de suite. La circulation de l'eau dans le circuit doit être continue tant qu'il y a du soleil et de l'eau à Réchauffer, elle est généralement assez lente. L'eau chaude plus légère que l'eau froide s'accumule d'abord dans le haut du réservoir. Voir *Figure (I.19).*

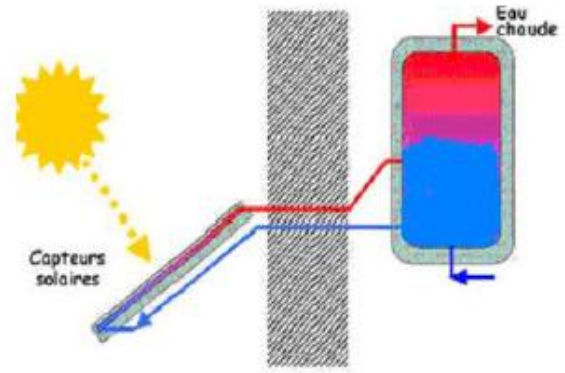


Figure I.19 : Le chauffe- eau solaire à circulation naturelle sans échangeur de chaleur.

I.9.2 Le chauffe-eau solaire a circulation naturelle avec échangeur :

L'eau chaude venant du capteur circule à l'intérieur du réservoir dans un échangeur de chaleur, au contact de l'eau froide du réservoir, elle cède ses calories a travers la paroi de l'échangeur et retourne se réchauffer dans le capteur. Voire Figure (I.20).
L'eau chauffée dans le capteur reste ainsi dans un circuit fermé appelé « Circuit primaire ».
L'eau chauffée au contact de l'échangeur, monte au haut du réservoir, l'eau froide descend et se fait réchauffer dans le bas du réservoir.
Nous verrons à propos du gel et de l'entartrage l'intérêt qu'on peut avoir en utilisant un Échangeur.

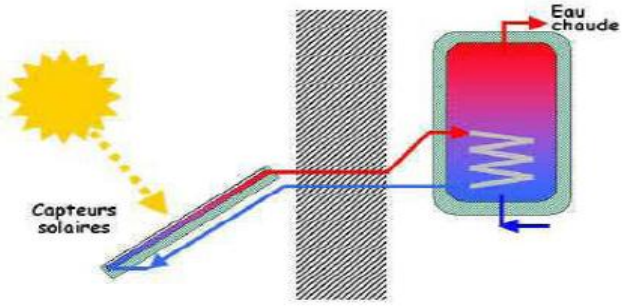


Figure I.20: Le chauffe-eau solaire en thermosiphon avec échangeur

I.9.3 Le chauffe eau solaire avec calculateur et échangeur à l'intérieur :

Le fluide circulant dans le circuit primaire (capteur - échangeur - capteur), est en général différent de l'eau stockée dans la cuve, ainsi un certain fluide caloporteur va circuler dans le Circuit primaire en absorbant de l'énergie calorifique à l'intérieur du capteur, en suite il va céder le maximum de cette énergie à travers l'échangeur à l'eau stockée dans la cuve. Voir Figure(I.21).

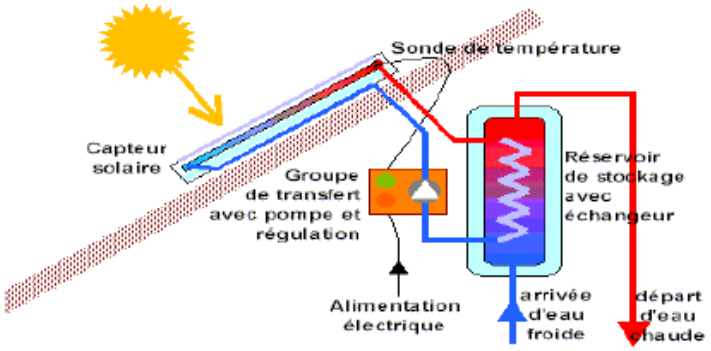


Figure I.21: le chauffe eau avec circulateur avec échangeur à l'intérieure de réservoir de stockage.

I.9.4 Le chauffe eau solaire avec circulateur et échangeur à l'extérieur de réservoir de Stockage :

Cette installation est composée de trois boucles principales dans laquelle circule de un fluide antigel comme le montre la figure (I.22).

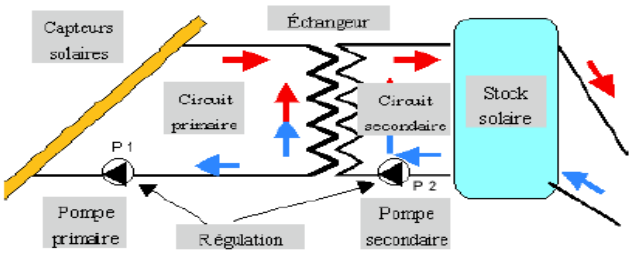


Figure I.22 : La chauffe eau avec circulateur et échangeur à l'extérieur du réservoir stockage.

I.9.4 .1 La boucle primaire :

C'est une boucle fermée entre les capteurs et l'échangeur, le fluide est chauffé dans les Capteurs solaires puis se refroidit en transmettant sa chaleur à la boucle secondaire dans L'échangeur.
La circulation se fait lorsque l'énergie solaire disponible est suffisante pour chauffer l'eau Dans les capteurs, le système de régulation pilote la marche et l'arrêt de la pompe primaire en Fonction de l'ensoleillement, capté par des sondes de température dans les circuits primaires et Secondaires.

I.9.4.2 La boucle secondaire :

C'est une boucle ouverte entre l'échangeur et le stocke solaire, c'est l'eau chaude sanitaire Qui circule dans cette boucle.
L'eau de stockage solaire est chauffée dans l'échangeur, elle se refroidit lorsqu'il y a Utilisation d'eau chaude, la température de l'eau se situe dans une fourchette un peu plus restreinte que dans la boucle primaire avec un maximum de l'ordre 90°C.
La circulation se fait lorsque la boucle primaire est en mesure de chauffer la boucle Secondaire, le système de régulation pilote la marche et l'arrêt de la pompe secondaire en Fonction des températures dans les circuits primaires et secondaires et de l'état de la pompe Primaire.
La boucle de distribution c'est une boucle ouverte, l'eau froide en provenance du réseau Pénètre dans le bas du réservoir, l'eau chaude sort par le haut.

Conclusion :

Les installations solaires peuvent être utilisées dans tous les climats pour produire de l'eau chaude, mais leurs performances annuelles sont proportionnelles à l'ensoleillement du lieu ou sont installés les capteurs solaires.

Le choix entre les types de capteurs solaires est déterminé par le type d'application Recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées.

Pour la production d'eau chaude sanitaire on choisi généralement l

Chapitre II

Le gisement solaire

Introduction

Issue de la nature, l'énergie se présente sous deux formes :
• Les énergies conventionnelles ou les énergies non renouvelables, elles sont d'origine Fossile, dont les plus connues sont : le pétrole, le charbon, le gaz et l'uranium.
• Les énergies renouvelables ou les énergies non conventionnelles, dont les plus Importantes sont : le solaire ; l'éolien, la géothermie et la biomasse.
Elles ont pour origines des sources d'énergie inépuisables grâces aux cycles naturels Telles que, le rayonnement solaire, le vent, le flux de chaleur interne de la terre, et le cycle du carbone dans la biosphère.
L'énergie solaire est la plus dominante de toutes les énergies renouvelables, elle est l'une des Plus facilement exploitables. Comme la plus part des énergies douces, elle donne à l'usager la Possibilité de subvenir sans intermédiaire à une partir de ses besoins.
La connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire Pou l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire Du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, l'irradiation globale.

1-1 **Le soleil**

Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour Les énergies conventionnelles d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont la Conséquence de la photosynthèse ; que pour les énergies non conventionnelles dites Renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie Géothermique.
L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de 14x105 km de diamètre, sa Masse est de l'ordre de 2x1030 kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments.

Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, C'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu prés égale à 4x1026w.
Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de 1,7x1017w. Elle nous Parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques ; 30% de cette puissance est Réfléchie vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le Cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau ci-dessous :

Diamètre (km)	14x105
Masse (kg)	2x1030
Surface (km2)	6.09x1012
Volume (km3)	1.41x1018
Masse volumique moyenne (kg/m3)	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	2.5x1047

Tableau II.1 : Caractéristiques principales du soleil

Le soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales (fig.**II**.1)

A/ L'intérieur, contient 40% de la masse du soleil, c'est là ou se crée l'énergie par réaction Thermonucléaire, cette région s'étend sur une épaisseur de 25x104 km. Cette Couche est divisée en trois zones, le noyau, la zone radiative et la zone convective. Le Rayonnement émis dans cette partie est totalement absorbé par les couches supérieures. La Température atteint plusieurs millions de degrés, et la pression un milliard d'atmosphères.
B/ La photosphère est une couche opaque, très mince, son épaisseur est d'environ 300 km,
Elle est responsable de la presque totalité du rayonnement qui nous parvient, c'est la partie visible du soleil. L'ordre de grandeur de la température n'y est plus que de quelques millions De degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température Dite de surface de l'ordre de 4500
C/ La chromosphère et la couronne solaire, sont des régions à faible densité ou la matière est Très diluée, elles constituent l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un Rayonnement émis très faible, bien que la température y très élevée (un million de degrés),

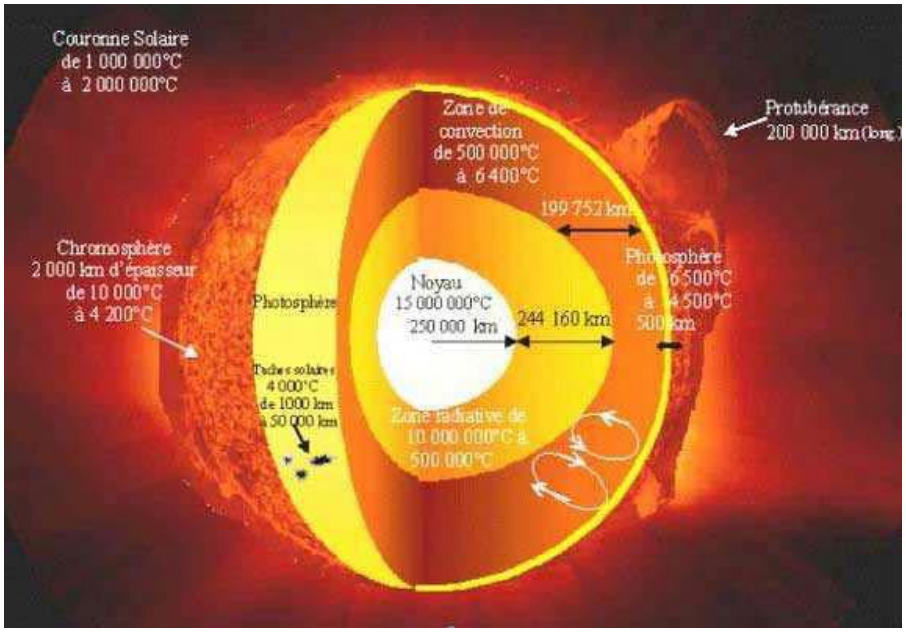


Figure II.1 -Structure du soleil

II.2 Le mouvement de la terre :

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses Foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette Ellipse est appelé l'écliptique.
C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 million De km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est La plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés Respectivement équinoxes de printemps et équinoxe d'automne. Aux équinoxes le jour et la
Nuit sont égaux.
En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un Axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à L'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est Pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé inclinaison égale à 23°27'.

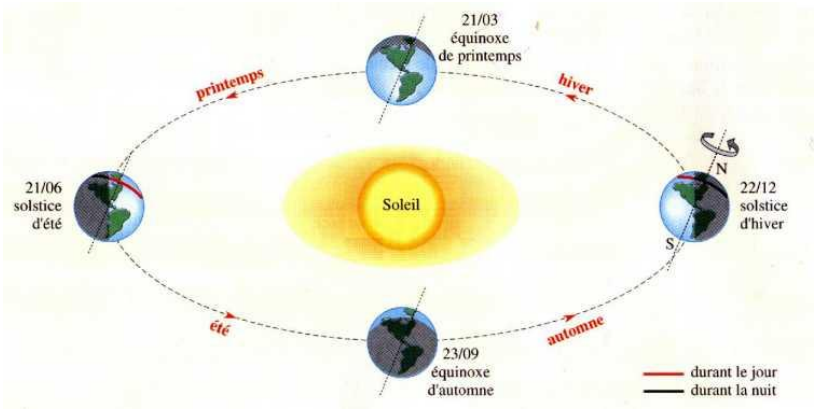


Figure II.2- Mouvement de la terre autour du soleil

II.2.1 SPHERE CELESTE :

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps.

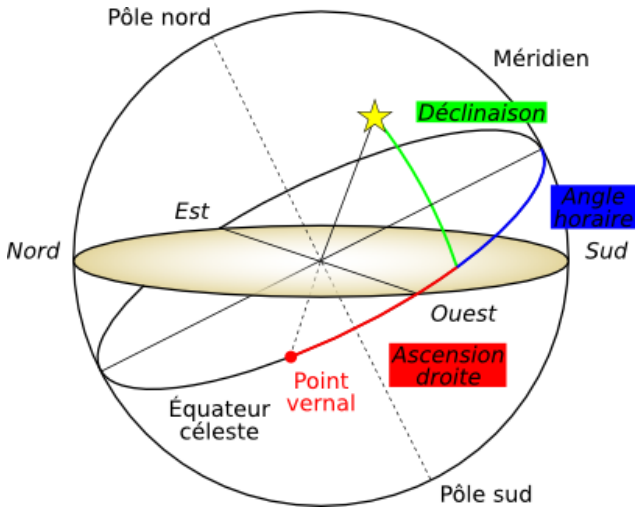


Figure II-3 -La sphère céleste

II.3. COORDONNEES CELESTES :

II.3.1 COORDONNEES GEOGRPHIQUES :

Sont des coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre **(**fig II.4)

A- La longitude (L) : est comptée positivement de 0 à +180° vers lest et négativement de 0 à -180° Vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

b-La latitude (Φ) : permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le nord et négativement de 0 à -90° vers le sud.

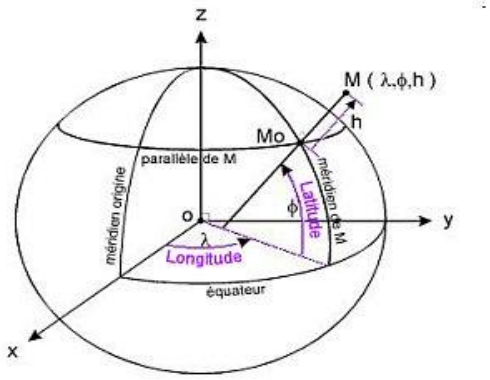


Figure II.4-Repère de coordonnées horaires

II.3.2COORDONNEES HORAIRES :

A-L'angle horaire (ω):est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe .Elle est comptée positivement dans le sens rétrograde de 0 à +360°, une heure sidérale vaut donc 15° d'angle et ω=0° (12h:00) au méridien de Greenwich.

b-La déclinaison (δ) :c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle est varie au cours de l'année de +23°27' à -23°27'et détermine l'inégalité des durées des jours. δ est donnée par la relation suivante :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(N + 284)\right) \qquad \text{(II.1)}$$

N : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1ère janvier (1 à 366).

Elle est comptée positivement de 0 à +90° de (E) vers P (pole boréal) , et négativement de 0 à -90° de (E) vers P' (pole austral).

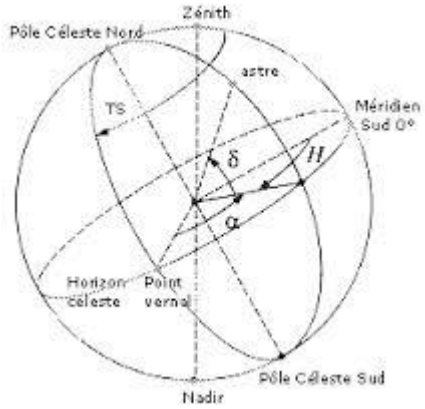


Figure II. 5- les cordonnée horaire

II.3.3.3 COORDONNEES HORIZONTALES :

a. La hauteur (h):est l'angle entre la direction du soleil et sa projection .Elle est comptée Positivement de 0 à +90° vers le zénith et négativement de 0 à -90° vers le nadir.

b. L'azimut (a) : est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud**.** On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est.

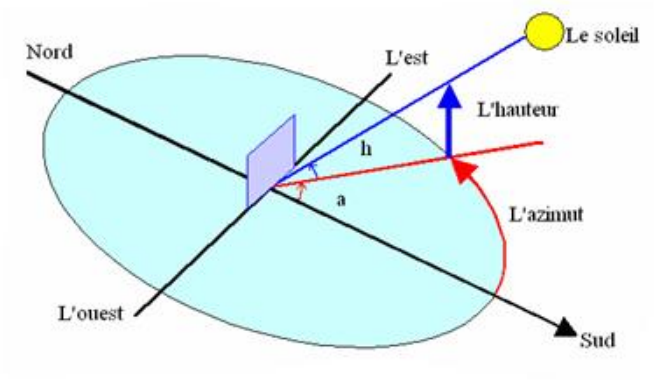


Figure II.6-Les coordonné horizontales

II.4. TEMPS SOLAIRES :

II.4.1. TEMPS SOLAIRE VRAIS (TSV) :

Le temps solaire vrais, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil, ce temps est indiqué par les cadrans solaires et les héliographes, Il est donné par la relation suivante

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \qquad \text{(II-2)}$$

II.4.2. LE TEMPS SOLAIRE MOYEN (TSM) :

Le temps solaire moyen est appelé parfois temps local, Il est donné par la relation suivante :

$$TSM = TSV - Et \qquad \text{(II.3)}$$

Où :

$$Et = 9.87\sin\left[2.\frac{360}{365}(N-81)\right] - 7.53\cos\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] - 1.5\sin\left[\frac{360}{365}(N-81)\right] \qquad \text{(II.4)}$$

Et : est l'équation du temps exprimée en minutes.

N: est le numéro du jour dans l'année

II.4.3. LE TEMPS CIVIL :

Le temps civil est le temps moyen avec l'origine à minuit

II.4.4. TEMPS UNIVERSEL (TU) :

Le temps universel est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine), appelé encore GMT (Greenwich Mean Time). Est donné par la relation suivante **:**

$$TU=TSM-\frac{L}{15} \qquad (II.5)$$

Où : L est la longitude .Tel que :

L < 0 : Pour les sites situés à l'Est de Greenwich.

L > 0 : Pour les sites situés à l'Ouest de Greenwich.

L = 0 : Pour les sites situés au méridien de Greenwich

II.4.5. TEMPS LEGAL (TL) :

Le temps légal est une heure liée au TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude et des coutumes de chaque pays. Est donné par la relation suivante [3,25] :

$$TL=TU+DH \qquad (II.6)$$

Où : ΔH : Est le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considérée

II.5. ESTIMATION HORAIRE DE L'ENSOLEILLEMENT :

II.5.1. CONSTANTE SOLAIRE :

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre - Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 W/m^2 par C. FROHLICH et C. WEHRLI du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 FROHLICH, 1978 : sept séries de mesures effectuées par des radiomètres installés sur des fusées ou des ballons stratosphériques et une série de mesures effectuées par un radiomètre embarqué sur un satellite. Cette valeur de la constante solaire a été adoptée par la Commission des instruments et des méthodes d'observation (CIMO) de l'Organisation météorologique mondiale (OMM) en octobre 1981 .

La relation ci-dessous donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$I_c = I_0[1 + 0.0034\cos(30(m-1)+N)] \qquad (II.7)$$

Où : I_0 = 1367 W/m^2

m : Le numéro du mois dans l'année.

N : Le numéro du jour dans le mois.

II.5.2. REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE :

Le rayonnement solaire est affaibli par la réflexion, les diffusions multiples et l'absorption par les particules de poussière et les molécules de gaz. Le rayonnement solaire est ainsi divisé en deux composantes:

$$I_{G=}I_D+I_d \qquad \text{(II.8)}$$

Où :

I_G : est le rayonnement solaire global.

I_D : est le rayonnement solaire direct.

I_d : est le rayonnement solaire diffus

a. le rayonnement direct :

c'est-à-dire la part du rayonnement qui traverse l'atmosphère sans rencontrer d'obstacles.
La relation suivante donne l'expression du rayonnement solaire direct

$$I_{D=}I_{C*}a.\cos i.EXP\left[-\frac{b}{\sin h}\right] \qquad \text{(II.9)}$$

Tel que : a et b sont des coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

	Conditions normales	Ciel dégagé et très pur	Zone industrielle
a	0.88	0.87	0.91
b	0.26	0.17	0.43

Tableau (II.2) : coefficients de trouble du ciel

b. le rayonnement diffus:

c'est-à-dire la part du rayonnement solaire qui est réfléchie ou absorbée par les particules de poussière et les molécules de gaz et atteint la surface de la terre dans tous les sens.
La relation suivante donne l'expression du rayonnement solaire diffus :

$$I_{d=}\alpha_0\frac{1+\cos\beta}{2}+\rho(I_0\sin h+\alpha_0)\frac{1-\cos\beta}{2} \qquad \text{(II.10)}$$

$$\boldsymbol{\alpha_{0=}}I_C\sin h\left[0.27-0.2939Exp\left[-\frac{b}{\sin h}\right]\right] \qquad \text{(II.11)}$$

ρ : Est l'albédo du sol, dont les valeurs sont données dans le tableau suivant :

Nature du sol	Albédo
Neige fraîche	0.50 à 0.70
Sol rocheux	0.15 à 0.25
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Foret	0.06 à 0.20
Etendue d'eau	0.05
Neige ancienne	0.8 à 0.9

Tableau (II.3) : Albédo typique de différents types de surfaces

c. Le rayonnement global:

est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du
Soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du Rayonnement diffus. La figure II.7 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement Global G, sont reliés par la relation suivante :

$$G = I \cdot \sin(h) + D \qquad \text{(II.12)}$$

Où h est la hauteur du soleil

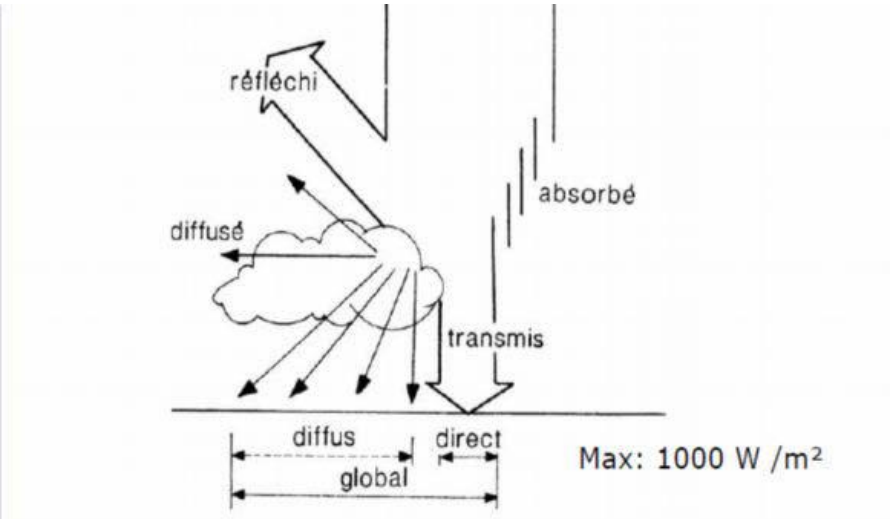


Figure II.7- Rayonnement direct, diffus et global

II.6. Le gisement solaire en Algérie:

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

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le Montre la figure II.8

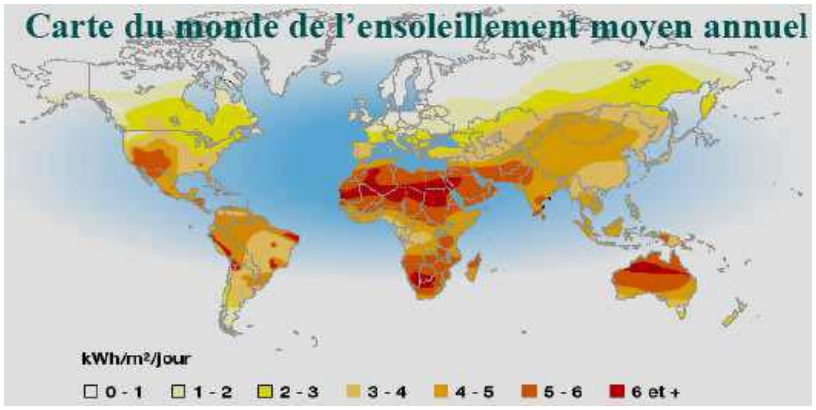


Figure II.8 Carte du monde de l'ensoleillent moyen annuel

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TW h/an pour le solaire thermique, 13,9 TW h/an pour le solaire photovoltaïque. Le Potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient Été découverts à H Assi R 'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au Niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 1.2 selon l'ensoleillement reçu annuellement :

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moye. d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m2/an)	1700	1900	26500

Tableau II.4 Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

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

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute L'Algérie (figure II.9) .

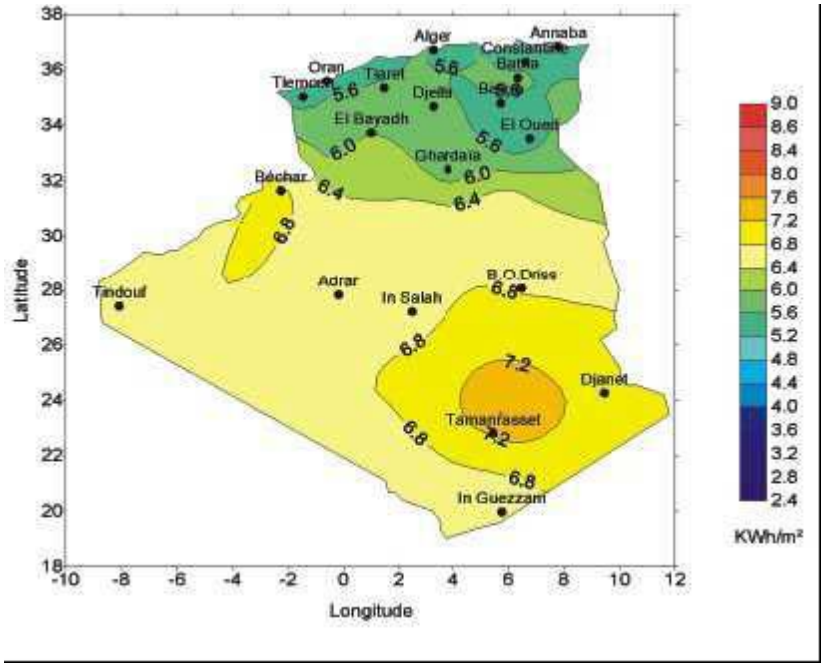


Figure II.9 Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à La latitude du lieu

Conclusion:

L'étude du rayonnement solaire s'avère nécessaire pour le choix du meilleur site en vue D'une installation d'un système de captation solaire.

Le rayonnement reçu par un capteur solaire dépend également du niveau d'ensoleillement Du site considéré et de son orientation par rapport au soleil.

Un capteur solaire fixe reçoit le maximum d'énergie lorsqu' il est orienté vers le sud et est Incliné selon un angle pratiquement égal à la latitude du lieu. Par exemple les capteurs Installés à Constantine sont inclinés de 37 °).

Pour que le rayonnement solaire soit perpendiculaire au panneau solaire, et afin d'optimiser Tout le système de captation, il est nécessaire de recourir à la technique de poursuite du Soleil.

Chapitre III

Modèle mathématique

III.1 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.

III.1.1 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 :

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

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

Avec :

Q_{cd} : le flux de chaleur par conduction (W).
S : Aire de la section de passage du flux de chaleur (m^2).
λ : La conductivité thermique (W/m °C).
x: Variable d'espace dans la direction du flux (m).

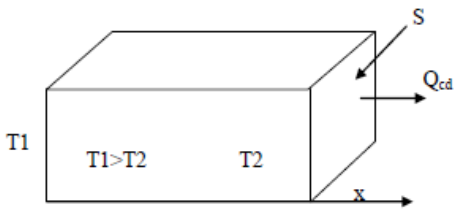


Figure III.1 : Schéma du transfert de chaleur par conduction.

III.1.2 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 :

III.1.2.1 La 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.

III.1.2.2 La 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 :

$$Q_{cv} = h\,c.\ S.\ (Tp - T\infty)$$

Avec:
Q_{cv}: le flux de chaleur par convection (W).
S : La surface de transmission de chaleur (m2).
T_p : La température de surface de solide (°C).
$T\infty$: La température du fluide avant son contact avec le solide (°C).
h_c : Le coefficient de transmission thermique par convection (W/m2.°C)

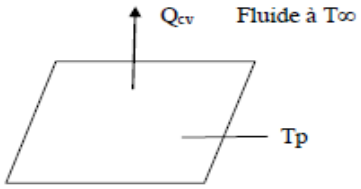


Figure III.2 : Schéma du transfert de chaleur par convection.

III.1.2.3 Calcule le coefficient d'échange par convection :

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 :
U_m vitesse moyenne du fluide.
ρ masse volumique du fluide.
Cp chaleur spécifique du fluide.
μ viscosité thermique du fluide.
λ conductivité thermique du fluide.
D dimension caractéristique de la surface d'échange.
A partir de ces grandeurs, on définit les nombres sans dimension suivants :

$$Nu = hc\frac{D}{\lambda}$$ nombre de Nusselt

$$Re = \frac{\rho.Um.D}{\square}$$ nombre de Reynolds

$$Pr = \frac{\mu.Cp}{\rho}$$ nombre de Prandt

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 :

$$h = Nu.\frac{D}{\lambda} \qquad \text{(III.4)}$$

Re : le nombre de Reynolds caractérise le régime d'écoulement du fluide.
Pr : le nombre de Prandtl caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.
Nu : le nombre de Nusselt caractérise l'échange thermique entre le fluide et la paroi.

En convection naturelle :

Dans la convection naturelle, le mouvement du fluide est du aux variations de la masse volumique du fluide provenant des échanges de chaleur entre le fluide et la paroi. Le fluide est mis en mouvement sous l'effet des forces d'Archimède car sa masse volumique est onction de sa température.
La convection forcée est négligeable si
$Gr/Pr^2 > 100$.

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

Convection laminaire Gr Pr < 109 => n=1/4.

Convection turbulente Gr Pr > 109 =>n=1/3.

III.1.3 Le 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 :

$$Q = \varepsilon .\ \sigma\ .S.\ (\ \ T_p{}^4 - T\infty^4\ ) \qquad \text{(III.5)}$$

Q_r : densité de flux de chaleur émis par le corps.
ε : émissivité thermique du matériau.
σ: constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5{,}6.10^{-8} W/m m^{-2} K^{-4}$
T_p : Température de la surface.
T∞ : Température du milieu environnant la surface
S : Aire de la surface (m^2)

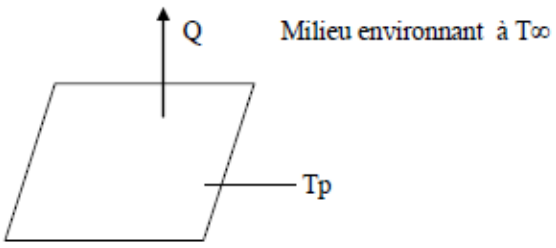


Figure III.3 : Schéma du transfert de chaleur radiatif.

III.2 Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire :

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement (figure III.4).

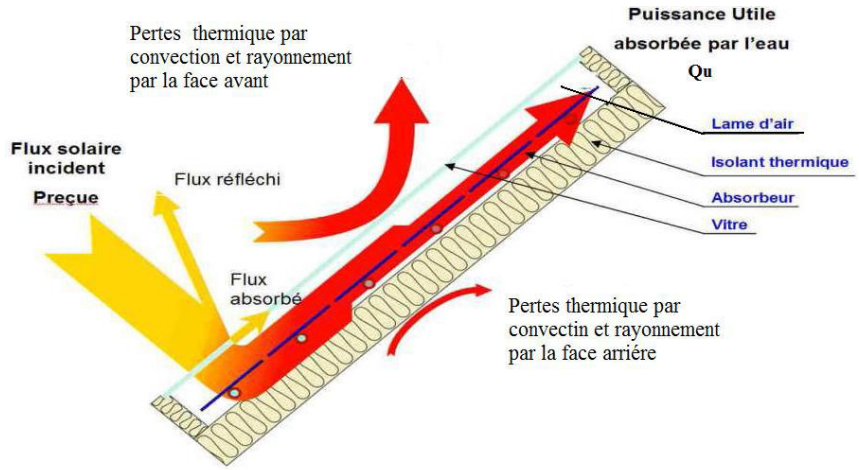


Figure III.4 Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré.

III.2.1 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 (Qv) qui sera absorbé par la vitre mais avec peu d'importance.

$$Q_v = \alpha_v . Sv . G \qquad \text{(III.6)}$$

α_v : coefficient d'absorption de la vitre.
Sv: surface de la vitre (m^2).
G: Le rayonnement global.

➢ Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant est donné par l'équation (III.7).

$$Q_{cvam} = h_{cvam.} Sv . (Tv - Tam) \qquad \text{(III.7)}$$

Tam : La température ambiante (°K).
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/ m2 °K).
On pourra utiliser la corrélation de Hottel et Woertz.

$$h_{cvam} = 5.67 + 3.86 . V \qquad \text{(III.8)}$$

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 (III.9)

$$Q_{rvc} = h_{rvc} .Sv . (Tv - T\ ciel) \qquad \text{(III.9)}$$

T_{ciel}: La température de ceil (°K).

h_{rvc} : coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et ciel (W/ m2°K).

$$h_{rvc} = \varepsilon v . \sigma . (Tciel - Tv) . (Tv^2 + Tciel^2) \qquad \text{(III.10)}$$

$$Tciel = 0.0552 . Tam^{1.5} \qquad \text{(III.11)}$$

III.2.2 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 (III.12).

$$Q_{cabv} = Sab.\, h_{cabv}\,.\,(Tab - Tv) \qquad \text{(III.12)}$$

Tab: La temperature de l'absorbeur (°K).
Sab : La surface de l'absorbeur (m^2)
h_{cabv} : Le coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur (W/m2°K).

$$h_{cabv} = Nu\,\frac{kair}{b} \qquad \text{(III.13)}$$

$$Nu = 1 + 1.44\left(1 - \frac{1708(1.8.\sin\beta)^{1.6}}{Ra.\cos(\beta)}\right)\left(1 - \frac{1708}{Ra.\cos(\beta)}\right) + \left(\frac{Ra.\cos(\beta)}{5830}\right)^{0.666} - 1 \qquad \text{(III.14)}$$

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.K).
β : inclinaison du capteur (rad).

➢ Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage est donné par L'équation (III.15)

$$Q_{rabv} = Sab.h_{rabv}.(Tab - Tv) \qquad \text{(III.15)}$$

$$h_{rabv} = \frac{\sigma.(Tab + Tv).(Tab^2 + Tv^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon ab}\right) + \left(\frac{1}{\varepsilon v}\right) - 1} \qquad \text{(III.16)}$$

εab, εv : sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.
σ : constante de Stéphane Boltzman σ = 5.67 10^{-8}W/m^2k^4.

➢ Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par l'équation (III.17).

$$Q_{cabi} = \frac{(Tab - Ti)}{\left(\frac{Lab}{Sabi.\lambda i}\right) + \left(\frac{Li}{Sabi.\lambda ab}\right)} + \frac{(Tab - Ti)}{\left(\frac{Lab}{Sabil.\lambda il}\right) + \left(\frac{Lil}{Sabil.\lambda ab}\right)} \qquad \text{(III.17)}$$

Ti: température de l'isolant (°K).
Sabi : surface de contacte absorbeur isolant pour la face avant (m^2).
Sabil : surface de contacte absorbeur isolant pour la face latérale (m^2).
λi: conductivité thermique de l'isolant (laine de roche). (W m^{-1} °K^{-1}).
λil : conductivité thermique de l'isolant. (Laine de verre). (W m^{-1} °K^{-1}).

λab : conductivité thermique de l'absorbeur (W m^{-1} °K^{-1}).
Lab. : épaisseur de l'absorbeur (m).
Li: épaisseur de l'isolant (laine de roche) (m).
Lil: épaisseur de l'isolant latéral (laine de verre) (m).

➢ Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau) est donné par l'équation (III.18)

$$Q_{cabf} = h_{cab}.Sabf.(Tab - Tf) \qquad \text{(III.18)}$$

Tf: température du fluide caloporteur (°K).
Sabf: surface de contacte absorbeur fluide caloporteur (m^2).
$h_{c\,abf}$: coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (W/ m2 °K).

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.

$$Nu = \frac{\Omega}{8}\left(\frac{(Re-10^3).Pr}{1+12.7\left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5}(Pr^{2/3}-1)}\right)\left(1+\left(\frac{di}{L}\right)^{2/3}\right) \qquad \text{(III.19)}$$

Ω: coefficient de Darcy.
Pr: nombre de Prandtl.
Re: nombre de Reynolds.
di: 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:

$$Re = \rho\frac{DV}{\mu} \qquad \text{(III.20)}$$

D: diamètre du tube (m).
μ: viscosité dynamique de l'eau (Pas).
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 ≤ Re ≤ 10^5, on applique la formule de Blasius :

$$\Omega = 0.3164Re^{-0.25} \qquad \text{(III.21)}$$

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

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 Re^{-0.3} \qquad \text{(III.22)}$$

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

$$h_{cabf} = Nu \frac{\lambda eau}{di} \qquad \text{(III.23)}$$

λeau : conductivité thermique de l'eau (W m^{-1} °K^{-1})
d : diamètre du tube intérieur (m).

- Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur est donné par (III.24) :

$$Q_{ab} = \alpha_{ab} . \tau_v . Sab . G \qquad \text{(III.24)}$$

α_{ab} : coefficient d'absorption de l'absorbeur.
τ_v coefficient de transmission de la vitre.
G: éclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan. (W/m^2).

III.2.3 Bilan thermique du capteur solaire plan en régime transitoire :

Le bilan total qui donne le comportement thermique du capteur, et qui fourni les températures moyennes de l'absorbeur, la vitre et le fluide caloporteur, est donné par le système d'équations différentielles ordinaires non linéaires suivant:

- **Vitre**

$$mv.Cv \frac{dTv}{dt} = \alpha_v . Sv.G + Sab(h_{cabv} + h_{rabv})(Tab - Tv) - h_{cvam} . Sv(Tv - Tam) - h_{rvc} . Sv(Tv - Tciel)$$

(III.25)

- **Absorbeur**

$$mab.Cab \frac{dTab}{dt} = \alpha_{ab} . \tau_v . Sab.G - Sab(h_{cabv} + h_{rabv})(Tab - Tv) - (\psi 1 + \psi 2)(Tab - Ti) -$$

$$h_{cabf} . Sabf \quad (Tab - Tf) \qquad \text{(III.26)}$$

- **Fluide caloporteur**

$$mf.Cf \frac{dTf}{dt} = h_{cabf} . Sabf (Tab - Tf) = Qu \qquad \text{(III.27)}$$

$$\psi 1 = \frac{1}{\left(\frac{Lab}{Sabi.\lambda i}\right)+\left(\frac{Li}{Sabi.\lambda ab}\right)} \qquad \psi 2 = \frac{1}{\left(\frac{Lab}{SabiL.\lambda il}\right)+\left(\frac{Lil}{SabiL.\lambda ab}\right)} \qquad \text{(III.28)}$$

Avec :
mv, mab, mf: masses respectives de la vitre, l'absorbeur et de fluide. Cv, Cab, Cf. : chaleurs massiques respectivement de la vitre, l'absorbeur et le fluide caloporteur.

III.3 Perte globale d'énergie :

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 défini:

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.

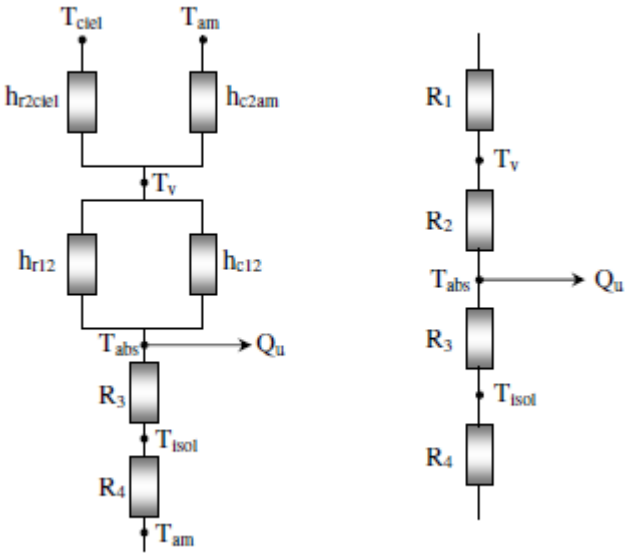


Figure: III.5: Circuit électrique équivalant relative à un capteur solaire plan.

III.3.1 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:

$$U_{av} = \frac{1}{R_1 + R_2}$$

$$Uav = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_{rvc} + h_{rvam}}\right) + \left(\frac{1}{h_{cabv} + h_{rabv}}\right)} \quad \text{(III.29)}$$

III.3.2 Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur :

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

$$Uarr = \frac{Kisol}{Eisol} \quad \text{(III.30)}$$

Kisol: coefficient de conductivité thermique de l'isolant (W/ °K m).
Eisol: épaisseur de l'isolant (m).

III.3.3 Coefficient de pertes thermiques latérales :

La valeur de ce coefficient est inférieure à celle du coefficient de pertes arrière, vue que la surface latérale du capteur est peu important.

$$Ulat = \left(\frac{kisol}{Eisol}\right).\left(\frac{Alat}{Ac}\right) \quad \text{(III.31)}$$

Alat : surface latérale du capteur (m^2).
Ac : surface du capteur (m^2).

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

$$UL = Uav + Uarr + Ulat \quad \text{(III.32)}$$

III.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 défini par le rapport suivant:

Puissance de sortie = Puissance captée – Pertes (III.33)

η = Puissance thermique utile par m^2 du capteur / flux solaire incident sur le plan de capteur.

$$\eta = \frac{Qu}{Ac.G} = \frac{Ac[(\alpha\tau)\text{eff}.G - UL(Tab - Tam)]}{Ac.G} \quad \text{(III.34)}$$

Qu : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W).
$\alpha\tau$: sont respectivement coefficient d'absorption de l'absorbeur et transparence de vitrage.

III.5 Bilan thermique de la cuve de stockage :

Pour calculer la température de l'eau dans la cuve de stockage, le modèle brassé est adopté. Ce dernier consiste à supposer que la température dans la cuve est uniforme. Le régime est considéré transitoire et le flux total de la chaleur perdue dans la cuve est égal à la somme des flux radiaux Qr plus le flux qui traverse les fonds bombés. La puissance récupérée par le fluide caloporteur est définie comme étant la différence entre l'énergie solaire incidente et les pertes thermiques.

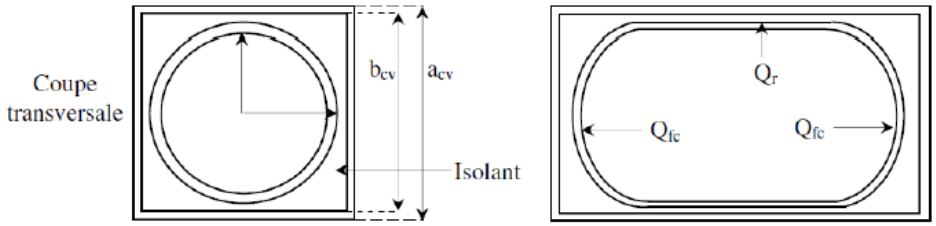


Figure: III.6: Schéma de la cuve de stockage.

$$Qu = m\,.Cp\,(Tfs - Tfe) \qquad \text{(III.35)}$$

$$Qu = Ac.Fr\,[(\tau\alpha)\,eff.\ G\text{-}UL(Tfe - Ta)\,] \qquad \text{(III.36)}$$

Avec :

Qu : le flux d'enrgie utile
τα : transparence de vitrage et coefficient d'absorption de l'absorbeur.
Ta : température de l'air extérieur
Tfe : température intérieur de fluide
Ac : surface du capteur.
m : le débit massique du fluide.
Cp : la chaleur spécifique du fluide.

Fr : facteur de conductance du capteur défini par :

$$Fr = \frac{MCp}{UL}\left[1 - \exp\left(\frac{-Fc.UL}{M.Cp}\right)\right] \qquad \text{(III.37)}$$

$$F_r = \frac{\text{Quantité de chaleur reélement extraite}}{\text{Quantité de chaleur recueillie si l'absorbeur est à la température d'entrée du fluide}}$$

M : débit surfacique (Kg/s/m^2).
Fr = quantité de chaleur réellement extraite / quantité de chaleur recueillie si l'absorbeur est à la température d'entrée du fluide.

$$Fc = \frac{1/UL}{(d+D)\left[\frac{1}{UL(d.\eta_{ail}+D)} + \frac{1}{hcab\text{f.Pm}}\right]} \qquad \text{(III.38)}$$

$$F_c = \frac{\text{Quantité de chaleur réellement extraite}}{\text{Quantité de chaleur recueillie avec un absorbeur isotherme à la température du fluide}}$$

Fc = quantité de chaleur réellement extraite / quantité de chaleur recueillie avec un absorbeur isotherme à la température du fluide
D: diamètre de tube (m).
Pm: périmètre mouillée de la section de passage (m^2)

L'efficacité de l'ailette est donnée par:

$$\eta ail = \frac{th\left(\frac{d}{2}\sqrt{\frac{UL}{\lambda ab.ep}}\right)}{\frac{d}{2}\sqrt{\frac{UL}{\lambda ab.ep}}} \qquad \text{(III.39)}$$

La température de la plaque absorbante se présente selon le normale de Beckmann par :

$$Tpm = Tfe + \frac{Qu\,(1 - Fr)}{Ac.\,UL.Fr} \qquad \text{(III.40)}$$

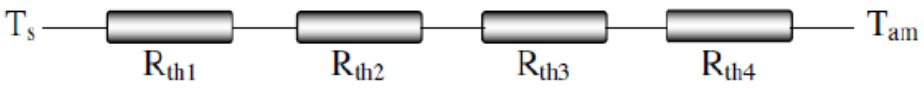
La température moyenne du fluide dans le capteur est calculée par l'équation de Klein.

$$Tfm = Tfe + \frac{Qu}{Ac.UL.Fr}\left(1 - \frac{Fr}{Fc}\right) \qquad \text{(III.41)}$$

$$Qt = K(Ts - Tam) = \frac{1}{Rth}(Ts - Tam) \qquad \text{(III.42)}$$

$$K = 2.\pi.r_1.Lcv\sum\frac{1}{Rthr} + 2.\pi.r_1^2\sum\frac{1}{Rthc} \qquad \text{(III.43)}$$

Ts, Tam: sont respectivement la température du stockage et la température ambiante (°K).
Rth: résistance thermique de la cuve de stockage entre le milieu ambiant et le fluide stocké.
Rthr: résistances thermiques radiales.
Rthc: résistances thermiques sur les cotés.
Pour déterminer la résistance thermique du stockage de la cuve, on utilise le schéma analogique équivalent donné ci-dessous.



$$Rth_1 = \frac{1}{2.\pi.Lcv.r_1.hcv} \qquad \text{(III.44)}$$

Lcv: longueur de la cuve (m).
r1: rayon intérieur de la cuve (m).
hcv: coefficient d'échange de la chaleur par convection, il est calculé par la relation de Nusselt dans le cas de la convection naturelle par :

$$Nu = 0.52\ (Gr.\Pr)^{0.25} \qquad \text{(III.45)}$$

$$hcv = Nu\frac{\lambda}{D} \qquad \text{(III.46)}$$

Pour un Gr compris entre 10^3 et 10^9 et un

D : diamètre du cylindre intérieur (m).

$$Rth_2 = \frac{1}{2.\pi.Lcv.\lambda ac}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \qquad \text{(III.47)}$$

r2: rayon extérieur de la virole (m).
λ ac : conductivité thermique de la virole (W m-1 °K-1).
Rth3: résistance thermique de l'isolant.

$$Rth_3 = \frac{1}{2.\pi.Lcv.\lambda isc}\ln\left(\frac{0.54.b_{cv}}{r_2}\right) \qquad \text{(III.48)}$$

λ isc: conductivité thermique de l'isolant (W m-1 °K-1).

Rth4: résistance thermique entre l'isolant et la tôle.

$$Rth_4 = \frac{0.785}{2.\pi.Lcv.\lambda t}\ln\left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}}\right) \qquad \text{(III.49)}$$

λt: conductivité thermique de la tôle. D'où :

$$K = 2.\pi.r_1.Lcv\left[\frac{1}{hcv} + \frac{r_1}{\lambda ac}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) + \frac{r_1}{\lambda isc}\ln\left(\frac{0.54b_{cv}}{r_2}\right) + \frac{0.785.r_1}{\lambda t}\ln\left(\frac{a_{cv}}{b_{cv}}\right)\right]^{-1}$$

$$+ 2.\pi.r_1^2\left[\frac{1}{hcv} + \frac{eac}{\lambda ac} + \frac{et}{\lambda t} + \frac{eisc}{\lambda isc}\right]^{-1} \qquad \text{(III .50)}$$

En égalant la variation de l'énergie stockée dans la cuve à l'énergie captée par le collecteur moins l'énergie perdue vers l'espace environne et l'énergie puisée, on peut écrire le bilan thermique de la cuve de stockage sous la forme suivante:

$$(M.Cp)_s\frac{dTs}{dt} = Ac.Fr[(\tau\alpha)\text{eff}.G - UL(Ts - Tam)] - K(Ts - Tam) - m(Ts - Tlr) \qquad \text{(III.51)}$$

eac, et, eisc: sont respectivement les épaisseurs de l'acier, du tube et de l'isolant de la cuve.
Tlr : Température de soutirage (°K).

III.6 Principe de simulation :

En régime transitoire, on va utiliser une simulation « pas à pas », qui rend compte de L'évolution des températures de tous les éléments du capteur dans le temps.

III.6.1 Le programme principal :

• La première étape :
le calcul des différents échanges thermiques indépendants de la Température, qui est : le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant et Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant

• La deuxième étape :
on choisit un intervalle de temps pour effectuer les calculs (entre 6h00 du matin et 19h00) et on calcule pour chaque pas de temps les paramètres Suivants :

- Le rayonnement solaire frappant un plan incliné.
- La puissance solaire absorbée par l'absorbeur et la vitre du capteur.
- La température ambiante et la température du ciel.

• La troisième étape :
On calcule la température ambiante, et on suppose qu'initialement les températures des différents composants du capteur sont à la température ambiante à l'exception des températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur qui sont à des températures légèrement supérieures, et on calcule pour les températures initiales

- Les propriétés thermo physiques du fluide caloporteur à savoir :

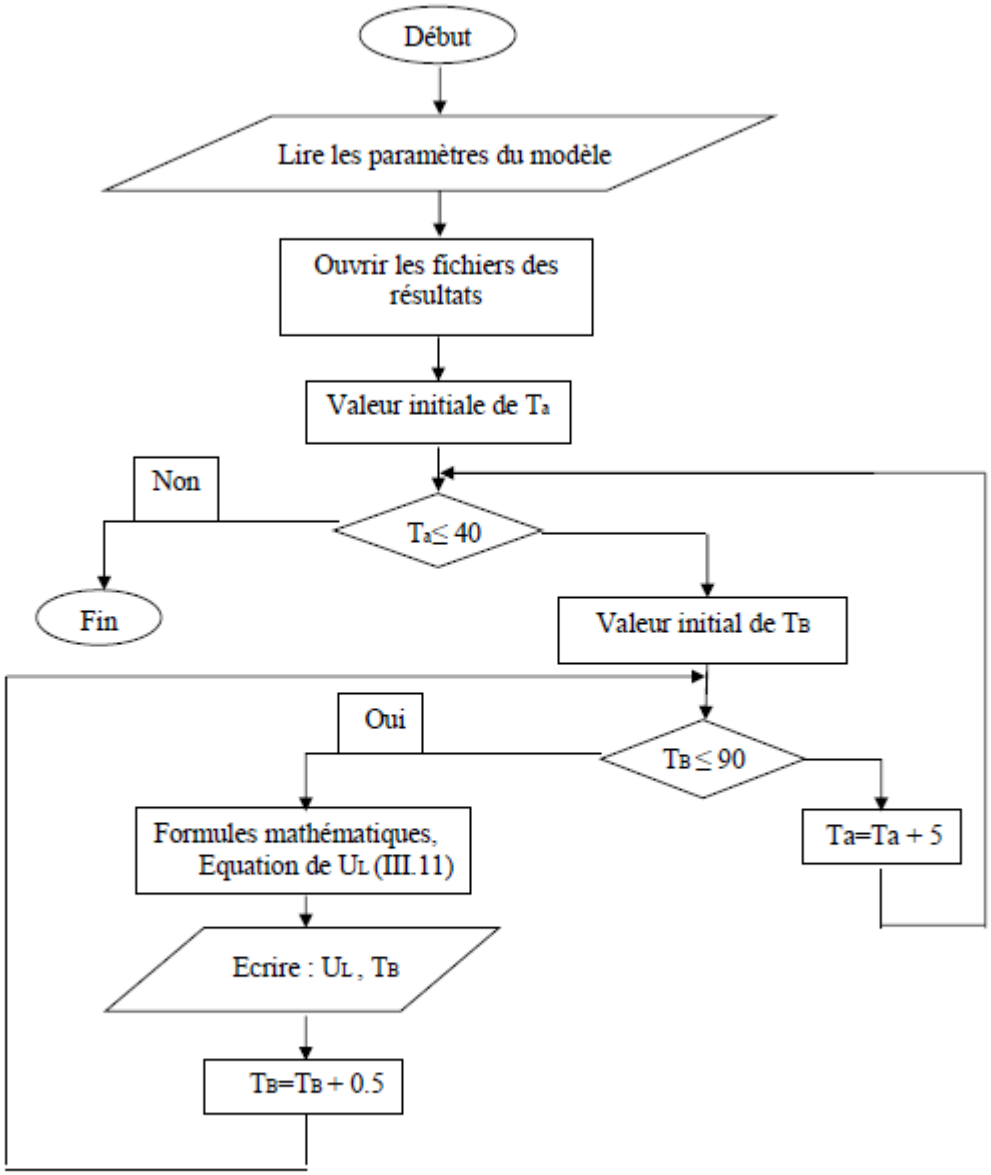
La masse volumique.
La conductivité thermique.
Diffusivité thermique.

- Les coefficients d'échange thermique, à savoir :

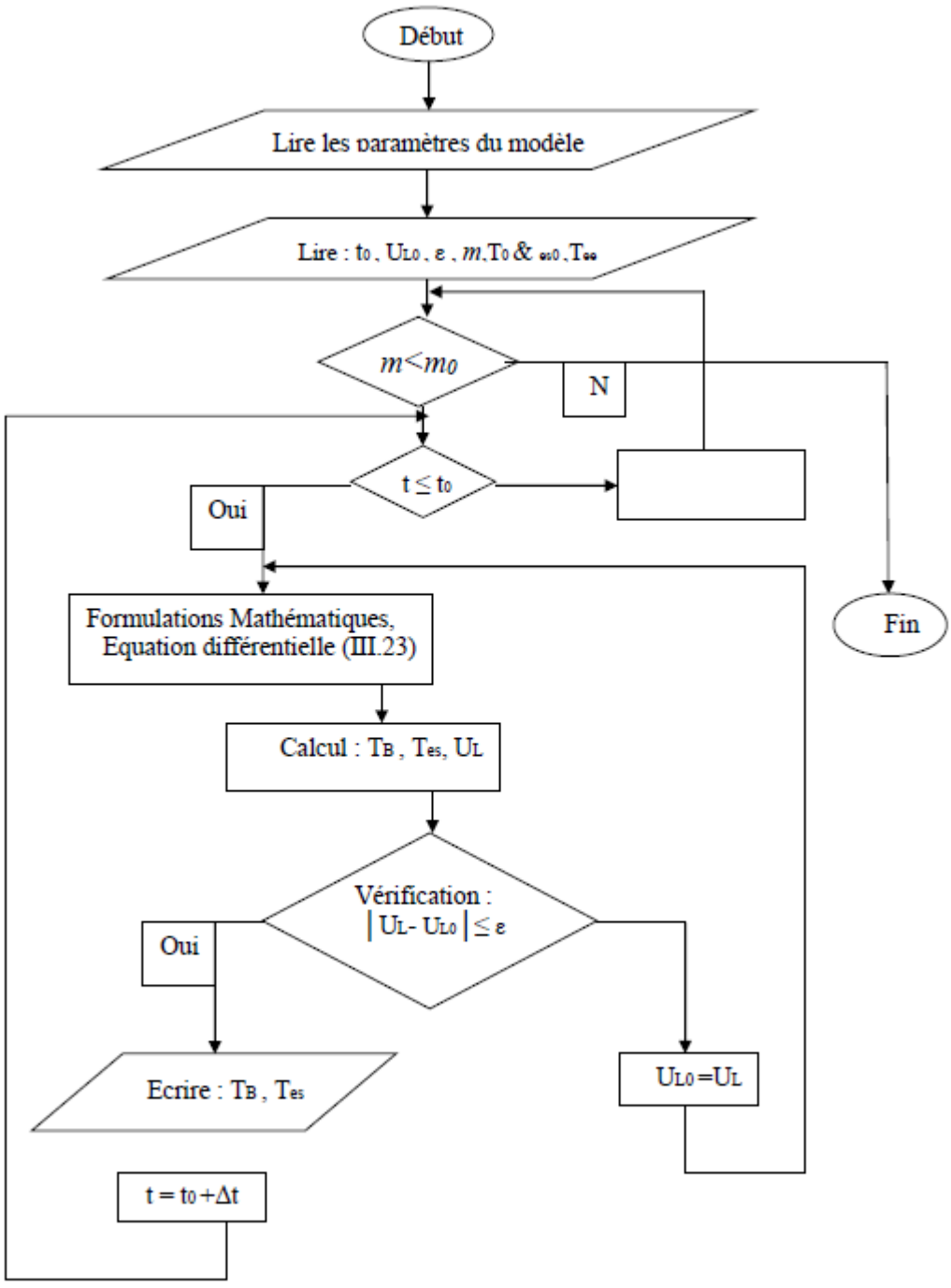
Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voute céleste.
Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.
Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur.
Le coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

• La quatrième étape : la troisième étape est reprise avec les températures obtenues.
• La cinquième étape : calcul du rendement instantané du capteur pour chaque pas de Temps.

III.6.2 L'organigramme général pour le régime transitoire :



III.6.2 Organigramme de calcul de TC, TFS et UL (EFFET DE DEBIT) :



Chapitre IV

Résultat et Interprétation

IV.1 Introduction :

Dans les chapitres précédents, on a étudie le distillateur solaire et le capteur solaire, en plus, On a élaboré un code de calcul en langage **FORTRAN**. Dans ce chapitre, on va donner les Résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des Différentes températures au cours du temps, l'ensoleillement, la production journalière, L'efficacité interne et globale.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes.

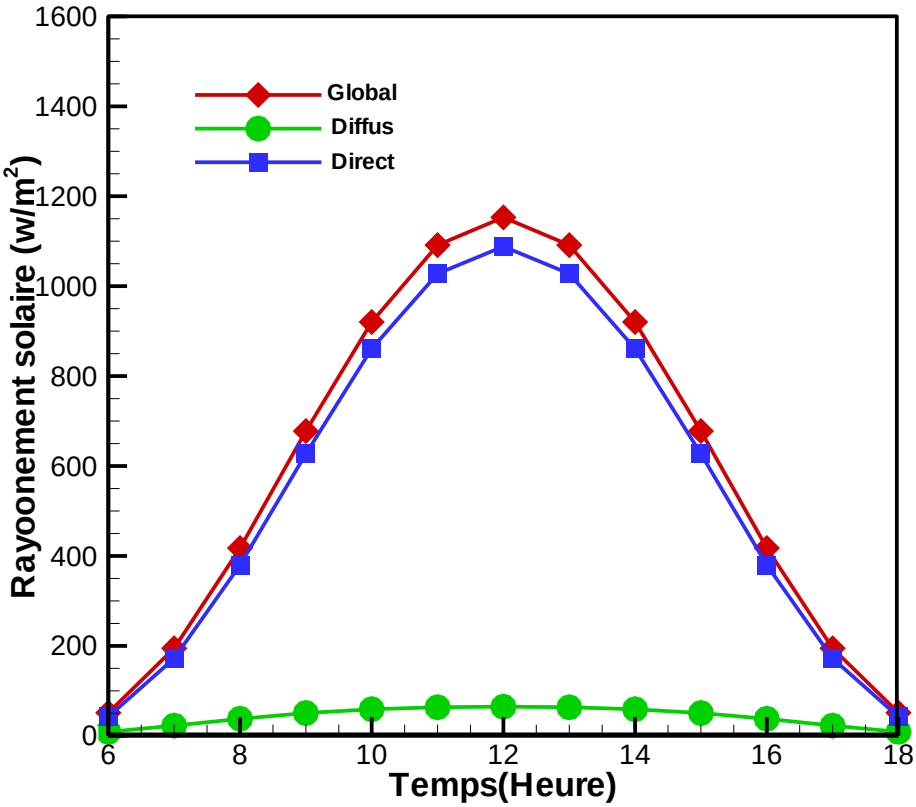
Le capteur solaire plan étudié présente les caractéristiques suivantes:

Dimensions (m)	1.205 × 1.950 × 0.105
Enveloppe	Aluminium Epaisseur 0.35 mm
Radiateur	Cuivre Nombre de tubes = 10 L=1.8 m
Absorbeur	Aluminium Surface = 2.07m^2
Isolation	Laine de verre Le fond = 50 mm Les cotés = 20 mm
Vitrage	Epaisseur = 4mm Transmissivité = 0.83

Tableau IV.1 : *Caractéristiques du capteur plan étudié.*

IV.2 L'évolution temporelle du rayonnement solaire :

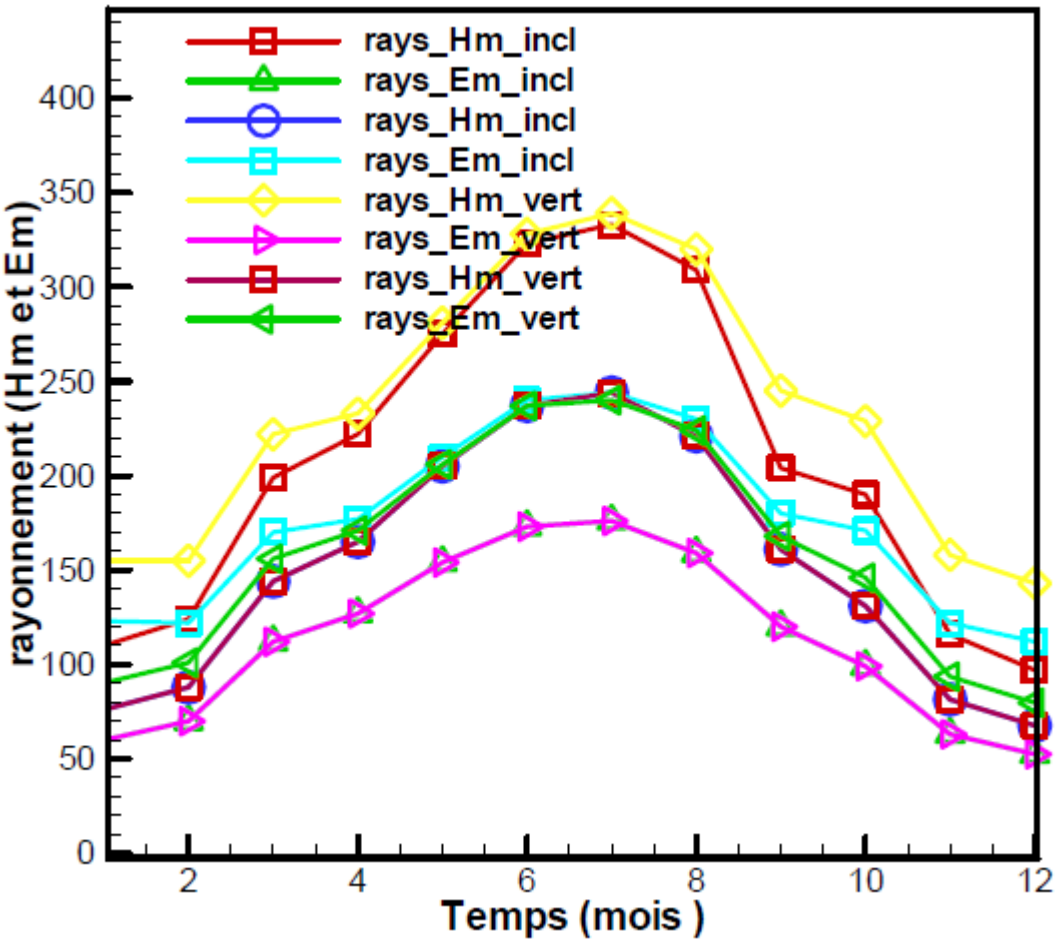
La figure IV.1 montre la variation temporelle du rayonnement solaire qui augmenté pour **a**tteindre son maximum entre 12h00 et 13h00.



/.

Figure IV.1: Variation temporelle du rayonnement solaire.

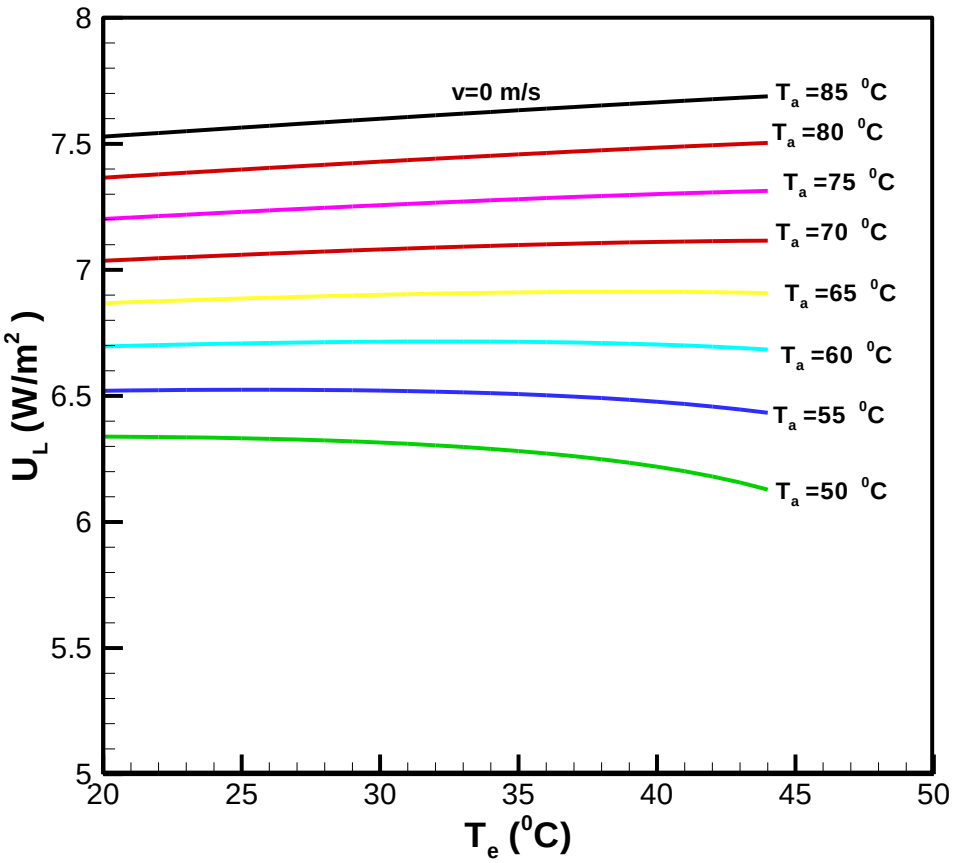
La figure (IV.2) présente l'évolution de l'éclairement global pendant l'année. La figure (IV.2) montre que la variation du rayonnement solaire en fonction du nombre de moi dans l'année présente une forme de cloche. Atteint son maximum environ du de Juillet et ces variations sont similaires à la plupart des modèles semi empiriques.



La figure (IV.2) Variation annuel des rayonnements solaire.

VI.3 Variation de coefficient des pertes thermiques :

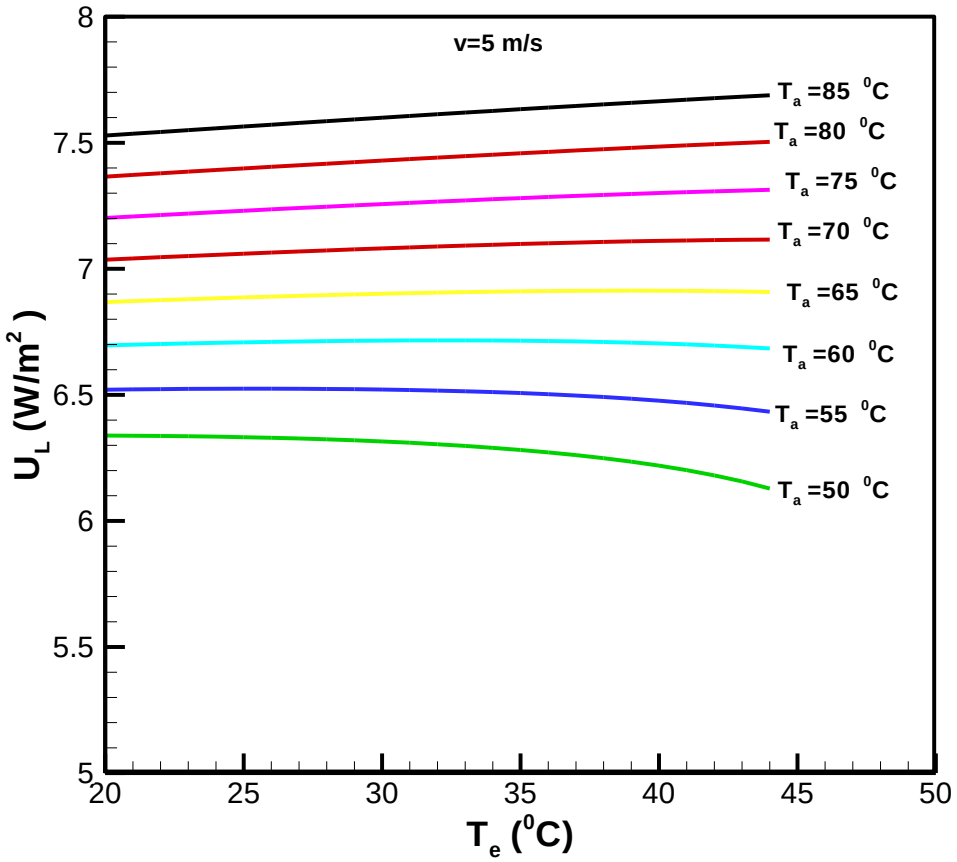
La figure (IV.3), présente l'évolution théorique du coefficient des pertes thermique UL En fonction la température de fluide du capteur sous l'effet de la vitesse du vent avec différents valeurs de la température ambiante.
Ainsi ces figures montrent que la vitesse du vent présente une grande influence sur le fonctionnement et la stabilité du capteur solaire à ne pas négligée.
On remarque dans les graphes cités qu'UL est maximum au début de l'échauffement de fluide du capteur et diminué jusqu'à un certaine Tc et après commence son évolution d'une façon lente.



La figure (IV.3) Variations théoriques de UL en fonction T_e.

VI.4 Variation des puissances (perte de chaleur):

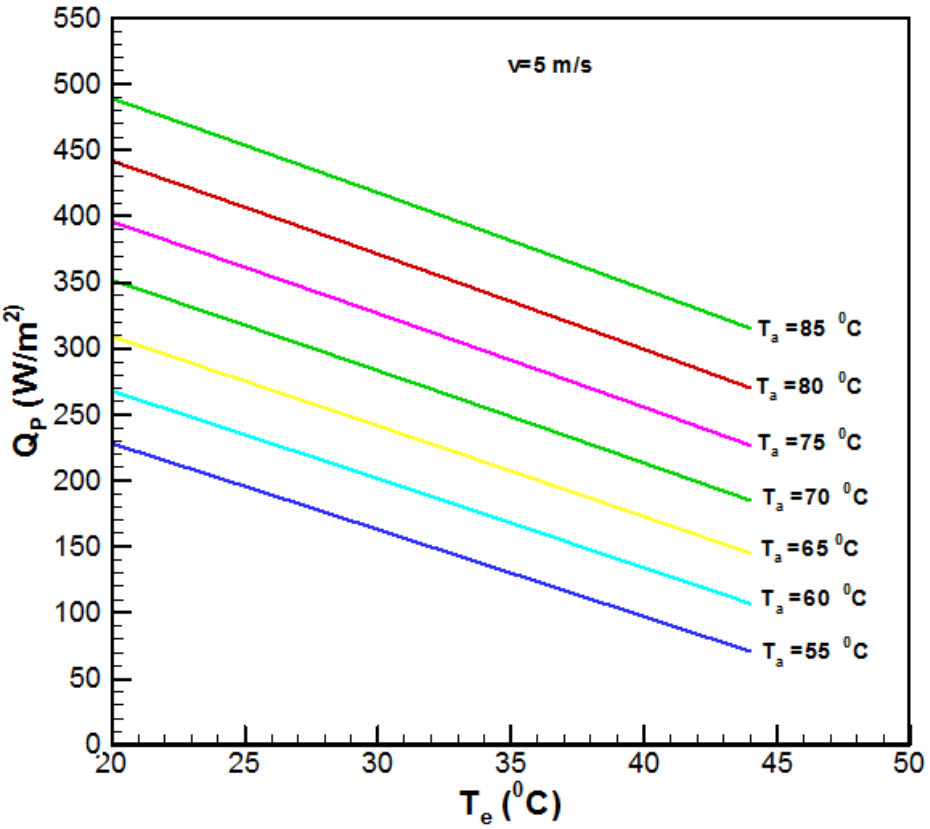
La figure (IV.4), présente l'évolution théorique du coefficient des pertes thermique UL en fonction la température de fluide, sous l'effet de la vitesse du vent avec différents valeurs de la température ambiante.
Ainsi ces figures montrent que la vitesse du vent présente une grande influence sur le fonctionnement et la stabilité du bassin solaire à ne pas négligée.



La figure (IV.4) Variations théoriques de U_L en fonction Te.

IV.5 Effet de température d'entries de fluide

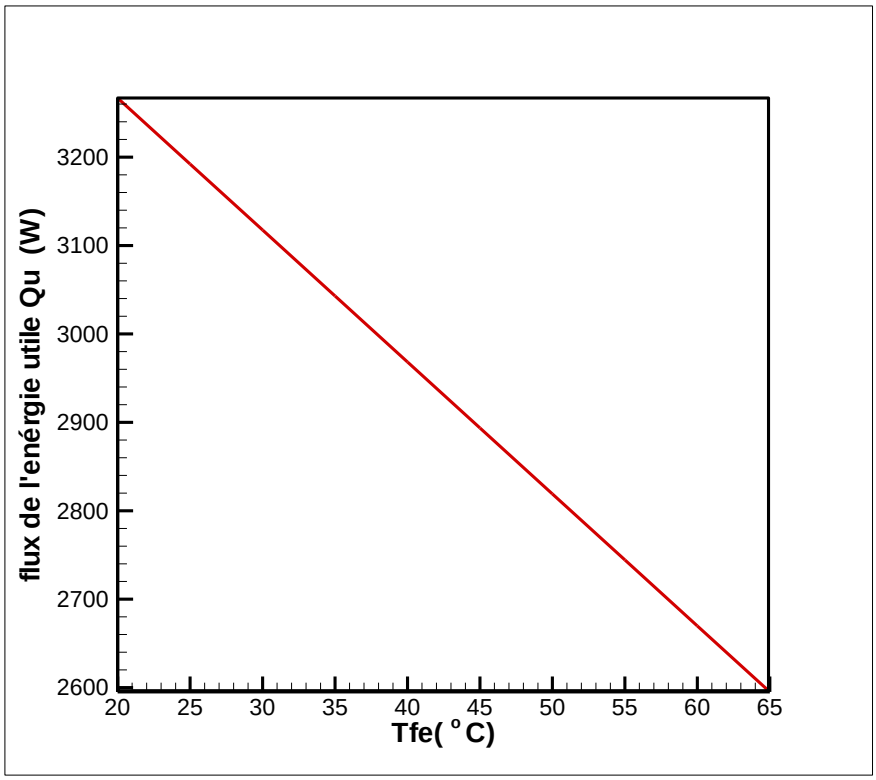
Les figures (IV.5) montrent que l'effet utile du capteur solaire est varie
Proportionnel avec la variation de débit du fluide caloporteur suivant un intervalle de
Temps donné. Ainsi que la courbe de la puissance utile présente quelques fluctuations,
Cela est dû au faite que le programme de calcule nécessite l'admission d'une valeur
Constante de vecteur de température de l'entrée,



La figure (IV.5) Variation temporelle des puissances utiles du capteur.

IV.6 Effet de température d'entrée de fluide :

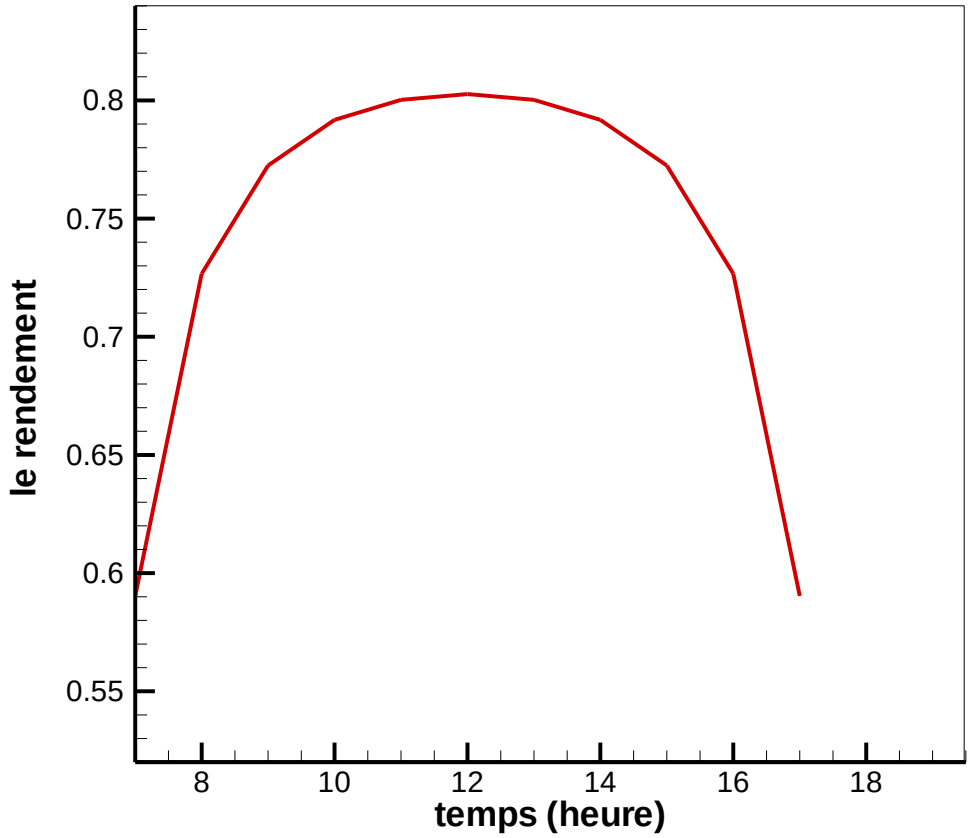
Variation de la quantité de chaleur :



La figure (IV.6) Variation temporelle de flux de l'énergie utile.

Variation temporelle du rendement instantané :

L'analyse du comportement d'un capteur au cours d'une journée (figure IV.7) montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales entre 10h00 et 12h00, bien que l'irradiation solaire commence à décroitre à partir de 13h00 global ce qui semble en bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature.



La (figure IV.7) Variation temporelle du rendement instantané.

IV.7 Effet des paramètres internes :

IV.7.1 Fluide caloporteur :

IV.7.1.2 Variation temporelle de la conductivité thermique du fluide caloporteur :

La variation temporelle de la conductivité thermique du fluide caloporteur présente la même allure que celle du rayonnement global (figure IV.7).
En fait, la conductivité thermique d'un fluide traduit sa capacité à dissiper de l'énergie quand il est déplacé de son état d'équilibre sous l'effet d'un gradient de température, c'est pour cette aison que la conductivité thermique du fluide caloporteur augmente avec l'accroissement du rayonnement global, c'est-à-dire que plus la température du fluide caloporteur augmente plus il est capable de fournir de l'énergie.

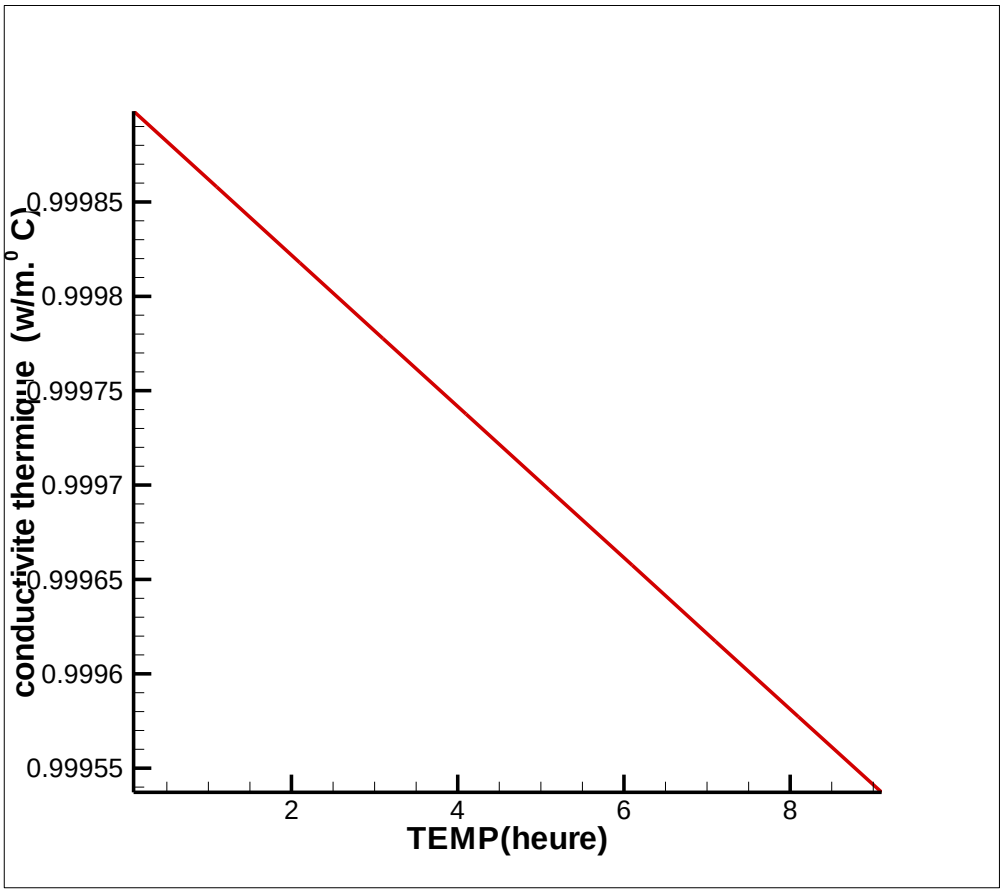


Figure IV.8: Variation temporelle de la conductivité thermique du fluide caloporteur.

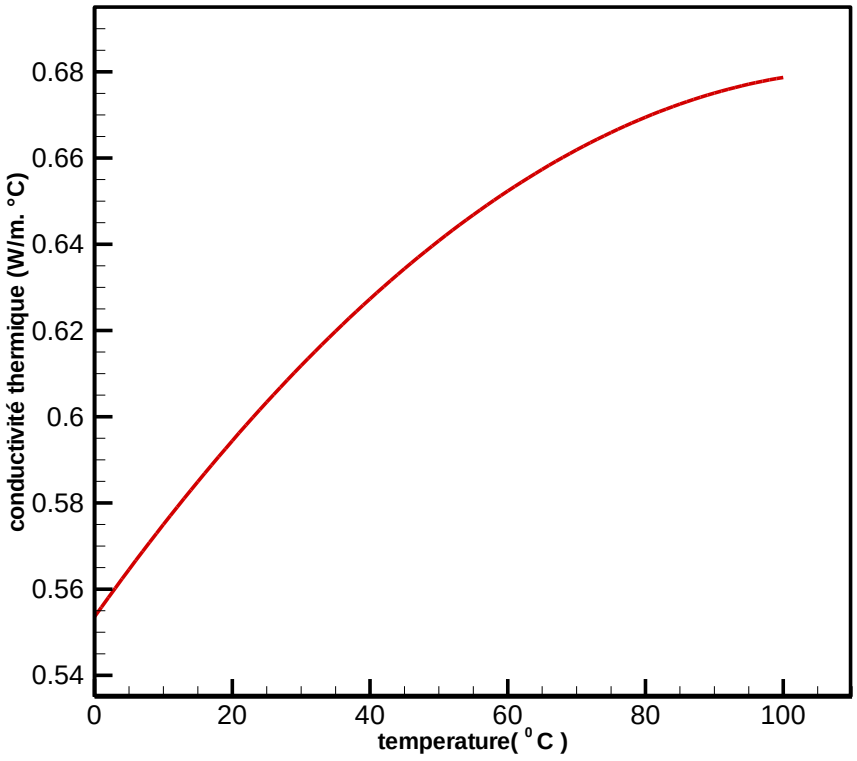


Figure IV. 9 Variation de la conductivité thermique du fluide caloporteur.

IV.7.1.3 Variation de la masse volumique du fluide caloporteur :

La courbe de la figure IV.10 illustrant la variation temporelle de la masse volumique du fluide, ceci peut être aisément expliqué par la densité du fluide qui diminue avec l'augmentation de la température du fluide.

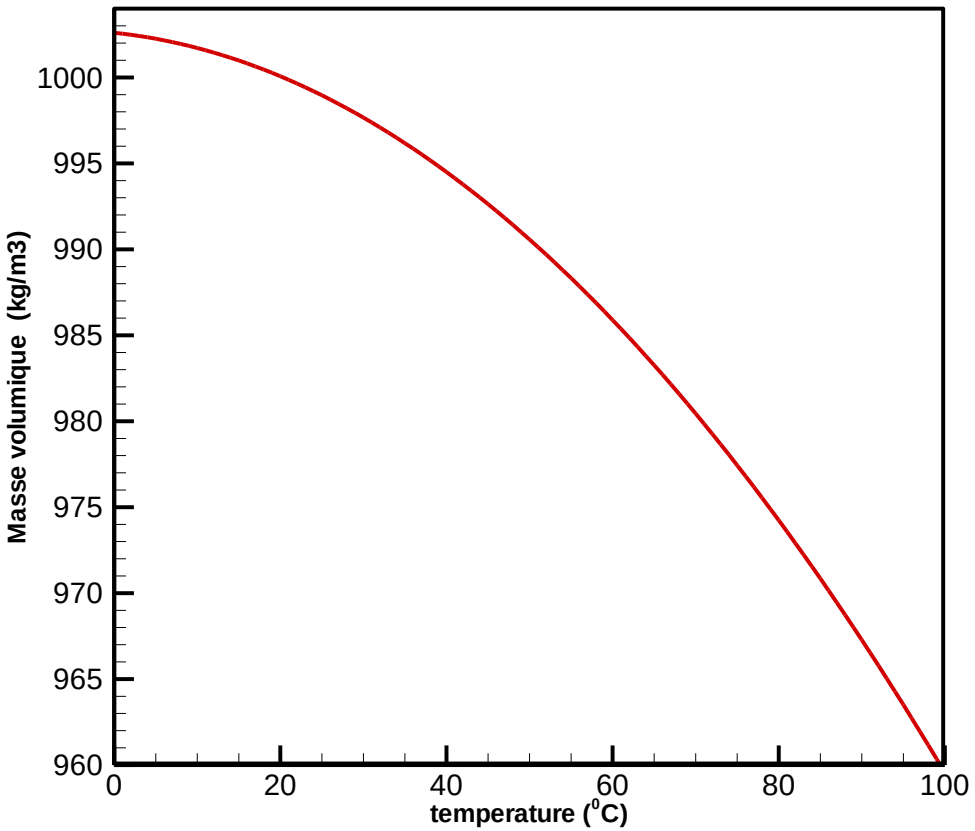


Figure IV.10 : Variation de la masse volumique du fluide caloporteur.

Variation de la Diffusivité thermique:

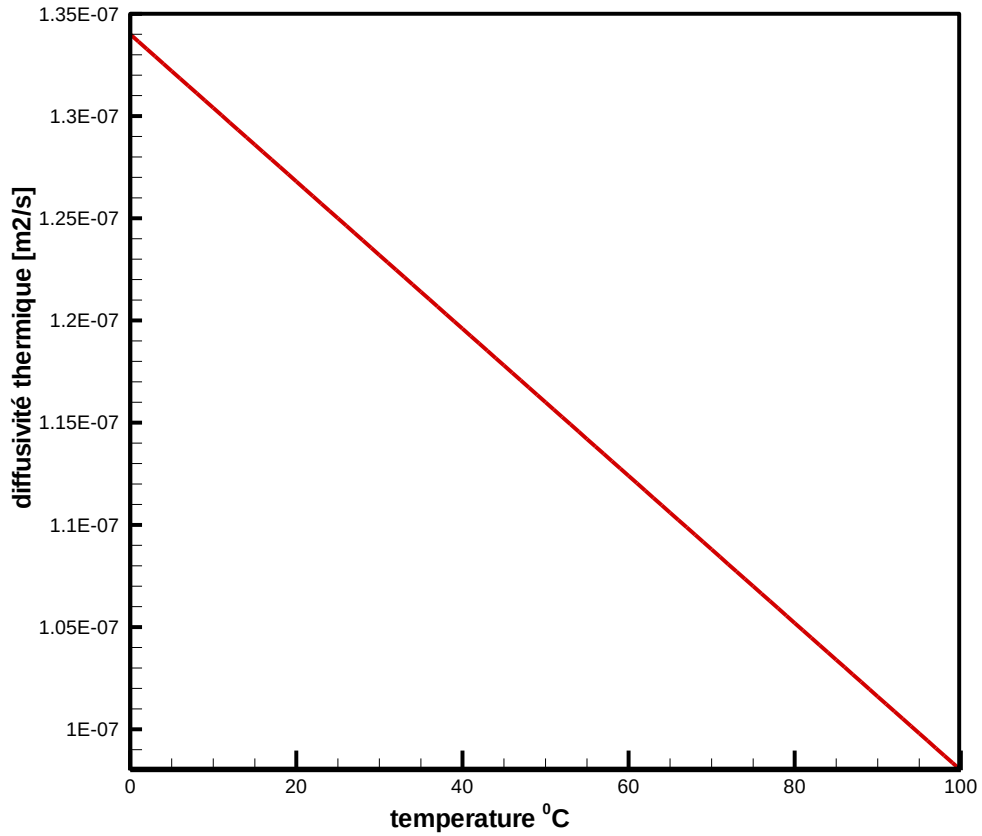


Figure IV.11 Variation de la Diffusivité thermique.

Variation des températures de vitre :

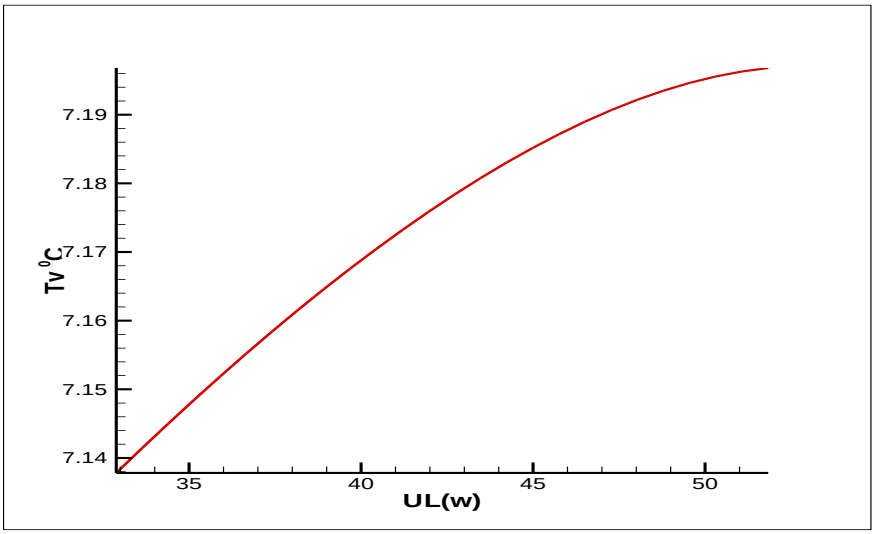


Figure IV .12 Variation temporelle des températures de vitre.

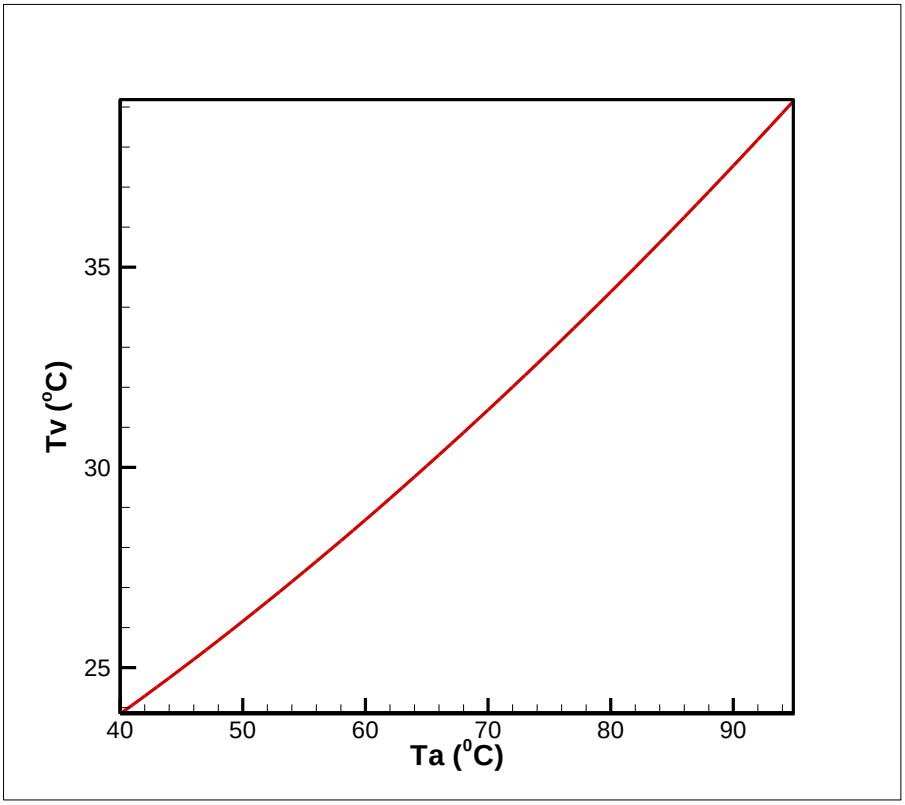


Figure IV .13 Variation des températures de vitre.

Variation de fluide caloporteur:

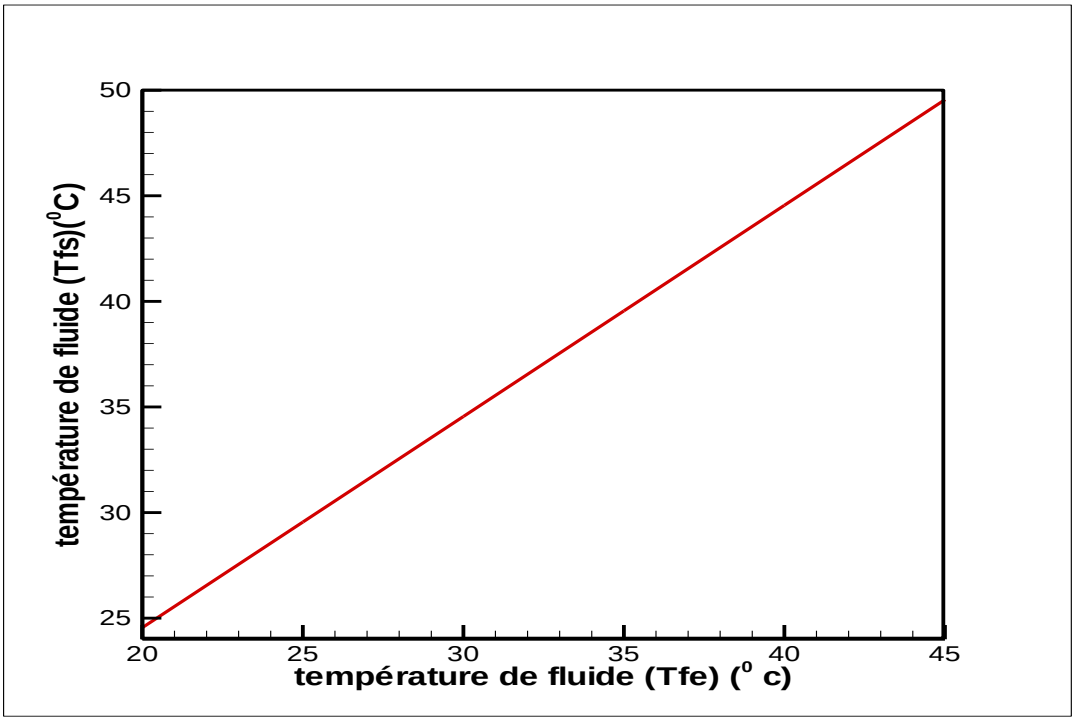


Figure IV.14 Variation de fluide caloporteur.

Conclusion Générale

Conclusion générale :

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude théorique et numérique d'un capteur solaire plan à eau en régimes transitoire âpres une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents coefficients d'échanges thermiques par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur d'une part, et entre la vitre et l'air ambiant d'autre part qui mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernants le comportement thermique de ce dispositif en régime transitoire.

La température de la plaque absorbante est la plus élevée. Ceci peut être justifié par son pouvoir d'absorption qui est important pour le rayonnement solaire. Ce phénomène est plus accentué si la plaque est recouverte par une couche sélective. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur.

Les résultats de simulation numérique permettent de découvrir les profils de température de l'absorbeur, le vitrage et le fluide caloporteur.

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur plan.

Il apparait clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant. En outre, l'augmentation de la température de l'ambiance favorise l'amélioration du rendement instantané Du capteur.
On notera ainsi que :
- L'emploi d'un absorbeur doté d'une chaleur spécifique, une conductivité thermique et une absorptivité élevées améliore le rendement instantané.
- La couverture transparente doit avoir une bonne transmissivité du rayonnement visible et une faible épaisseur afin de minimiser son inertie thermique.
- Le fluide caloporteur doit avoir d'une part une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées et d'autre part, une viscosité dynamique et une masse volumique réduites.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :
- Maintenir une faible différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente afin de diminuer les pertes thermiques convectifs à l'avant du capteur.
- Choisir une température d'entrée du fluide caloporteur assez faible.
- Avoir un débit élevé pour améliorer l'énergie utile récupérée.

Références bibliographie

[1] http://www.ines solaire.com

[2] J, Bernard. *Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).*

[3] A, Sfeir ; G, Guarracino. *Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).*

[4] A, Mefti, M, Y, bouroubi; H, Mimouni. *Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin Des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).*

[5] F.bouhired .*dévoloppement des chauffe eau solaire en algérie*.(2002)

[6] : internet : www.tecsol.fr.

[7] Sami, S, Lafri, D et Hamid, A., *''Etude du comportement thermique d'une installation de Chauffage d'eau collective''*, *Revue des Energies renouvelables, Numéro spécial- Energies Renouvelables- Valorisation- pp 255-260* Tlemcen,(1999).