

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTISIQUE

UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE

FACULTE DES SCIENCES EXACTES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° d'ordre.....

Série.....

MEMOIRE

Présenté pour obtenir le diplôme de magistère en physique

Spécialité : Energies renouvelables

THEME

EFFET DES PARAMETRES OPERATIONNELS SUR LES PERFORMANCES D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN
--

Par :

SAADI SOUAD

Soutenu le : / /2010

Devant le jury :

Président :	N. BELLEL	M.C.A	Université Mentouri -Constantine
Rapporteur :	A. CHAKER	Pr.	Université Mentouri -Constantine
Examineurs :	A. ZAATRI	Pr.	Université Mentouri -Constantine
	M. DJEZZAR	M.C.A	Université Mentouri –Constantine

Remerciements

Je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donnée le courage, la volonté et la patience de mener à terme le présent mémoire.

Ce travail a été mené au laboratoire de Physique Energétique de l'Université Mentouri de Constantine, sous la direction de Madame Abla Chaker, Professeur au département de Physique, je lui exprime particulièrement toute ma reconnaissance de m'avoir faite bénéficier de ses compétences scientifiques, ses suggestions pertinentes et sa constante disponibilité tout le long du travail.

Je remercie vivement Monsieur Nadir Bellel, Maître de conférences à l'Université de Constantine, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider mon jury de thèse.

J'adresse tous mes remerciements à messieurs :

Abdelouaheb Zaatri, Professeur au département de génie mécanique,

Mahfoud Djeddar, Maître de conférences au département de physique,

D'avoir accepter de me faire l'honneur de juger ce travail et de participer à mon jury de thèse.

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

Nomenclature

<i>Symbole</i>	<i>Désignation</i>	<i>Unité</i>
cp _i	Chaleur massique à pression constante	J/kg. °C
e _i	Epaisseur d'un corps d'indice i	m
g	Accélération de la pesanteur	m ² /s
hc _{ij}	Coefficient d'échange thermique par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m ² . °C
hr _{ij}	Coefficient d'échange thermique par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W/m ² . °C
G	Rayonnement global incident	W/m ²
m _i	Masse d'un corps d'indice i	kg
p _i	Puissance solaire absorbée par un corps d'indice i	W/m ²
qc _{ij}	Flux de chaleur échangé par convection entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
qr _{ij}	Flux de chaleur échangé par rayonnement entre deux surfaces matérielles indicées i et j	W
qcd _{ij}	Flux de chaleur échangé par conduction 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

<i>Indices</i>	<i>Désignation</i>
a	Air ambiant
ab	Absorbeur
c	Ciel
f	Fluide
ie	Isolant extérieur
ii	Isolant intérieur
ve	Vitre extérieure
vi	Vitre intérieure

<i>Lettres grecques</i>	<i>désignation</i>	<i>Unité</i>
α	Coefficient d'absorption	-
β	Inclinaison du capteur	°
ε	Coefficient de transmission	-
η	Rendement instantané	-
k_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/m ³
τ	Coefficient de transmission	-

Sommaire

Nomenclature

<i>Introduction.....</i>	<i>1</i>
--------------------------	----------

Chapitre I : Le gisement solaire

I.1. Le soleil.....	5
I.1.1. Présentation générale	5
I.1.2. Evolution	8
I.2. L'énergie solaire.....	9
I.2.1. Origine	9
I.2.2. Caractères particuliers	9
I.2.3. Captation	10
I.3. Le rayonnement solaire.....	11
I.3.1. Le rayonnement direct.....	12
I.3.2. Le rayonnement diffus.....	14
I.3.3. Le rayonnement global.....	14
I.4. Calcul de la position du soleil.....	14
I.4.1. Les paramètres de position.....	14
I.4.1.a. Les coordonnées géographiques.....	14
I.4.1.b. Les coordonnées célestes horizontales.....	15
I.4.1.c. Les coordonnées célestes horaires.....	16
I.4.2. Les paramètres de temps.....	16
I.5. Le gisement solaire en Algérie.....	17

Chapitre II : Etude théorique du capteur solaire plan

II.1. Les différents composants d'un capteur solaire plan.....	21
II.1.1. L'absorbeur.....	21
II.1.2. Le fluide caloporteur.....	23
II.1.3. La couverture transparente.....	23
II.1.4. L'isolation thermique.....	24
II.1.5. Le coffre.....	25
II.2. Classification des capteurs.....	25
II.2.1. Le fluide de travail utilisé.....	25
II.2.2. L'orientation des capteurs.....	26
II.2.3. Le type des composants.....	26
II.3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan.....	27
II.4. Les différents modes de transfert mis en jeu dans un capteur solaire.....	28
II.4.1. La conduction.....	28
II.4.2. La convection.....	29
II.4.3. Le rayonnement.....	37

Chapitre III : Etude numérique du capteur solaire plan

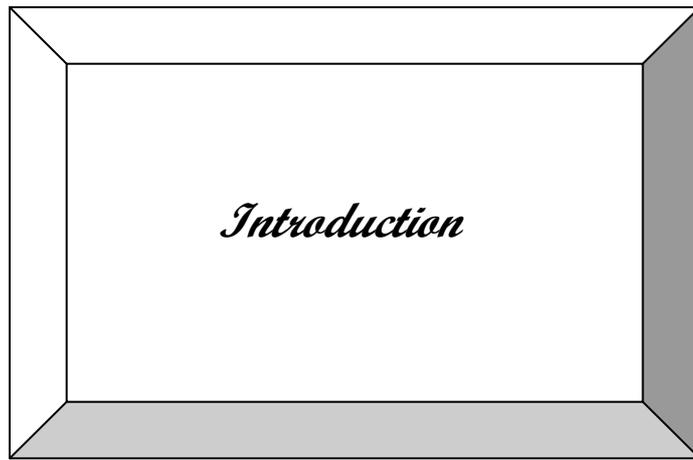
III.1. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan.....	41
III.1.a. Les paramètres externes.....	41
III.1.b. Les paramètres internes.....	41
III.1.c. Performances d'un capteur solaire plan.....	42
III.2. Etat de l'art des capteurs plans à eau et à air.....	42
III.2.1. Etude du capteur plan à air.....	42

III.2.2. Etude des capteurs solaires plans à eau.....	49
III.3. Puissances absorbées par un capteur solaire plan avec simple vitrage.....	50
III.3.1. Puissance absorbée par la vitre.....	50
III.3.2. Puissance absorbée par l'absorbeur.....	50
III.4. Bilan thermique global du capteur plan en régimes permanent et transitoire.....	50
III.5. Bilan énergétique du capteur solaire plan.....	51
III.5.1. Bilan thermique du capteur solaire en régime permanent.....	53
III.5.2. Bilan thermique du capteur en régime transitoire.....	55
III.6. Traitement informatique.....	57
III.6.1. Principe de simulation en régime permanent.....	57
III.6.2. Principe de simulation en régime transitoire.....	57
III.6.3. Le programme principal en régime permanent.....	57
III.6.4. Le programme principal en régime transitoire.....	58
III.6.5. L'organigramme général pour le régime permanent.....	60
III.6.6. Les organigrammes généraux pour le régime transitoire.....	61

Chapitre IV : Résultats et discussions

IV.1. Introduction.....	66
IV.1. Etude de l'effet des paramètres opérationnels sur le rendement du capteur solaire plan à eau en régime permanent.....	67
IV.1.1. Effet du rayonnement global sur les températures des différents composants du capteur.....	67
IV.1.2. Effet du rayonnement global.....	68
IV.1.3. Effet de la température ambiante	68
IV.1.4. Effet de la chaleur spécifique	69
IV.1.5. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur.....	69
IV.1.6. Effet de la variation du débit.....	70

IV.2.	Effet des paramètres opérationnels sur le rendement instantané du capteur solaire plan à eau en régime transitoire.....	71
IV.2.1.	Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées.....	71
IV.2.2.	Variation temporelle des températures de l’ambiance et du ciel.....	72
IV.2.3.	Validation des résultats.....	73
IV.2.4.	Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur.....	74
IV.2.5.	Effet des paramètres externes	75
IV.2.5.1.	Les paramètres d’ensoleillement.....	75
IV.2.5.1.a.	Effet du rayonnement global	75
IV.2.5.1.b.	Effet du trouble atmosphérique sur le rayonnement global.....	76
IV.2.5.1.c.	Effet de la température ambiante	77
IV.2.5.1.d.	Variation temporelle du rendement instantané.....	78
IV.2.5.5.	Effet de la vitesse du vent.....	78
IV.2.6.	Effet des paramètres internes	79
IV.2.6.1.	Les paramètres de construction.....	79
IV.2.6.1. a.	L’absorbeur.....	79
IV.2.6.1. b.	La couverture transparente	83
IV.2.6.1. c.	Le fluide caloporteur.....	84
IV.2.6.1. d.	L’isolant.....	93
IV.2.6.2.	Les paramètres de position.....	94
IV.2.6.2.a.	Effet de l’inclinaison du capteur solaire	94
	<i>Conclusion</i>	<i>96</i>
	<i>Annexes.....</i>	<i>99</i>
	<i>Références bibliographiques.....</i>	<i>11</i>



INTRODUCTION

Depuis la révolution industrielle au XIX^{ème} siècle, l'utilisation de l'énergie a pris de l'ampleur, et l'exploitation de nouvelles formes d'énergie est devenue une nécessité pour assurer le niveau de vie actuel de l'humanité.

En effet, l'exploitation massive des énergies conventionnelles ne cesse de s'accroître, durant le XX^{ème}, la consommation d'énergie est multipliée par 10 avec une accélération à partir de 1945, ce qui a pour effet l'épuisement des ressources traditionnelles en matière d'énergie.

En outre, le réchauffement climatique est une autre conséquence de l'exploitation massive des hydrocarbures qui produisent de grandes quantités de gaz à effet de serre. Au XX^{ème} siècle, des scientifiques ont indiqué une augmentation de 0.6°C de la température moyenne de la planète et selon un rapport réalisé par le GIEC (groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat) en 2007, la température moyenne de la planète va augmenter de 1.8 à 4°C d'ici la fin du XXI^{ème} siècle.

A cet effet et pour mieux préserver l'avenir de l'humanité, il est de rigueur de consommer rationnellement les énergies conventionnelles et de développer les énergies renouvelables qui sont inépuisables et propres.

Les énergies renouvelables ont connu une première phase de développement à l'occasion des chocs pétroliers de 1973 et 1978, puis une période de repli après le contre-choc de 1986, avant de retrouver un second souffle en 1998 après la signature du protocole de Kyoto qui prévoit une baisse de 5.2% des émissions des gaz à effet de serre des pays riches sur la période de 2002-2012 par rapport à 1990.

L'énergie renouvelable la plus dominante est l'énergie solaire qui assure la vie sur terre, et qui a été exploitée par l'homme depuis très longtemps, sous diverses formes.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan pour la production de l'eau chaude.

Dans ce sens, plusieurs travaux ont été consacrés à l'étude des capteurs solaires plans et ayant surtout pour but l'amélioration de son rendement instantané qui est la performance la plus significative. Le rendement instantané du capteur varie avec la géométrie du capteur, l'ensoleillement et les conditions extérieures. Une fois le capteur construit et installé, sa géométrie est fixe, et il ne dépendra que des paramètres externes.

L'objectif de ce travail est l'étude des effets des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur solaire plan.

A cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion, en plus d'une conclusion générale et des recommandations.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

- Le premier chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.

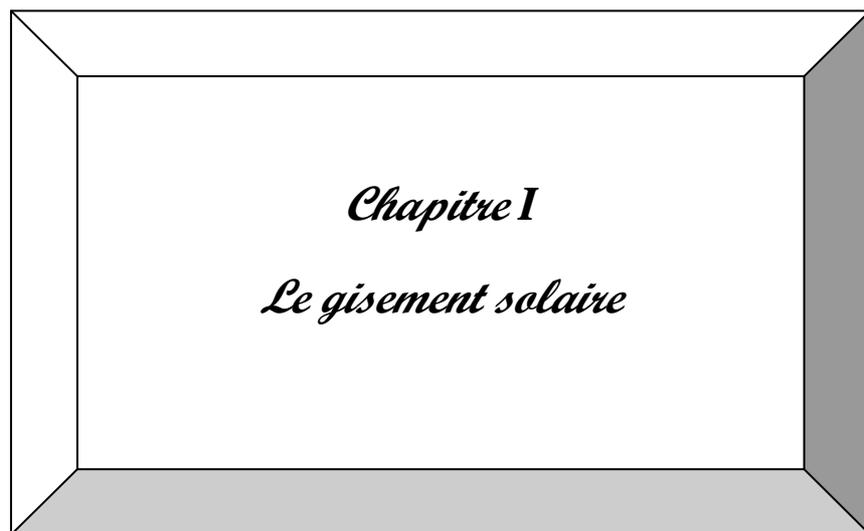
- Une étude théorique du capteur solaire plan, ses différents composants, ses classifications, son fonctionnement et les différents échanges thermiques mis en jeu au sein du capteur feront l'objet du deuxième chapitre.

- Dans le troisième chapitre, nous présenterons un état de l'art des capteurs plans à air et à eau, les différentes équations gouvernant le fonctionnement du système en régimes permanent et transitoire ainsi qu'une simulation numérique du comportement du système.

- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.

- La partie annexe expose, les instruments de mesure du rayonnement solaire et les différentes stations de l'O.N.M. Le lecteur trouvera également quelques propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan ainsi que les méthodes de discrétisation et de résolution numérique utilisées dans ce travail.

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



Dans ce chapitre, nous étudierons brièvement le soleil, son énergie et son rayonnement reçus au niveau de la terre. Nous définirons quelques données astronomiques nécessaires pour cette étude et nous introduirons quelques données sur le gisement solaire en Algérie.

Introduction

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

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

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

I.1. Le soleil

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

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

I.1.1. Présentation générale

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

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

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

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

Tableau I.1. Caractéristiques principales du soleil

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

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

- Une température de 15.10^6 °C.
- Une densité est de 1015 kg/m³.
- Une pression de 109 atm.

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

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

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

- Une température comprise entre 50.10^4 °C à 6400 °C.
 - Une épaisseur de l'ordre 199758 km.
- La photosphère est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont fortement ionisés et capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible et c'est elle que l'œil humain perçoit. Elle présente les caractéristiques suivantes [8] :
 - La température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C.
 - Une épaisseur de 500 km.
 - Une pression de 1/100 atm.
 - La chromosphère constitue avec la couronne l'atmosphère du soleil, cette couche présente les caractéristiques suivantes [7], [8] :
 - Une épaisseur 2000 km.
 - Une température augmentant de 4200 °C à 10^4 °C.
 - La couronne est la dernière couche du soleil, ses caractéristiques sont [6] :
 - Elle est sans limite précise.
 - La température augmente de 10^6 °C à 2.10^6 °C.

La figure I.1 montre la structure du soleil

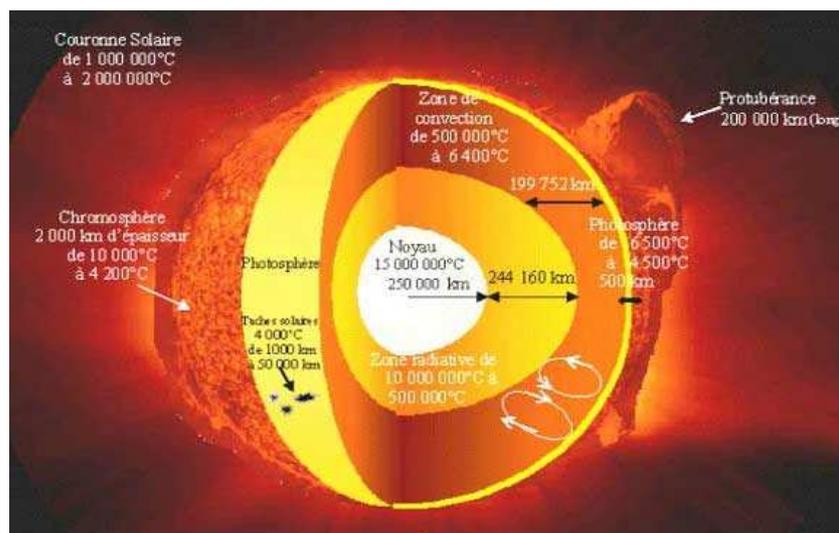


Figure I.1. Structure du soleil

I.1.2. Evolution

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

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

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

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

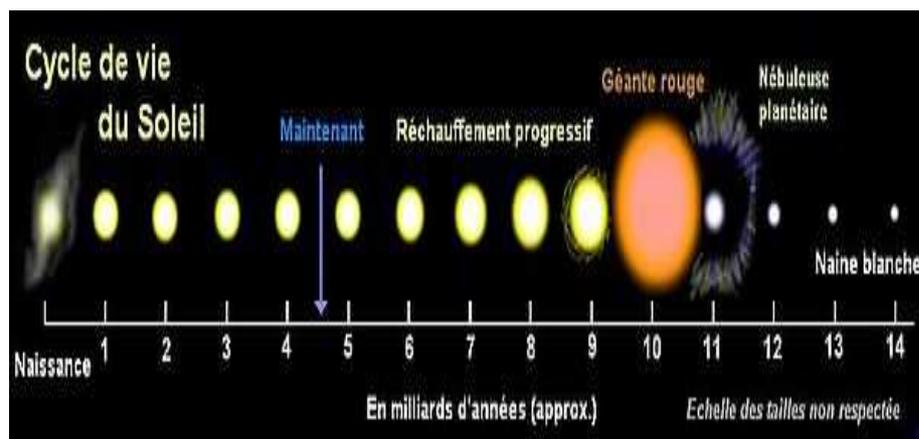


Figure I.2. Cycle de vie du soleil

I.2. L'énergie solaire

I.2.1. Origine

Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermonucléaire. Le résultat de ce processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7.10^{26}$ j/s.

I.2.2. Caractères particuliers

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

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1kW/m^2 à midi par ciel bleu sur toute la planète.
- La densité de puissance maximale reçue au niveau du sol (1 kW/m^2) est peu dense on parle alors d'énergie diffuse.
- Elle est abondante, notre planète reçoit plus de 10^4 fois l'énergie que l'humanité consomme.
- Elle est intermittente et variable à cause de l'alternance du jour et de la nuit, des variations saisonnières et quotidiennes de l'ensoleillement.
- L'énergie reçue par une surface donnée n'est pas récupérable en totalité ceci est dû aux pertes d'énergie sous formes conductrice, convective ou rayonnante.
- Elle est propre.

I.2.3. Captation

Il existe différentes techniques pour capter une partie de cette énergie à savoir:

- **L'énergie solaire thermique**

Le thermique solaire est un procédé de transformation de l'énergie solaire en une forme thermique, qu'on peut utiliser :

- En usage direct de la chaleur : chauffe-eau solaire, chauffage solaire, cuisinière et séchoir solaire.
- En usage indirect où la chaleur sert pour un autre usage : centrales solaires thermodynamiques, froid solaire.

- **L'énergie solaire thermodynamique**

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales héliothermoélectriques [9], [19].

Trois types principaux de centrales sont utilisées [9]:

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

- **L'énergie solaire photovoltaïque**

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

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ; cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [9].

I.3. Le rayonnement solaire

Les réactions thermonucléaires produites au cœur du soleil génèrent des rayonnements corpusculaires et électromagnétiques se propageant dans toutes les directions du vide intersidéral avec une vitesse de 3.10^8 m/s et couvrant toutes les longueurs d'ondes depuis les rayons X et gamma jusqu'à l'I.R lointain. Cependant 99.9% de l'énergie se situe entre 0.2 et $8\mu\text{m}$ [7].

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

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

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

Tableau I.2. Répartition spectrale du rayonnement thermique [6]

La figure I.3 illustre le rayonnement solaire, ses fréquences et ses longueurs d'ondes.

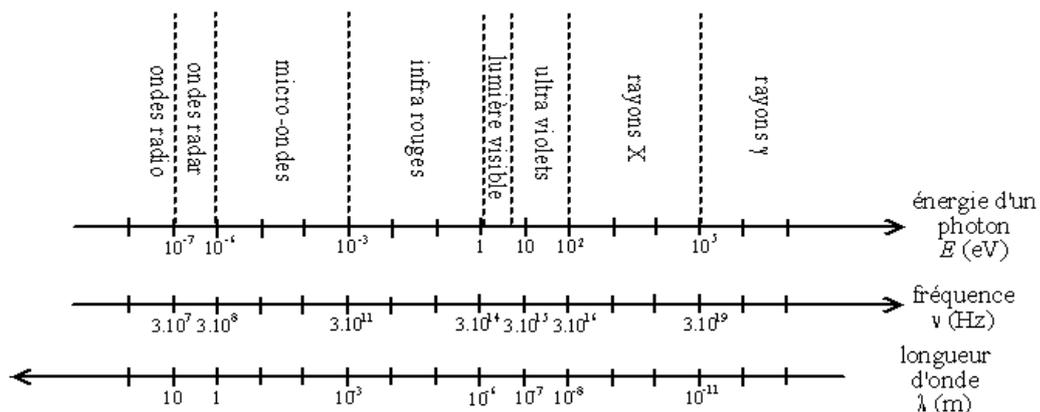


Figure I.3. Spectre solaire

* La constante solaire C^*

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

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

$$C^* = C_0^* + 0.033 \times \cos(0.948 \times n) \quad (I.1)$$

C^* : la constante solaire.

$C_0^* = 1353 \text{ W/m}^2$ est la valeur moyenne de la constante solaire actuellement retenue [6].

n : le numéro du jour de l'année.

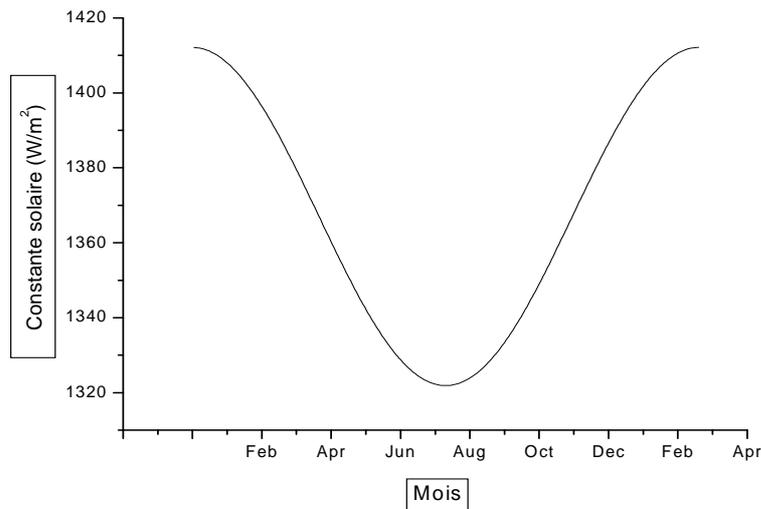


Figure I.4. Variation mensuelle de la constante solaire [6]

I.3.1. Le rayonnement solaire direct

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

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

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

$$\tau_{\text{dir}} = a \times \exp \frac{-P \times b}{1000 \times \sinh} \quad (I.2)$$

Où:

a, b : coefficients traduisant les troubles atmosphériques.

h: hauteur du soleil.

P : pression atmosphérique du lieu.

	Ciel pur	Conditions normales	Zones industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

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

Le tableau I.4 donne la variation de la pression atmosphérique avec l'altitude :

Altitude (m)	0	500	1000	1500	2000	5000
P (mbar)	1000	950	900	850	800	500

Tableau I.4. Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude [10]

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

$$G_{dirh} = C^* \times \tau_{dir} \quad (I.3)$$

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

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

$$G_{dir} = G_{dirh} \times \cos \theta \quad (I.4)$$

θ : angle d'incidence des rayons solaires.

I.3.2. Le rayonnement solaire diffus

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

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

$$\tau_{dif} = 0.271 - 0.2939 \times \tau_{dir} \quad (I.5)$$

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

$$G_{dih} = C^* \times \sin(h) \times \tau_{dif} \quad (I.6)$$

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

$$G_{dif} = G_{dif1} + G_{dif2} \quad (I.7)$$

$$G_{dif1} = G_{dih} \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \quad (I.8)$$

$$G_{dif2} = alb \times \frac{1 + \cos(i)}{2} \times (G_{dih} \times \sin(h) + G_{dih}) \quad (I.9)$$

G_{dif1} , G_{dif2} : rayonnements diffusés par le ciel et par le sol respectivement.

Alb : albédo du sol.

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

I.3. 3. Le rayonnement global

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

$$G = G_{dir} + G_{dif} \quad (I.10)$$

I.4. Calcul de la position du soleil

I.4.1. Les paramètres de position

1.4.1. a. Les coordonnées géographiques

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

- La longitude (λ) est l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu avec le méridien origine de Greenwich, elle varie de -180° à $+180^\circ$ de l'ouest à l'est.
- La latitude (L) est l'angle avec le plan équatorial que fait le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu, elle varie entre $+90^\circ$ au pôle Nord et -90° au pôle Sud.

- L'altitude (Z) correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence, le géoïde, figurant le niveau moyen de la mer.

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

1.4.1. b. Les coordonnées célestes horizontales

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

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

$$\sin(a) = \cos(d) \times \frac{\sin(\omega)}{\sin(h)} \quad (\text{I. 11})$$

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

$$\sin(h) = \sin(L) \times \sin(d) + \sin(L) \times \cos(d) \times \cos(\omega) \quad (\text{I. 12})$$

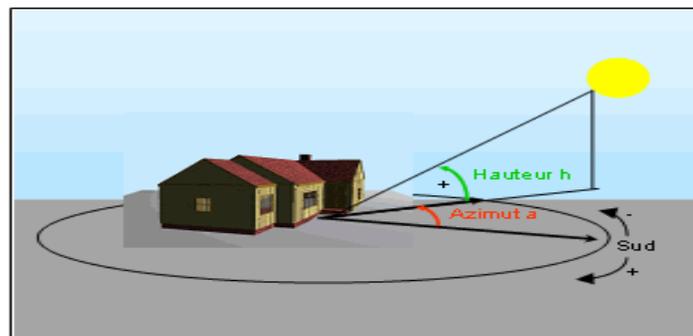


Figure I.5. Les coordonnées célestes horizontales

1.4.1. c. Les coordonnées célestes horaires

- L'angle horaire (ω) est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien du lieu, il augmente de 15° par heure [1], [8], [11].

- La déclinaison (d) est l'angle entre le plan de l'équateur terrestre avec la direction terre-soleil. elle varie suivant l'équation de Cooper (figure I.6) [6] :

$$d = 23.45 \times \sin\left(\frac{360}{365} \times (n - 81)\right) \quad (I.13)$$

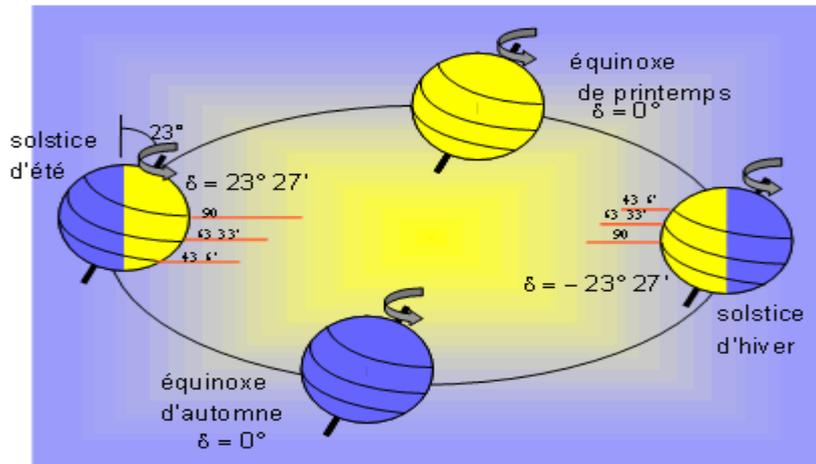


Figure I.6. Variation annuelle de la déclinaison solaire

I.4.2. Les paramètres de temps

On distingue :

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

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{12} \quad (I.14)$$

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

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

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

$$ET = 9.87 \times \sin(2 \times N') - 7.53 \times \cos(N') - 1.5 \times \sin(N') \quad (I.16)$$

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

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

$$TU = TSM - \frac{\lambda}{15} \quad (I.18)$$

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

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

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

I.5. Le gisement solaire en Algérie

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

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure I.7 :

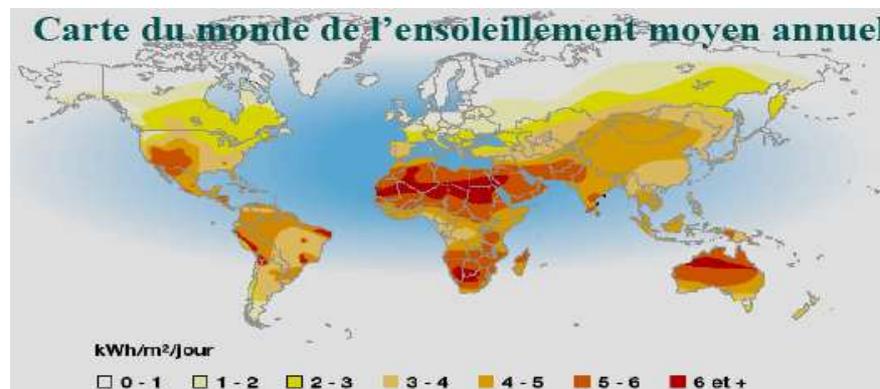


Figure I.7. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [17]

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

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

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

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

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

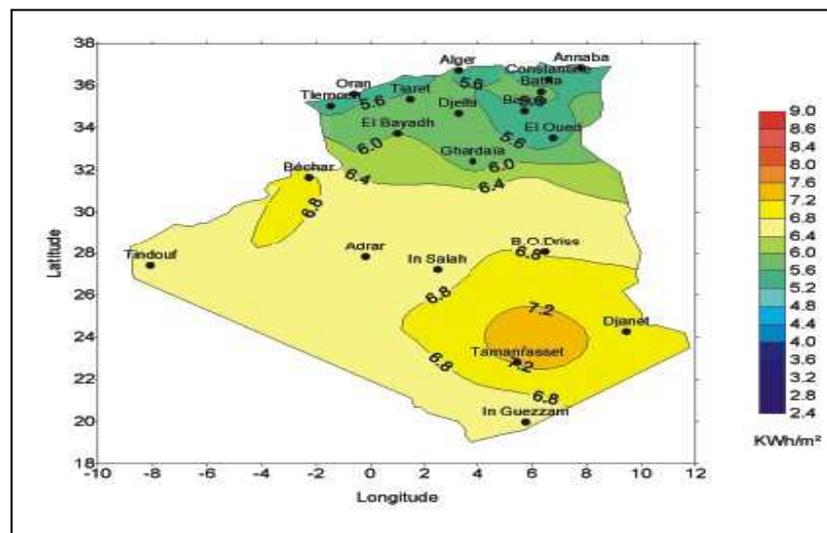


Figure I.8. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à la latitude du lieu [18]

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

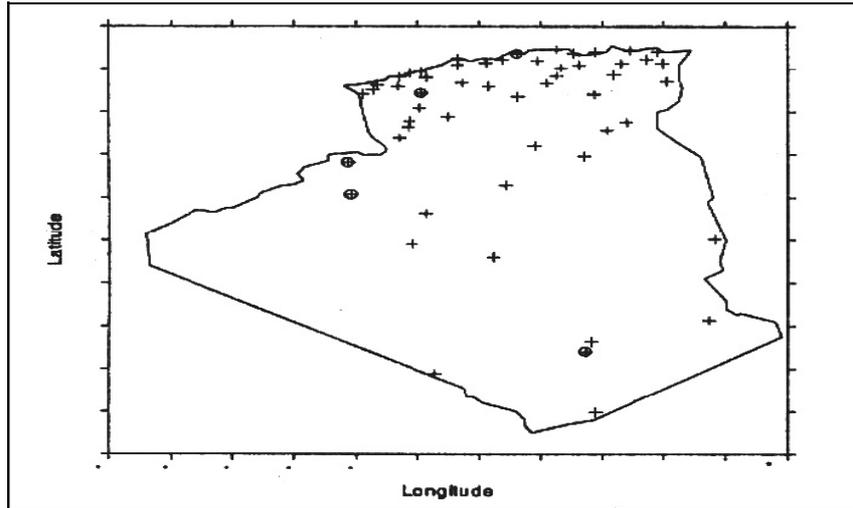
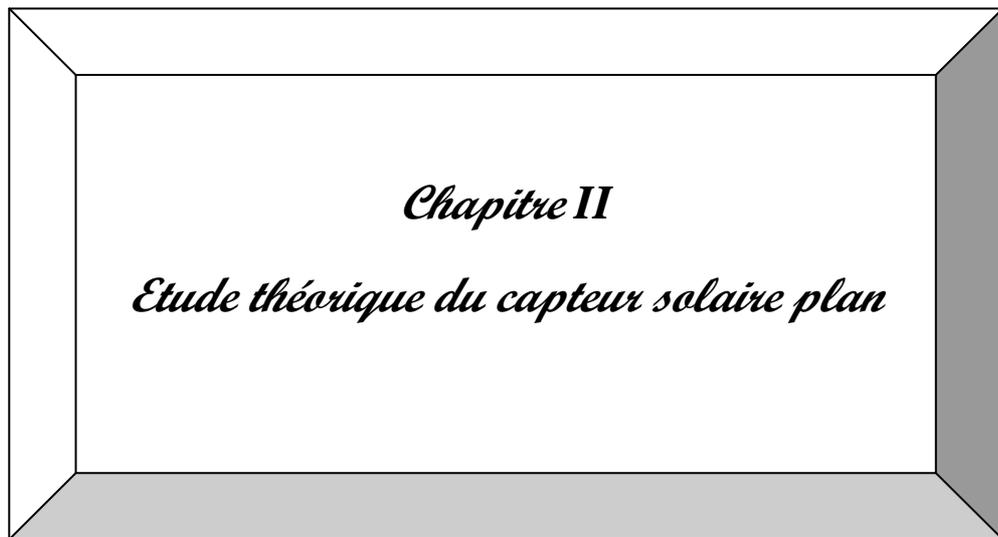


Figure I.9. Répartition territoriale des stations météorologiques en A



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

Introduction

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

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

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

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

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

II.1. Les différents composants d'un capteur solaire à eau

Un capteur plan est constitué essentiellement d'une couverture transparente, d'un absorbeur, d'un fluide caloporteur, d'une isolation thermique et d'un coffre (figure II.1).

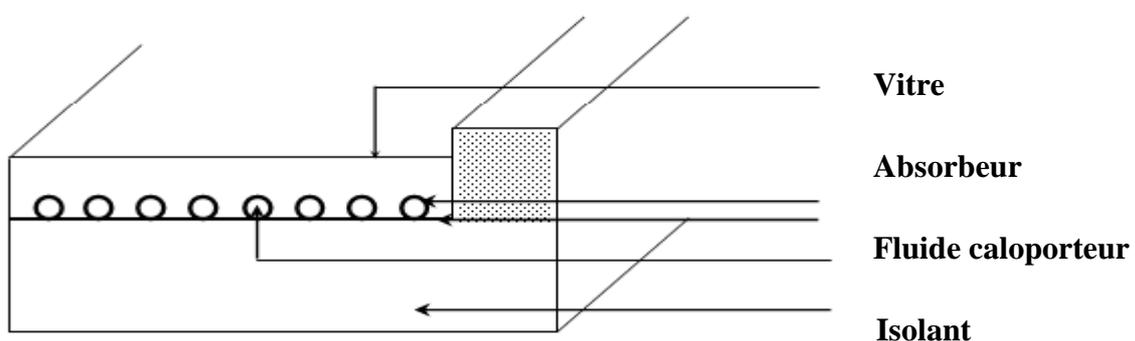


Figure II.1. Composants d'un capteur solaire plan

II.1.1. L'absorbeur

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

Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le caloporteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique (annexe B) laquelle est utilisée uniquement dans le cas où un milieu agressif circule directement dans l'absorbeur tel est le cas de l'eau d'une piscine. L'emploi des matières plastiques entraîne des différences notables comparées aux métaux [1]:

Les avantages sont :

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

Les inconvénients sont :

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

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

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

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

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

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

II.1.2. 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 [1]:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- Pas de problème de corrosion (l'air sec).
- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur pour le chauffage des locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux ou pour le séchage solaire.
- Le produit masse volumique - capacité calorifique, est faible ($\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$) pour l'air contre $4.2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ pour l'eau.
- Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant.

II.1.3. La couverture transparente

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

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

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

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

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

II.1.4. L'isolation thermique

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

- **Partie avant de l'absorbeur**

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

- **Parties arrière et latérale**

Afin de limiter les pertes thermiques à la périphérie du capteur, on peut placer une ou plusieurs couches d'isolant qui doit résister et ne pas dégazer aux hautes températures,

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

II.1.5. Le coffre

Le coffre fabriqué couramment en aluminium ou en bois, enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques.

II.2. Classification des capteurs

On peut classer les capteurs selon [19] :

II.2.1. Le fluide de travail utilisé

On peut trouver :

- **Des capteurs solaires à air**

Ce type de capteurs s'adapte aux appareils de chauffage à air pour le séchage des produits agro-alimentaires, et le chauffage des locaux.

- **Des capteurs solaires à eau**

Ils s'adaptent aux appareils de chauffage à liquide, y compris ceux dont le liquide entre en ébullition pendant le chauffage (la production de l'eau chaude sanitaire).

Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

- Faible pression de circulation, tel est le cas du chauffage des piscines.
- Haute pression de circulation où le circuit d'eau est généralement constitué de tubes de cuivre et de plaques métalliques qui augmentent la surface d'absorption.

L'eau et l'air sont les principaux fluides de travail utilisés pour les capteurs solaires plans, mais il en existe d'autres, tels que les hydrocarbures qui sont utilisés pour la réfrigération et la génération d'électricité.

II.2.2. L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

- **Des capteurs fixes**

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

- * La simplicité et la fiabilité.
- * Un faible entretien.
- * Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).
- * L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur l'absorbeur n'est pas très longtemps chaque jour à son maximum d'efficacité.

- **Des capteurs à poursuite**

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

II.2.3. Les types des composants

Les composants des collecteurs diffèrent d'un capteur à un autre, on peut classer les capteurs suivant :

- **La couverture**

Elle peut exister ou pas, on peut alors trouver :

- * **Les capteurs solaires plans non vitrés**

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

- * **Les capteurs solaires plans vitrés**

Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

- **L'absorbeur**

L'absorbeur peut être classé suivant sa forme. On trouve :

- * Les capteurs plans.
- * Les capteurs à cavités.

II.3. Fonctionnement d'un capteur solaire plan

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

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

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

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

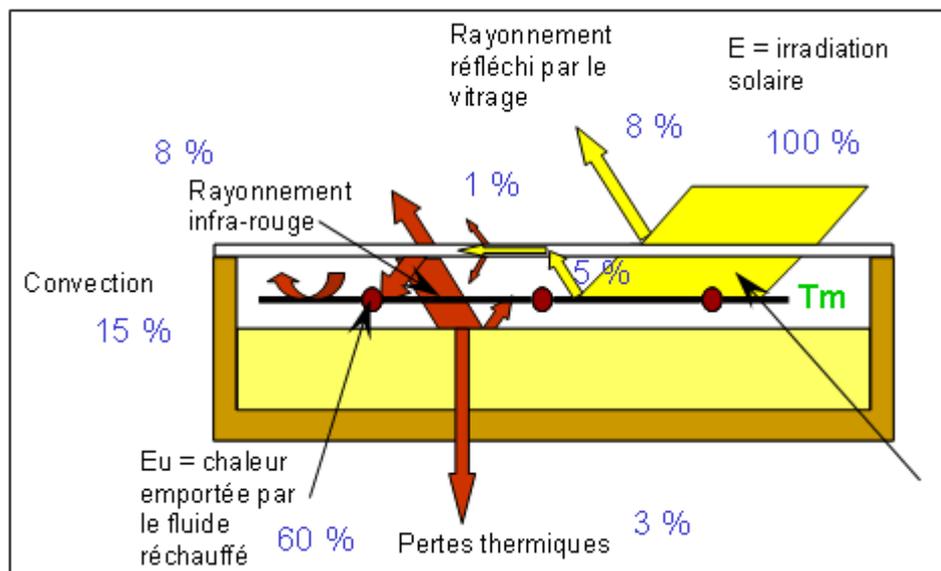


Figure II.2. Principe de fonctionnement du capteur solaire plan

II.4. 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 II.3).

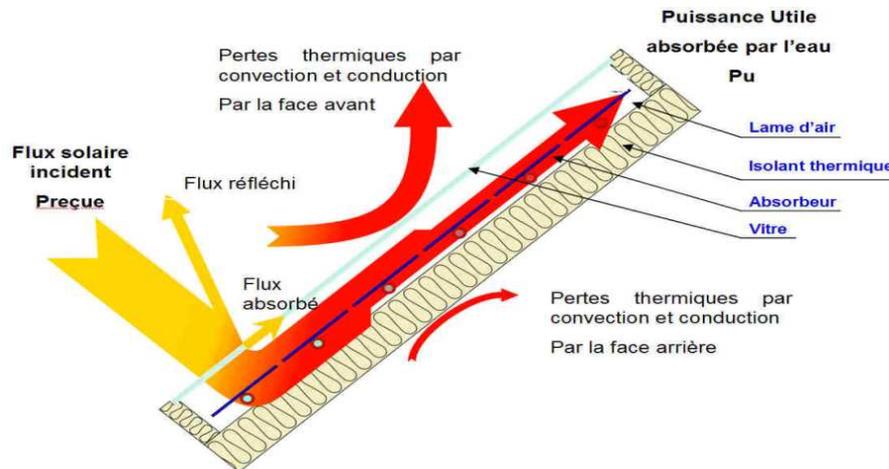


Figure II.3. Les différents échanges thermiques dans un capteur plan

II.4.1. La conduction

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

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

$$q = -k \times A \times \text{grad } T \quad (\text{II. 1})$$

q : flux de chaleur.

k : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange.

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

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

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

$$q_{cdai} = \frac{T_{ab} - T_{ii}}{\varphi_1} + \frac{T_{ab} - T_{il}}{\varphi_2} \quad (II. 2)$$

φ_1 et φ_2 sont exprimés par :

$$\varphi_1 = \frac{e_{ab}}{s_{abi} \times k_i} + \frac{e_i}{s_{abi} \times k_{ab}} \quad (II. 3)$$

$$\varphi_2 = \frac{e_{ab}}{s_{abil} \times k_{il}} + \frac{e_{il}}{s_{abil} \times k_{ab}} \quad (II. 4)$$

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

T_{ab} : température de l'absorbeur.

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

T_{il} : température de l'isolant latéral.

e_{ab} : épaisseur de l'absorbeur.

s_{abi} : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

k_i : conductivité thermique de l'isolant horizontal.

e_i : épaisseur de l'isolant horizontal.

e_{il} : épaisseur de l'isolant latéral.

k_{ab} : conductivité thermique de l'absorbeur.

k_{il} : conductivité thermique de l'isolant latéral.

II.4.2. La convection

La convection est un transport d'énergie dû à des mouvements macroscopiques [24].

On distingue deux types de convection :

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

➤ **La convection naturelle** : le mouvement du fluide est engendré par les variations de densité causées par des variations de température au sein du fluide, tel est le cas de la thermocirculation.

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

$$q = h \times S \times (T_p - T_f) \quad (\text{II. 5})$$

q : le flux échangé par convection.

h : coefficient de convection.

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

T_p : température de la paroi solide.

T_f : température du fluide.

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

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

II.4.2.a. Détermination du coefficient de convection forcée entre la vitre (ou l'isolant) et le vent

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

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

$$hc_{va} = 5.7 + (3.8 \times V) \quad (\text{II. 6})$$

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

V : vitesse du vent.

Selon John A.Duffie, William A.Beckman [6] il est probable que cette relation inclut l'effet de la convection et du rayonnement, et n'est applicable que pour les surfaces de 0.5 m².

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

$$hcva = 4.214 + (3.575 \times V) \quad (II.7)$$

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

$$Nu = 0.76 \times Ra^{0.25} \quad 10^4 < Ra < 10^7 \quad (II.8)$$

$$Nu = 0.15 \times Ra^{0.6} \quad 10^7 < Ra < 10^{10} \quad (II.9)$$

- Pour les capteurs verticaux, MacAdams propose :

$$Nu = 0.59 \times Ra^{\frac{1}{4}} \quad 10^4 < Ra < 10^9 \quad (II.10)$$

$$Nu = 0.59 \times Ra^{1/3} \quad 10^9 < Ra < 10^{12} \quad (II.11)$$

Le nombre de Nusselt (Nu) est donné par :

$$Nu = \frac{hcva \times Lc}{ka} \quad (II.12)$$

$$Lc = \frac{4 \times S}{\text{périmètre}} \quad (II.13)$$

Lc : longueur caractéristique.

Ra : nombre de Rayleigh.

ka : conductivité thermique de l'air.

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

$$hcva = 2.8 + (3 \times V) \quad (II.14)$$

D'après John A.Duffie, William A.Beckman [6], cette corrélation n'est applicable que pour une surface de 0.5 m².

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

$$Nu = 0.86 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.66} \quad 2 \times 10^4 < Re < 9 \times 10^4 \quad (II.15)$$

Pr : nombre de Prandtl.

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

$$Nu = 0.94 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.6} \quad (II.16)$$

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

$$hcva = \frac{8.6 \times V^{0.6}}{Lv^{0.4}} \quad (II.17)$$

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

Dans toutes les corrélations précédentes :

hcia= hcva

hcia : coefficient de convection entre l'isolant et l'ambiance.

- Ursula Eiker [15] a présenté la relation:

$$hcva = (hcl^3 + hcf^3)^{1/3} \quad (II.18)$$

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

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

hcl est donné par :

$$hcl = 1.78 \times (Tve - Tam)^{1/3} \quad (II.19)$$

II.4.2.b. Détermination du coefficient de convection libre entre l'absorbeur et la vitre

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

- **Le nombre de Nusselt (Nu)**

$$\text{Nu} = \frac{hcav \times eva}{ka} \quad (\text{II. 20})$$

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

eva : espace entre les deux plaques.

- **Le nombre de Rayleigh (Ra)**

$$\text{Ra} = \frac{g \times \gamma \times \text{Pr} \times (tab - Tv) \times eva^3}{v^2 \times \chi} \quad (\text{II. 21})$$

g: pesanteur.

γ : coefficient d'expansion volumique du fluide.

Tv : température de la vitre.

v : viscosité cinématique.

χ : diffusivité thermique.

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

$$\text{Pr} = \frac{v}{\chi} \quad (\text{II. 22})$$

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

$$\text{Gr} = \frac{\text{Ra}}{\text{Pr}} \quad (\text{II. 23})$$

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

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

$$\text{Nu} = 1 + 1.446 \times \left(1 - \frac{1708 \times (1.8 \times \sin\beta)^{1.6}}{\text{Ra} \times \cos\beta} \right) \times \left(1 - \frac{1708}{\text{Ra} \times \cos\beta} \right) + \left(\frac{\text{Ra} \times \cos\beta}{5830} \right)^{0.666} - 1 \quad (\text{II. 24})$$

β : angle d'inclinaison du capteur.

- La formule de Shewen et al (1996) dans le cas où ces deux plaques sont verticales [25]:

$$Nu = 1 + \left(1 + \frac{0.0665 \times Ra^{0.333}}{1 + \left(\frac{9600}{Ra}\right)^{0.25}}\right)^{0.5} \quad (II. 25)$$

- Une autre relation proposée est [1] :

$$Nu = 1.013 \quad Gr < 1700 + 47.8 \times \beta \quad (II. 26)$$

$$Nu = 2.5 + (0.0133 \times (90 - \beta)) \quad Gr > 80000 \quad (II. 27)$$

$$Nu = (0.06 + (3 \times 10^{-4} \times (90 - \beta))) \times Gr^{0.33} \quad \text{autrement} \quad (II. 28)$$

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

II.4.2.c. Détermination du coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

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

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

*Ecoulement laminaire (Re<2100) :

$$Nu = 1.86 \times Gz^{0.33} \quad (II. 29)$$

Si Re<100 le nombre de Nusselt est donné par :

$$Nu = 3.66 \quad (II.30)$$

*Ecoulement turbulent (Re>10000) :

$$Nu = 0.0155 \times Re^{0.83} \times Pr^{0.5} \quad (II. 31)$$

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

$$Re = \frac{\rho_f \times d_i \times v_e}{\eta_f} \quad (\text{II. 32})$$

μ_f : viscosité dynamique du fluide.

d_i : diamètre intérieur du conduit.

l : longueur du conduit.

ρ_f : masse volumique du fluide caloporteur.

v_e : vitesse de l'écoulement.

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

➤ Ecoulement laminaire dans la conduite :

La couche limite est supposée développée.

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

$$h_{caf} = 4.36 \times \frac{k_f}{d_i} \quad (\text{II. 33})$$

- * Si la paroi du tube est à température constante :

$$h_{caf} = 3.66 \times \frac{k_f}{d_i} \quad (\text{II. 34})$$

➤ Ecoulement turbulent dans une conduite :

$$h_{caf} = 0.023 \times \left(\frac{k_f}{d_i}\right) \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \quad (\text{II. 35})$$

Avec :

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

k_f : conductivité thermique du fluide caloporteur.

- Dans la référence [23], l'auteur a utilisé la formule de Gnielinski pour un régime transitoire et turbulent avec:

$$0.6 < Pr < 2000 \quad \text{et} \quad 2300 < Re < 10^6$$

$$Nu = \frac{\Omega}{8} \times \left(\frac{(Re - 10^3) \times Pr}{1 + \left(\left(12.7 \times \frac{\Omega^{0.5}}{8} \right) \times (Pr^{\frac{2}{3}} - 1) \right)} \times \left(1 + \left(\frac{di}{l} \right)^{2/3} \right) \right) \quad (II. 36)$$

Ω : coefficient de Darcy.

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

$$\Omega = 0.3164 \times Re^{-0.25} \quad (II. 37)$$

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

$$\Omega = 0.0054 + (0.3964 \times Re^{-0.3}) \quad (II. 38)$$

II.4.2.d. Détermination du coefficient de convection forcée entre l'absorbeur et la face intérieure de l'isolant

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

Ecoulement laminaire ($Re < 2100$)

➤ $Gz < 100$ (formule de Haussen):

$$Nu = 3.66 + \left(\frac{0.085 \times Gz}{1 + 0.047 \times Gz^{\frac{2}{3}}} \right) \times \left(\frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} \quad (II. 39)$$

➤ $Gz > 100$ (Seider State):

$$Nu = 1.86 \times Gz^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} + 0.87 \times \left(1 + 0.015 \times Gz^{\frac{1}{3}} \right) \quad (II. 40)$$

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

$$Nu = 0.116 \times \left(Re^{\frac{2}{3}} - 125 \right) \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} \quad (II. 41)$$

* Ecoulement turbulent ($Re > 10000$) :

$$Nu = 0.013 \times Re^{0.8} \times Pr^{\frac{1}{3}} \times \left(\frac{\eta_f}{\eta_{ii}} \right)^{0.14} \quad (II. 42)$$

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

II.4.3. Le rayonnement

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

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

$$q = \varepsilon \times \sigma \times T^4 \quad (\text{II. 43})$$

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

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$.

T : température absolue du corps.

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

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

II.4.3.a. Détermination du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et la plaque chauffante

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

$$h_{\text{rav}} = \sigma \times \frac{(T_{\text{ab}}^2 + T_{\text{v}}^2) \times (T_{\text{ab}} + T_{\text{v}})}{\frac{1}{\varepsilon_{\text{ab}}} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{v}}} - 1} \quad (\text{II. 44})$$

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

T_{vi} : température de la face intérieure de la vitre.

ϵ_v : émissivité de la vitre.

ϵ_{ab} : émissivité de l'absorbeur.

II.4.3.b. Détermination du coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel (ou l'isolant et le sol)

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

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

- En 1932, brunt a proposé une relation entre la température du ciel et la pression de vapeur d'eau.
- Dans [34], l'auteur a utilisé les deux relations suivantes :

$$T_c = T_a - 12 \quad (\text{II. 45})$$

$$T_c = T_a - 6 \quad (\text{II. 46})$$

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

$$T_c = 0.0552 \times T_a^{1.5} \quad (\text{II. 47})$$

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

$$T_c = 0.037536 \times T_a^{1.5} + 0.32 \times T_a \quad (\text{II. 48})$$

T_c : température du ciel.

T_a : température de l'ambiance.

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

$$T_c = T_a \times \left(0.8 + \frac{T_r - 273}{250}\right)^{0.25} \quad (\text{II. 49})$$

Le coefficient de transfert thermique par rayonnement entre la vitre et le ciel (ou l'isolant et le sol) est donné par :

$$h_{rvc} = \sigma \times \varepsilon_v \times (T_{ve} + T_c) \times (T_{ve}^2 + T_c^2) \quad (\text{II. 50})$$

$$h_{ric} = \sigma \times \varepsilon_i \times (T_{ie}^2 + T_c^2) \times (T_{ie} + T_c) \quad (\text{II. 51})$$

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

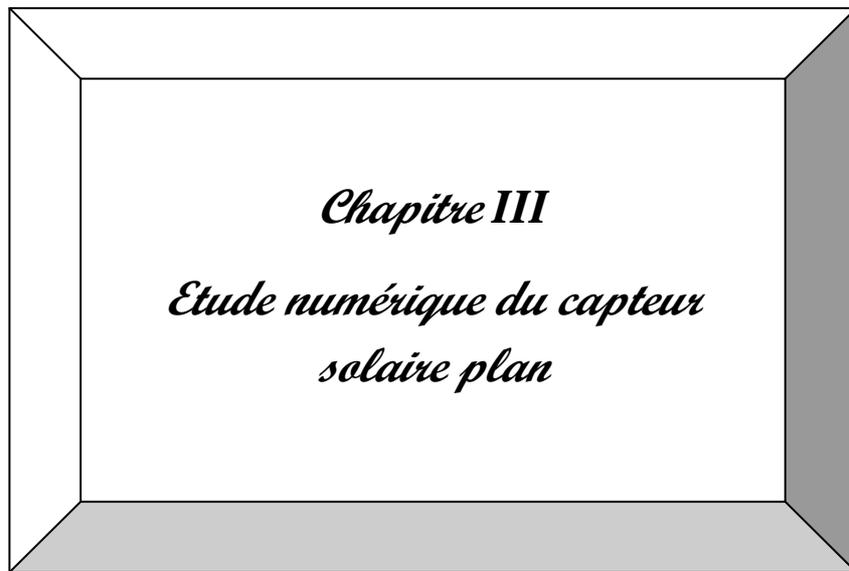
ε_v : émissivité de la vitre.

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

ε_i : émissivité de l'isolant.

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

H_{ric} : coefficient de transfert thermique par rayonnement entre



Chapitre III
Etude numérique du capteur
solaire plan

Ce chapitre est consacré à l'étude numérique du capteur. Nous présenterons les différents paramètres de fonctionnement, les puissances absorbées par le capteur ainsi qu'un état de l'art du capteur. Nous établirons les bilans thermiques, global et au niveau de chaque partie en régimes permanent et transitoire, les systèmes obtenus seront résolus par deux approches numériques.

L'étude numérique du capteur solaire plan fera l'objet de ce chapitre.

III.1. Les différents paramètres influant sur le rendement du capteur solaire plan

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

III.1.a. Les paramètres externes

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

III.1.b. Les paramètres internes

- 1- Les paramètres de position
 - Orientation, inclinaison et emplacement du capteur.
 - Capteur fixe ou suiveur du soleil.
- 2- Les paramètres de construction

Parmi lesquels nous citons :

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

- Couverture transparente
 - Propriétés optiques et thermophysiques.
 - Epaisseur.
 - Le nombre de vitrage et la forme.
- L'isolant
 - Propriétés thermophysiques et optiques.
 - Epaisseur.
- Fluide caloporteur
 - Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
 - Température d'entrée.
 - Propriétés thermophysiques.

II.1.c. Performances d'un capteur solaire plan

Selon [26], la norme C.E.C stipule que l'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané défini par :

$$\eta_i = \frac{p_u}{A_c \times G} \quad (\text{III. 1})$$

η_i : rendement instantané du capteur plan.

p_u : la puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

A_c : surface du capteur.

G : flux solaire global incident.

III.2. Etat de l'art des capteurs plans à eau et à air

De nombreux auteurs ont porté un intérêt particulier aux paramètres opérationnels mis en jeu afin d'améliorer les performances thermiques du capteur solaire plan.

III.2.1. Etude du capteur plan à air

✱ Dans le but de favoriser le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide de travail dans un capteur à air, **A.Amed Zaid et Al** [30] ont introduit des chicanes dans la vanne dynamique du capteur, lesquelles vont augmenter la section de passage de l'air, d'où l'augmentation du nombre de Reynolds et la création de la turbulence.

Les auteurs ont utilisé des chicanes Delta Centrées Longitudinalement (DCL), Ogivales Centrées Longitudinalement (OCL) et Transversales-Longitudinales (TL), placées sur l'isolant, sous l'absorbeur ou par la combinaison des deux (figures III.1 et III.2).



Figure III.1. Disposition des obstacles OCL



Figure III.2. Disposition des obstacles DCL

Leurs résultats expérimentaux ont montré que les chicanes (TL) présentent un rendement meilleur par rapport aux chicanes (DCL), (OCL).

✳ Dans le but de minimiser les pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, **Feyza Benyelles et Al** [31] ont proposé de placer un isolant " aérogel de silice " au dessus de l'absorbeur comme le montre la figure III.3.

Les auteurs ont choisi l'aérogel de silice pour ses propriétés. C'est un matériau solide à basse densité variant de 80 à 270 kg/m³, transparent, poreux (porosité de 35% à 90%). Son indice de réfraction est compris entre 1.2 à 1.05. Pour une épaisseur de l'ordre de 20mm, la transmittance solaire normale est de 90%. Sa conductivité thermique est de l'ordre de 0.02 W/m. K.

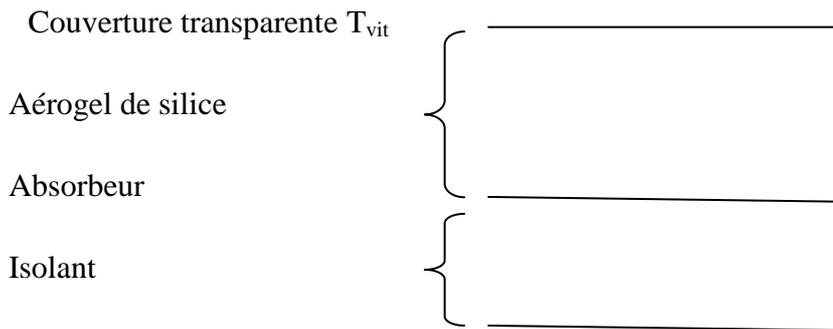


Figure III.3. Conception des capteurs à aérogel de silice

Plusieurs capteurs dans les mêmes conditions expérimentales ont été comparés:

- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur sélectif.
- Capteur double vitrage à absorbeur non sélectif.
- Capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif muni d'un isolant à aérogel de silice.

Les auteurs ont trouvé que la température de la vitre d'un capteur simple vitrage à absorbeur non sélectif peut atteindre 50°C, alors qu'elle n'atteint que 20 °C pour un absorbeur muni d'un isolant aérogel de silice. En outre, le coefficient de pertes thermiques vers l'avant de l'absorbeur, dans ce cas est minime. Ils ont déduit que l'aérogel de silice est un super isolant transparent de la face avant du capteur, et contribue ainsi à l'amélioration du rendement du capteur solaire.

☀️ Vue que le coefficient d'échange thermique de l'absorbeur pour les capteurs solaires à air est plus faible que celui des capteurs à l'eau, **F.Mokhtari et Al** [32] ont mené une étude expérimentale dans le but d'améliorer le contact plaque chauffante-air.

Les auteurs ont étudié trois configurations différentes [32] du capteur solaire à air :

- **Configuration 1** : l'air à chauffer passe sous l'absorbeur (figure III.4).
- **Configuration 2** : la plaque absorbante est placée sur la diagonale du capteur entre la couverture et l'isolant, l'entrée de l'air se trouve au dessus de l'absorbeur tandis que la sortie est située sous l'absorbeur. Elle est munie d'un orifice de section rectangulaire pour permettre l'évacuation de l'air chaud (figure III.5).

- **Configuration 3** : le passage de l'air se trouve entre la vitre et la plaque absorbante au dessus de celle-ci (figure III.6).

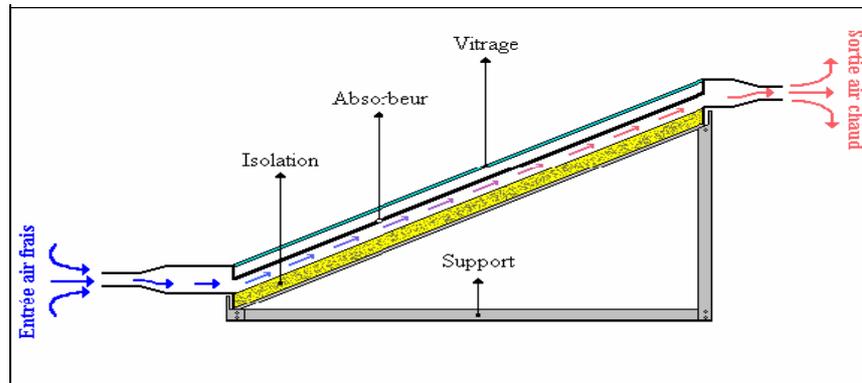


Figure III.4. Configuration 1

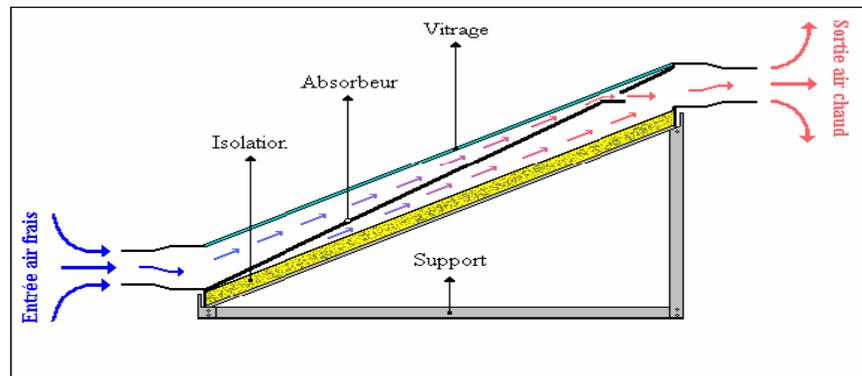


Figure III.5. Configuration 2

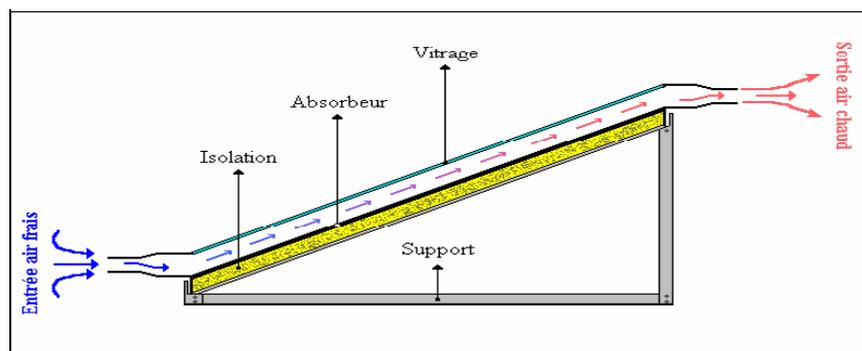


Figure III.6. Configuration 3

D'après les résultats expérimentaux trouvés, le transfert thermique est important quand il y a contact direct entre la plaque et l'air couplé à une double circulation de l'air, c'est donc la deuxième configuration qui a donné les meilleurs résultats [32].

✳ Dans le but d'améliorer les performances des capteurs solaires à air, **K. Aoues et al** [33] ont introduit dans la veine d'air mobile des chicanes qui jouent un rôle à double aspect, favorisant le transfert thermique au fluide caloporteur :

- Elles permettent de rendre turbulent l'écoulement à proximité de la plaque chaude.
- Elles prolongent le parcours du fluide caloporteur.

Le dispositif expérimental est illustré par la figure III.7.

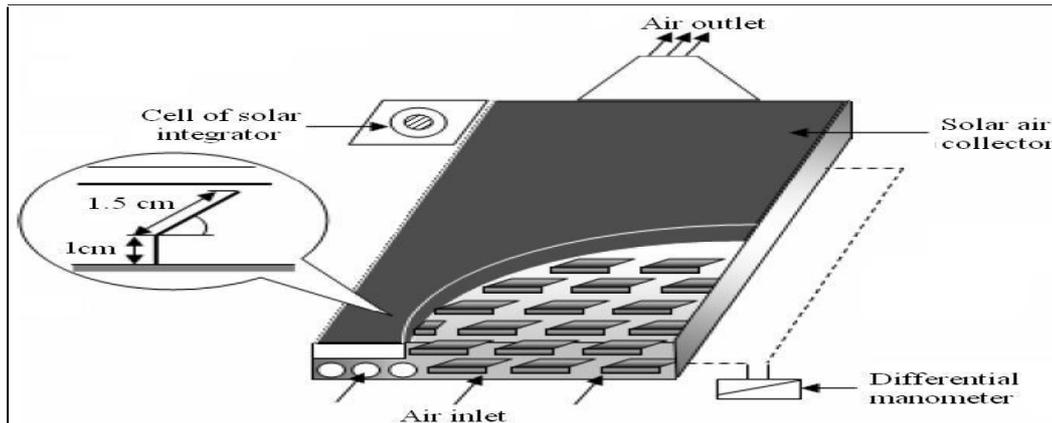


Figure III.7. Dispositif expérimental

La veine d'air dynamique du capteur [33] est de 25mm de hauteur, comprise entre la plaque absorbante et une plaque en acier galvanisé placée sur l'isolant, cette veine est équipée de rangées d'obstacles métalliques minces soudées perpendiculairement à l'écoulement de l'air sur la plaque inférieure. Ces obstacles présentent une différence dans la forme résidant dans la partie inclinée d'angle α respectivement égale à 60° et 120° . Ces chicanes sont espacées d'une distance respectivement à $d=10\text{cm}$ et $d=5\text{cm}$ suivant deux configuration A et B qui se différencient par le nombre de rangées respectivement égale à 152 et 256 chicanes (figure. III.8).

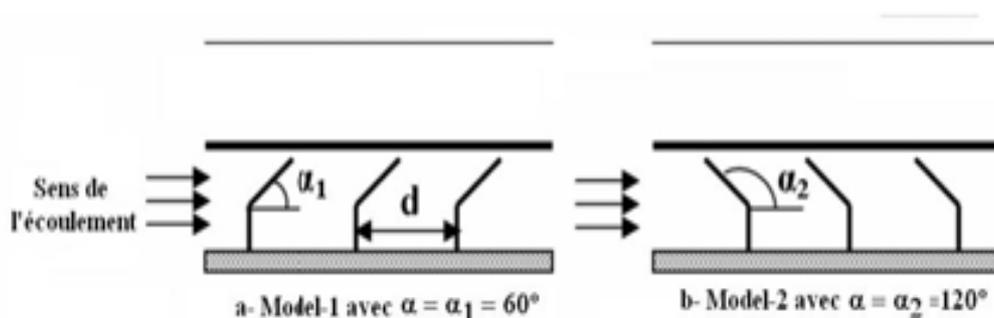


Figure III.8. Schéma descriptif des chicanes

Après une série de tests expérimentaux, les auteurs ont conclu que la géométrie de passage dans la section droite perpendiculaire à l'écoulement joue un rôle important et ont trouvé que les chicanes modèle 1 ($\alpha=60^\circ$) placées dans les configurations A1, B1 donnent les meilleurs résultats par rapport à ceux des configurations A2, B2 qui sont des chicanes modèles 2 ($\alpha=120^\circ$).

Cela s'explique par le fait que les chicanes du modèle 1 permettent l'orientation du fluide caloporteur en écoulement vers la plaque absorbante, d'où l'augmentation des échanges convectifs. Par contre, les chicanes du modèle 2 orientent le fluide caloporteur vers la plaque inférieure.

✿ **K. Aoues et Al** [32] ont mené un travail théorique en vue d'améliorer le coefficient de transfert convectif entre l'air et l'absorbeur, en plaçant des chicanes cylindriques perpendiculairement à l'écoulement dans la veine d'air dynamique entre l'absorbeur et l'isolant (figure III.9).

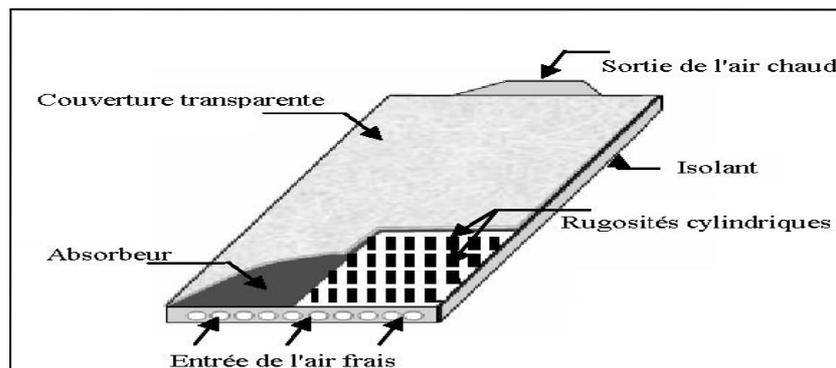


Figure III.9. Capteur plan à air muni de rugosités cylindriques

Les auteurs ont étudié les trois cas suivants (figure III.10):

- Le capteur plan à air dépourvu de chicanes.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en rangés alignés.
- Le capteur plan à air muni de chicanes cylindriques arrangées en quinconces.

Les auteurs ont trouvé que le meilleur rendement est obtenu avec des chicanes cylindriques arrangées en quinconce, et le plus bas pour le capteur lisse.

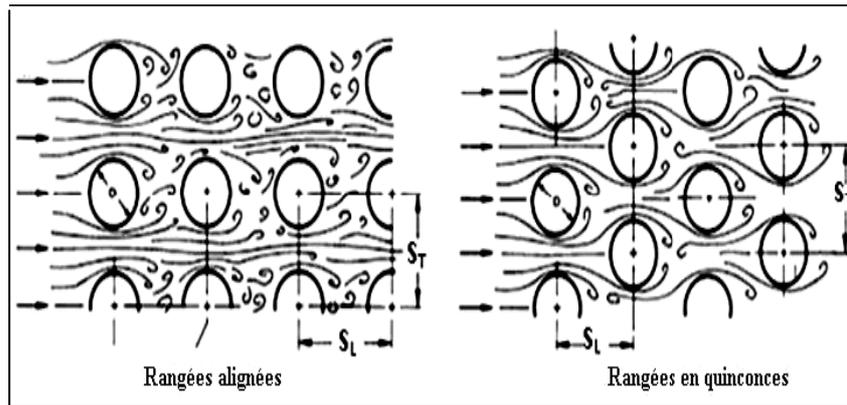


Figure III.10. Les différents arrangements des chicane cylindriques

✿ **A.Labed et al [34]** ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'améliorer les performances du capteur solaire plan à air en introduisant un nouveau modèle de rugosité artificielle.

Le système étudié est un capteur solaire plan à air à simple passe composé d'une seule vitre, d'une plaque absorbante en acier galvanisé peinte en noir mat, d'une plaque arrière en acier galvanisé placé sur l'isolant et d'une isolation arrière. Les rugosités artificielles sont de petits canaux, dont la base est de forme trapézoïdale d'une hauteur de 25 mm, elles sont placées entre les deux plaques en acier galvanisé (figure III.11).

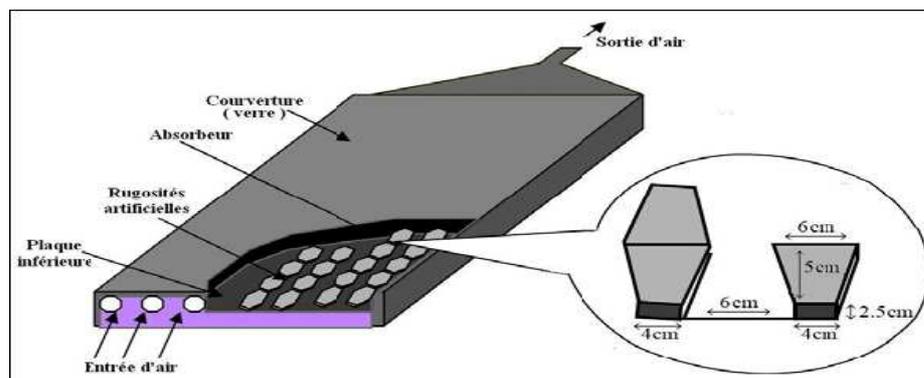


Figure III.11. Schéma du modèle expérimental

Les auteurs ont conclu que les chicanes introduites dans la veine d'air utile agissent favorablement sur le transfert thermique, cependant elles engendrent des pertes comparativement à un canal lisse.

Les résultats théoriques sont validés par les résultats expérimentaux.

III.2.2. Etude des capteurs solaires plans à eau

✱ **N.Bellel et al** [21] ont étudié théoriquement un capteur solaire plan à eau simple pour comparer deux configurations du réseau du fluide caloporteur, il s'agit d'un réseau en forme d'un serpentín et un autre en série.

Les auteurs ont validé les résultats obtenus théoriquement par un travail expérimental, et ont trouvé un écart de 10% estimé satisfaisant.

Après une étude comparative entre les deux configurations, les auteurs ont déduit que le capteur muni d'un réseau en serpentín est plus performant que celui muni d'un réseau de tubes en série.

✱ **H.Abdi et Al** [13] ont mené des travaux expérimental et théorique afin d'étudier l'effet de la forme géométrique du passage du fluide sur l'efficacité des capteurs dans le cas d'un contact direct eau-plaque absorbante.

Les auteurs ont utilisé deux configurations [13] de la plaque absorbante (figure III.12) l'une concave et l'autre convexe. Les dimensions du passage du fluide sont choisies de façon à avoir le même diamètre hydraulique par les deux configurations.

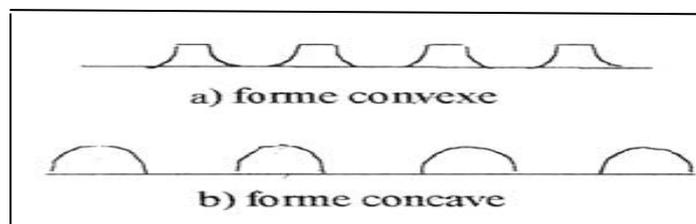


Figure III.12. Formes géométriques des plaques absorbantes

Ce travail a permis de conclure que le rendement du capteur dépend en plus des paramètres habituels (conditions extérieures, caractéristiques thermiques), des formes géométriques des plaques absorbantes. Le capteur muni d'une plaque absorbante de forme convexe donne un meilleur rendement.

Dans ce qui suit, nous exprimerons les puissances absorbées par les composants d'un capteur solaire plan à simple vitrage pour dresser le bilan énergétique de ce système en régimes permanent et transitoire.

III.3. Puissances absorbées par un capteur solaire plan avec simple vitrage

III.3.1. La puissance absorbée par la vitre

$$P_v = \alpha_v \times G \times A_v \quad (\text{III. 2})$$

Où :

P_v : puissance absorbée par la vitre.

α_v : absorptivité de la vitre.

A_v : surface de la vitre.

III.3.2. Puissance absorbée par l'absorbeur

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \times \tau_v \times G \times A_{ab} \quad (\text{III. 3})$$

Où :

P_{ab} : puissance absorbée par l'absorbeur.

A_{ab} : surface de l'absorbeur.

α_{ab} : absorptivité de l'absorbeur.

τ_v : transmissivité de la vitre.

III.4. Bilan thermique global du capteur plan en régimes permanent et transitoire

Les équations qui caractérisent le fonctionnement d'un capteur solaire en régimes permanent et transitoire sont données respectivement par [28] :

$$P_a = P_u + P' \quad (\text{III. 4})$$

$$P_a = P_u + P' + P_t \quad (\text{III. 5})$$

Où :

P_a : puissance incidente du rayonnement absorbé par unité de surface.

P' : pertes thermiques.

P_u : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur.

P_t : puissance stockée sous forme de chaleur vive dans les différents éléments du capteur lorsque le régime est transitoire.

III.5. Bilan énergétique du capteur solaire plan

Nous nous proposons dans ce qui suit d'établir les bilans thermiques du capteur solaire en régimes permanent et transitoire. Pour cela nous considérerons que chaque partie du capteur constitue un nœud, sur lequel nous établirons un bilan thermique (figure III.13).

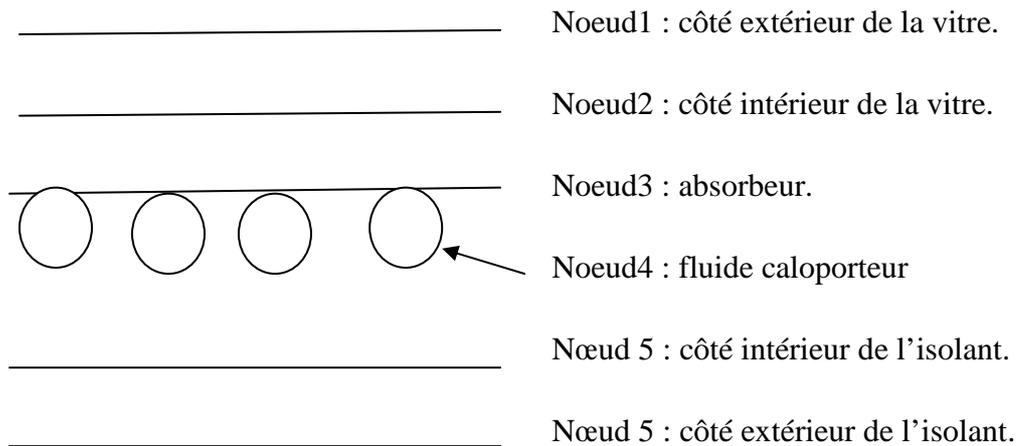


Figure III.13. Schématisation des différents nœuds du capteur

Soit une section quelconque du système à l'instant t , soit i un des milieux représentés dans cette section, m_i sa masse, c_{pi} sa chaleur spécifique et T_i sa température.

Le bilan au nœud i donne :

$$m_i \times c_{pi} \times \frac{dT_i}{dt} = \sum_{j=1}^n q_{ij} + P_i \quad (\text{III. 6})$$

P_i : terme de source ou de puits.

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

On pourra considérer que :

$$m_i \times c_{pi} \times \frac{dT_i}{dt} = 0 \quad (\text{III. 7})$$

- * Un capteur à inertie thermique négligeable (faible masse de ses composants, ou faible chaleur spécifique).
- * Le régime d'écoulement est permanent.

Avant d'établir les bilans énergétiques globaux en régimes permanent et transitoire du capteur plan, il faut déterminer en premier lieu, les principaux transferts de chaleur à l'intérieur et à l'extérieur du capteur, à savoir :

La vitre reçoit :

- * La puissance P_v rayonnée par le soleil et absorbée par la vitre (l'équation III.1).
- * Une quantité d'énergie q_{rav} cédée par l'absorbeur par rayonnement :

$$q_{rav} = h_{rav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{III. 8})$$

- * Une quantité d'énergie q_{cav} cédée par l'absorbeur par convection :

$$q_{cav} = h_{cav} \times A_v \times (T_{ab} - T_{vi}) \quad (\text{III. 9})$$

La vitre cède :

- * Une quantité d'énergie par convection q_{cva} vers le milieu ambiant :

$$q_{cva} = h_{cva} \times A_v \times (T_{ve} - T_a) \quad (\text{III. 10})$$

- * Une quantité d'énergie par rayonnement q_{rvc} vers le ciel :

$$q_{rvc} = h_{rvc} \times A_v \times (T_{ve} - T_c) \quad (\text{III. 11})$$

L'absorbeur reçoit :

- * Une puissance rayonnée par le soleil, transmise par la vitre et absorbée par l'absorbeur P_a (l'équation III.2):

L'absorbeur cède :

- * Une quantité d'énergie par convection au fluide de travail q_{caf} :

$$q_{caf} = h_{caf} \times A_{fa} \times (T_{ab} - T_f) \quad (\text{III. 12})$$

- * Une quantité d'énergie par convection q_{cav} à la vitre (équation III.9).
- * Une quantité d'énergie par rayonnement q_{rav} à la vitre (équation III.8).

- * Une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} à l'isolant (équation II.2).

Le fluide reçoit :

- * Une quantité d'énergie par convection q_{caf} de l'absorbeur (équation III.12).

Le fluide cède :

- * Une quantité d'énergie par convection q_{cfi} à l'isolant :

$$q_{cfi} = h_{cfi} \times A_{fi} \times (T_f - T_{ii}) \quad (\text{III. 13})$$

L'isolant reçoit :

- * Une quantité d'énergie par convection q_{cfi} cédée par le fluide caloporteur (équation III.13).
- * Une quantité d'énergie par conduction q_{cdai} cédée par l'absorbeur (équation II.2).

L'isolant cède :

- * Une quantité d'énergie par rayonnement q_{ris} au sol :

$$q_{ris} = h_{ris} \times A_i \times (T_{ie} - T_s) \quad (\text{III. 14})$$

- * Une quantité d'énergie par convection q_{cia} au milieu ambiant :

$$q_{cia} = h_{cia} \times A_i \times (T_{ie} - T_a) \quad (\text{III. 15})$$

III.5.1. Bilan thermique du capteur solaire en régime permanent

Il est nécessaire d'avancer certaines hypothèses afin d'avoir une simulation approchée du système étudié en régime permanent:

- * Le soleil est assimilé à un corps noir.
- * Le régime d'écoulement est permanent.
- * Les propriétés des matériaux sont supposées constantes.
- * La température du sol est prise égale à la température de l'ambiance.
- * Le vent est supposé soufflant parallèlement aux faces du système.
- * Les surfaces d'échange de chaleur sont supposées grises et diffusantes.
- * Le rayonnement diffus atmosphérique est supposé isotrope.
- * La température de la plaque absorbante est supposée égale à celle des tubes.

- * Les différents milieux solides ont une température uniforme dans un plan normal au sens de l'écoulement.
- * Les flux de chaleur sont unidimensionnels.
- * La couverture transparente est propre.
- * Les parois latérales sont supposées à des températures constantes.
- * Le fluide caloporteur utilisé est de l'eau pure.

- **Bilan thermique au niveau de la face extérieure de la vitre**

$$\frac{pv}{2} + \frac{kv}{ev} = qcva + qrvc \quad (\text{III. 16})$$

kv : conductivité thermique de la vitre

ev : épaisseur de la vitre.

- **Bilan thermique au niveau du côté intérieur de la vitre**

$$\frac{pv}{2} + qrav + qcav = \frac{kv}{ev} \quad (\text{III. 17})$$

- **Bilan thermique au niveau l'absorbeur**

$$Pab = qcav + qcav + qrav + qcda \quad (\text{III.18})$$

- **Bilan thermique au niveau du fluide caloporteur**

$$qcav = qcfi \quad (\text{III.19})$$

- **Bilan thermique au niveau de la face intérieure de l'isolant**

$$\frac{ki}{ei} = qcfi + qcda \quad (\text{III. 20})$$

ki : conductivité thermique de l'isolant.

ei : épaisseur de l'isolant.

- **Bilan thermique au niveau de la face extérieure de l'isolant**

$$\frac{ki}{ei} = qris + qcia \quad (\text{III. 21})$$

Après établissement du bilan thermique du capteur solaire plan en régime permanent, on a obtenu un système de six équations algébriques à résoudre par la méthode itérative de Gauss-Seidel, où il sera transformé en une forma matricielle de la forme $\mathbf{AxT}=\mathbf{B}$.

III.5.2. Bilan thermique du capteur en régime transitoire

Les hypothèses adoptées sont similaires à celles utilisées pour le régime permanent sauf que le régime dans ce cas est transitoire.

Pour formuler les bilans thermiques des différents nœuds en régime transitoire, nous utilisons l'équation III.6 :

- **Bilan thermique au niveau de la face extérieure de la vitre**

En utilisant les équations (III.1), (III.9) et (III.10) :

Le bilan thermique de la face extérieure de la vitre est donné par :

$$\frac{mv \times cpv}{2} \times \frac{dTve}{dt} = \frac{pv}{2} + \left(\frac{kv}{ev}\right) \times (Tvi - Tve) - qcva - qrvc \quad (III. 22)$$

- **Bilan thermique au niveau de la face intérieure de la vitre**

En utilisant les équations (III.1.), (III.7) et (III.8):

Le bilan thermique de la face intérieure de la vitre est donné par :

$$\frac{mv \times cpv}{2} \times \frac{dTvi}{dt} = \frac{pv}{2} - \left(\frac{kv}{ev}\right) \times (Tvi - Tve) + qcav + qrav \quad (III. 23)$$

- **Bilan thermique au niveau de l'absorbeur**

En utilisant les équations (III.1), (III.7), (III.8) et (III.11):

Le bilan thermique de l'absorbeur est donné par :

$$mab \times cpab \times \frac{dTab}{dt} = pab - qcav - qrav - qcda - qcfi \quad (III. 24)$$

- **Bilan thermique au niveau du fluide caloporteur**

En utilisant les équations (III.11) et (III.12) :

Le bilan thermique du fluide caloporteur est donné par :

$$m_{cir} \times c_{pf} \times (T_{fs} - T_{fe}) = q_{caf} - q_{cfi} \quad (III. 25)$$

- **Bilan thermique au niveau la face intérieure de l'isolant**

En utilisant les équations (III.1) et (III.12):

Le bilan thermique du côté intérieur de l'isolant :

$$\frac{m_i \times c_{pi}}{2} \times \frac{dT_{ii}}{dt} = - \left(\frac{k_i}{e_i} \right) \times (T_{ii} - T_{ie}) + q_{cfi} + q_{cdai} \quad (III. 26)$$

- **Bilan thermique au niveau la face extérieure de l'isolant**

En utilisant les équations (III.1), (III.13) et (III.14) :

Le bilan thermique de la face extérieure de l'isolant :

$$\frac{m_i \times c_{pi}}{2} \times \frac{dT_{ie}}{dt} = \left(\frac{k_i}{e_i} \right) \times (T_{ii} - T_{ie}) - q_{cia} - q_{ris} \quad (III. 27)$$

Avec:

m_v , m_a , m_i : masses respectives de la vitre, l'absorbeur et de l'isolant.

m_{cir} : débit de circulation du fluide caloporteur.

c_{pv} , c_{pa} , c_{pf} , c_{pi} : chaleurs massiques respectivement de la vitre, l'absorbeur, le fluide caloporteur et l'isolant.

A la fin, nous avons obtenu un système de six équations (III.22), (III.23), (III.24), (III.25), (III.26) et (III.27) qui peut être résolu par deux méthodes numériques :

- La méthode de Gauss-Seidel, en discrétisant d'abord les équations par la méthode des différences finies en utilisant un schéma explicite.
- La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, où il faut mettre le système d'équations précédent sous la forme suivante :

$$f(T_{ve}) = \frac{dT_{ve}}{dt} = \frac{2}{m_v \times c_{pv}} \times \left(\frac{p_v}{2} + \left(\frac{k_v}{e_v} \right) \times (T_{vi} - T_{ve}) - q_{cva} - q_{rvc} \right) \quad (III. 28)$$

$$f(T_{vi}) = \frac{dT_{vi}}{dt} = \frac{2}{m_v \times c_{pv}} \times \left(\frac{p_v}{2} - \left(\frac{k_v}{e_v} \right) \times (T_{vi} - T_{ve}) + q_{cav} + q_{rav} \right) \quad (III. 29)$$

$$f(T_{ab}) = \frac{dT_{ab}}{dt} = \frac{1}{m_{ab} \times c_{pab}} \times (p_{ab} - q_{cav} - q_{rav} - q_{cdai} - q_{cfi}) \quad (\text{III. 30})$$

$$f(T_f) = \frac{dT_f}{dt} = \frac{1}{m_f \times c_{pf}} \times (q_{caf} - q_{cfi}) \quad (\text{III. 31})$$

$$f(T_{ii}) = \frac{dT_{ii}}{dt} = \frac{2}{m_i \times c_{pi}} \times \left(-\left(\frac{k_i}{e_i}\right)\right) \times (T_{ii} - T_{ie}) + q_{cfi} + q_{cdai} \quad (\text{III. 32})$$

$$f(T_{ie}) = \frac{dT_{ie}}{dt} = \frac{2}{m_i \times c_{pi}} \times \left(\left(\frac{k_i}{e_i}\right)\right) \times (T_{ii} - T_{ie}) - q_{cia} - q_{ris} \quad (\text{III. 33})$$

On a ainsi obtenu un système de six équations différentielles ordinaires non linéaires, non autonome et couplées.

III.6. Traitement informatique

III.6.1. Principe de simulation en régime permanent

On va utiliser la méthode suivie par Hottel, Whillier et Bliss qui suppose en régime permanent, que les températures moyennes de chaque élément du capteur sont uniformes et constantes sur tout l'élément en négligeant les effets transitoires, cette méthode constitue un outil commode pour un calcul de conception, bien qu'il faille, là aussi procéder à des itérations [12].

III.6.2. Principe de simulation en régime transitoire

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.

Cette méthode nécessite des calculs numériques qui rendent indispensable l'usage de l'ordinateur [12].

III.6.3. Le programme principal en régime permanent

- La première étape : entrée des données et calcul des constantes.
- La deuxième étape : calcul des différents échanges thermiques indépendants de la température, qui sont : les coefficients d'échange par conduction entre les deux faces de la vitre, les deux faces de l'isolant, entre l'absorbeur et l'isolant ainsi que le coefficient d'échange convectif entre le capteur et le vent.
- 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 thermophysiques du fluide caloporteur à savoir :
 - * La masse volumique.
 - * La conductivité thermique.
 - * La viscosité cinématique.
 - * La chaleur massique.
 - * Le nombre de Prandtl.
 - Les coefficients d'échange thermique, à savoir :
 - * Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voûte 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.
 - * Le coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant.
 - * Le coefficient d'échange par rayonnement entre l'isolant et le sol.
- ~ Résolution du système d'équations par la méthode de Gauss-Seidel.
- La quatrième étape : calcul du rendement instantané du capteur.

Toutes ces étapes sont représentées dans les organigrammes qui suivent. Le programme principal a été développé en langage Fortran.

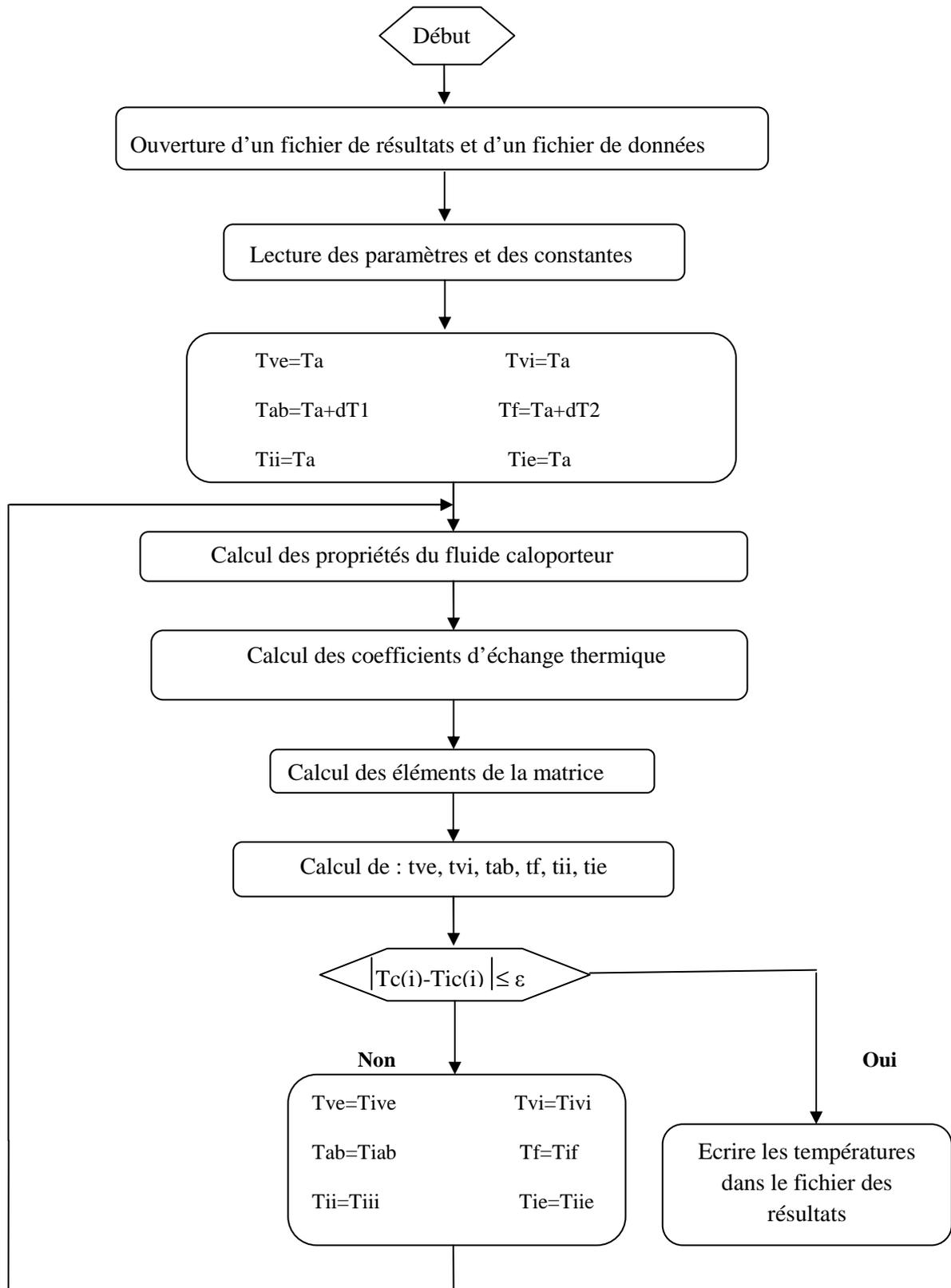
III.6.4. Le programme principal en régime transitoire

Le programme de calcul est le même pour les deux méthodes de résolution : la méthode itérative de Gauss-Seidel et la méthode de R.K.4 :

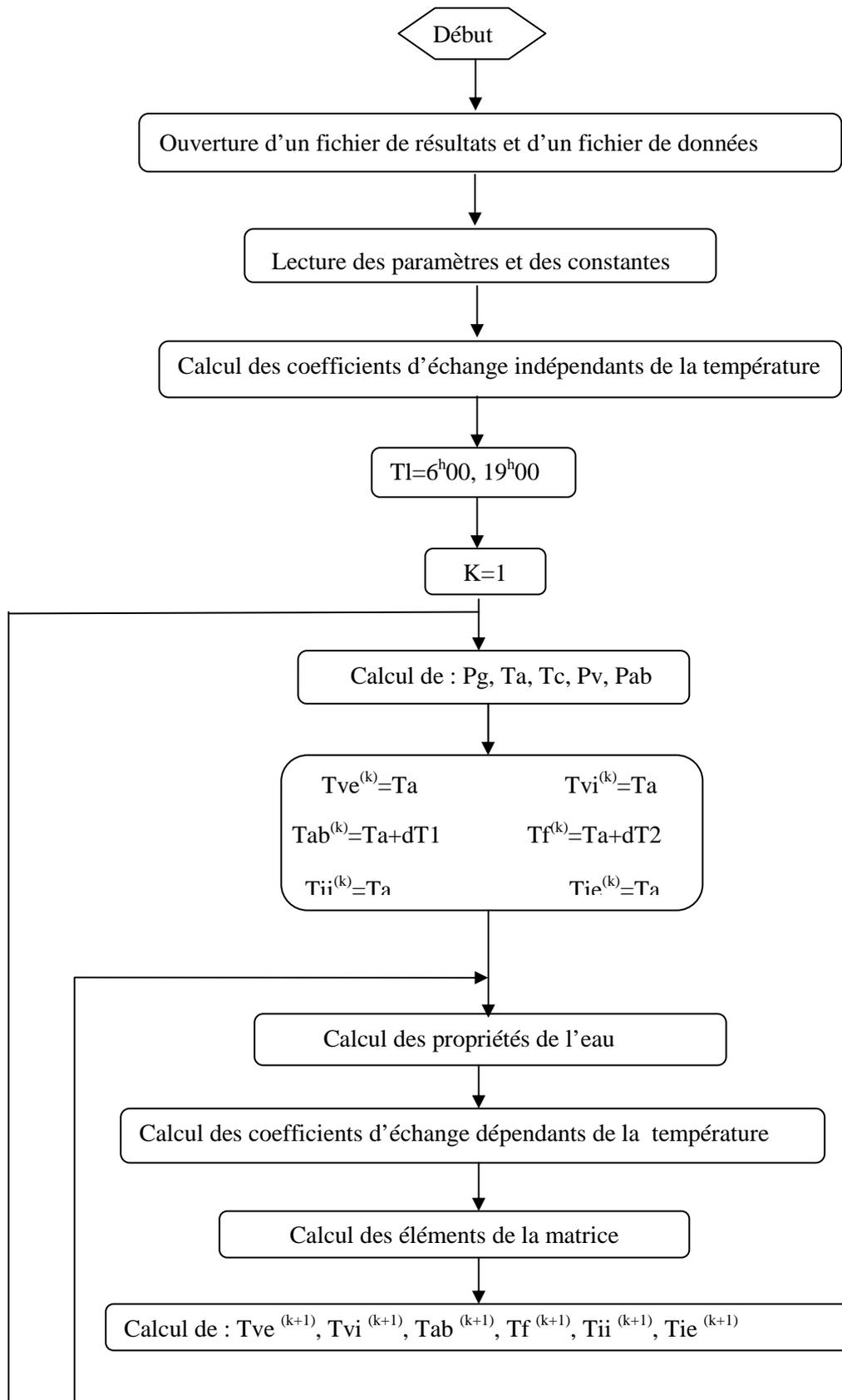
- La première étape : le calcul des différents échanges thermiques indépendants de la température, qui sont : les coefficients d'échange par conduction entre les deux faces de la vitre, les deux faces de l'isolant, entre l'absorbeur et l'isolant ainsi que le coefficient d'échange convectif entre le capteur et le vent.

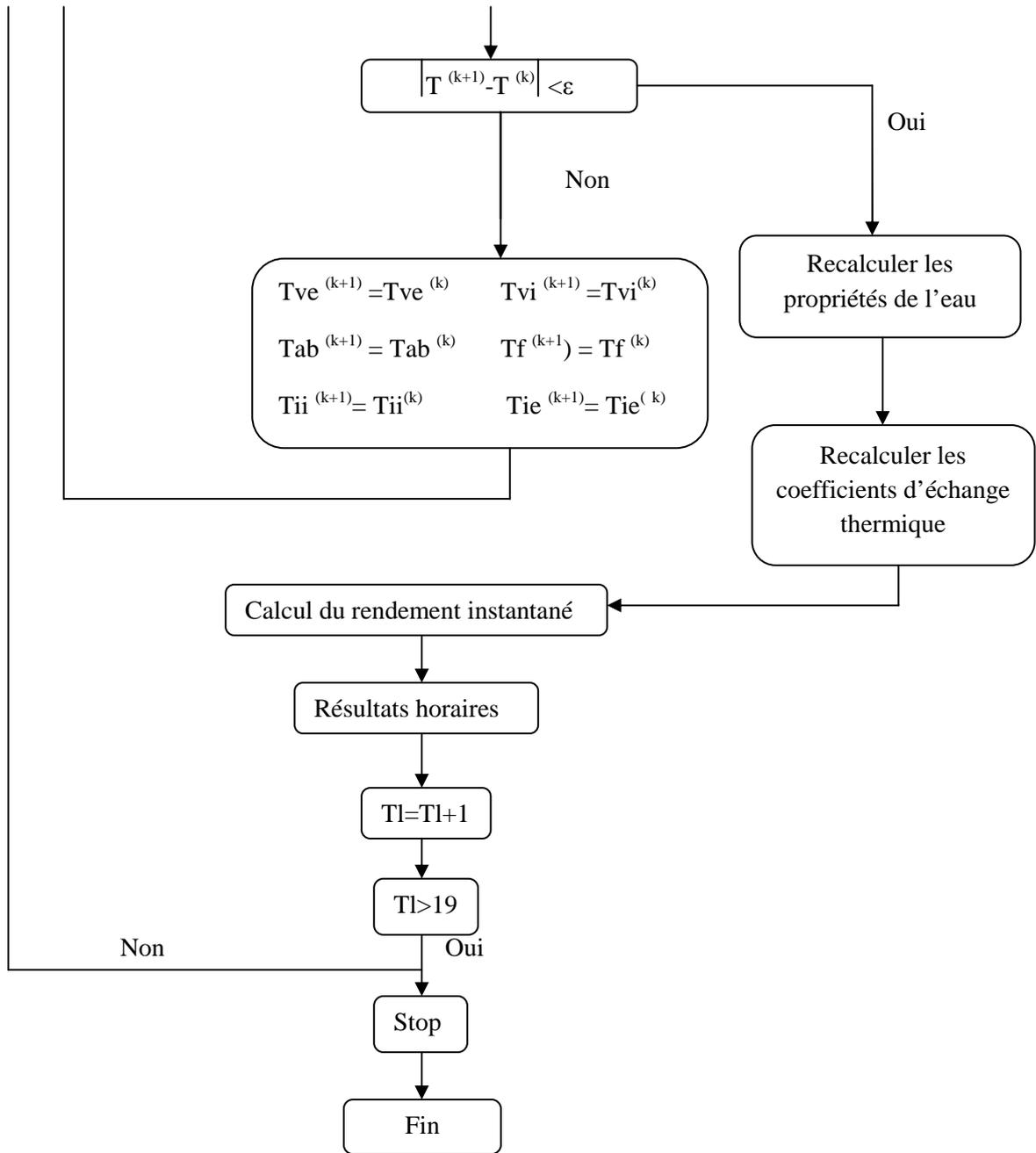
- La deuxième étape : on choisit un intervalle de temps pour effectuer les calculs (entre 6h00 du matin et 19h00) et on calcule pour chaque pas de temps les paramètres suivants :
 - Le rayonnement solaire frappant un plan incliné.
 - La puissance solaire absorbée par l'absorbeur et la vitre du capteur.
 - 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 thermophysiques du fluide caloporteur à savoir :
 - * La masse volumique.
 - * La conductivité thermique.
 - * La viscosité cinématique.
 - * La chaleur massique.
 - * Le nombre de Prandtl.
 - Les coefficients d'échange thermique, à savoir :
 - * Le coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et la voûte 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.
 - * Le coefficient d'échange par convection entre le fluide caloporteur et l'isolant.
 - * Le coefficient d'échange par rayonnement entre l'isolant et le sol.
 - ~ Résolution du système d'équations par la méthode de Gauss-Seidel et de RK4.
- 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.6.5. L'organigramme général pour le régime permanent

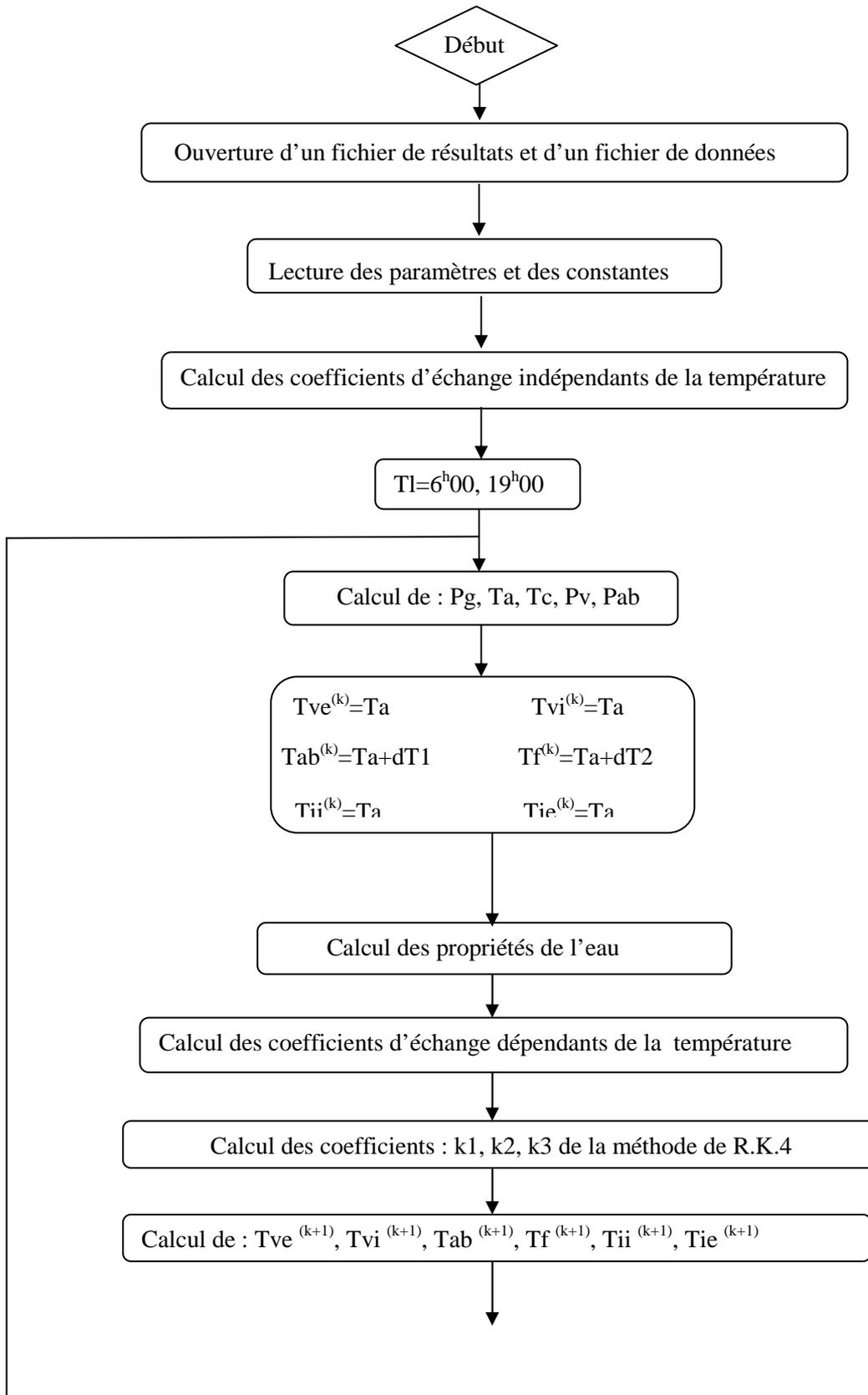


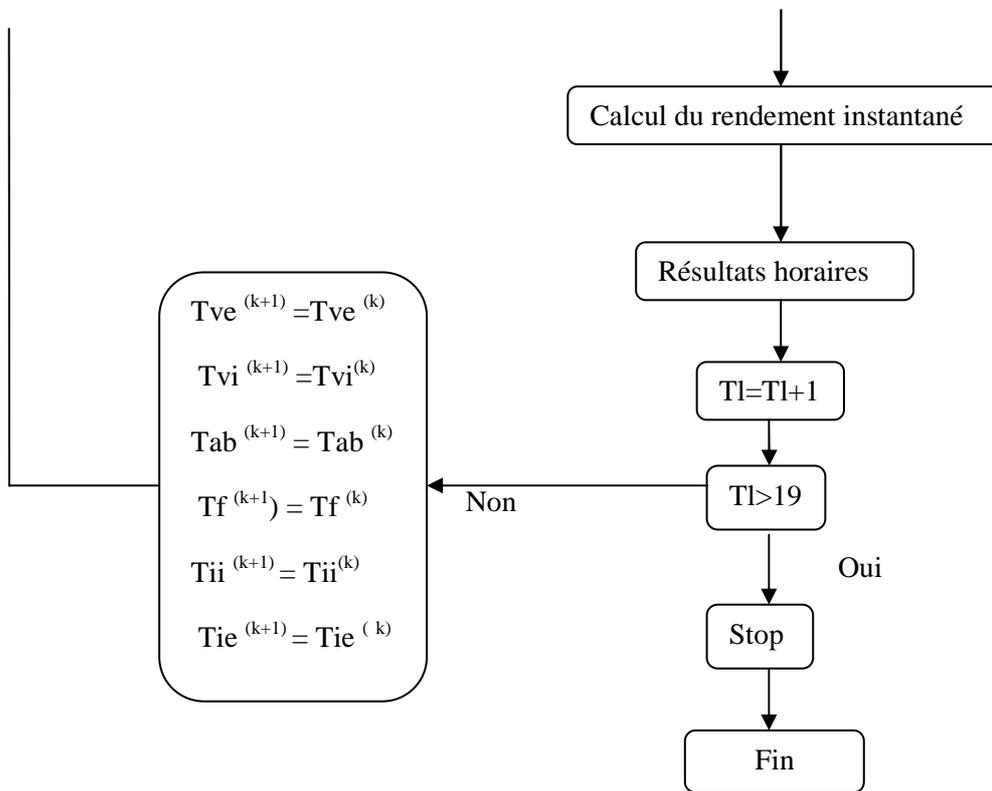
III.6.6. L'organigramme général pour le régime transitoire (méthode de Gauss-Seidel)

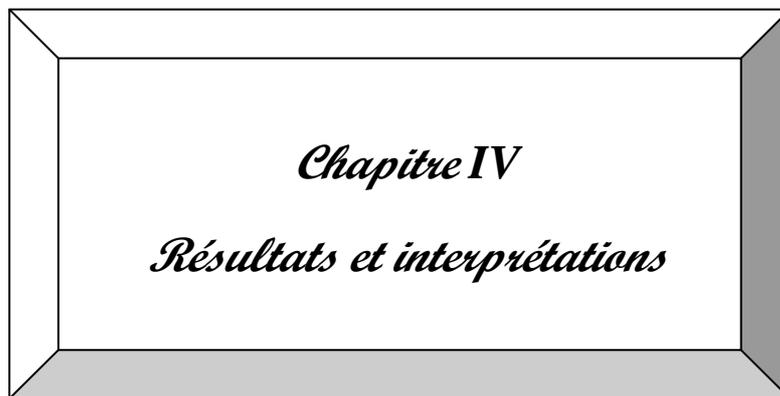




III.6.7. L'organigramme général pour le régime transitoire (méthode de Runge Kutta d'ordre 4)







Chapitre IV
Résultats et interprétations

L'ensemble des résultats obtenus dans le cadre de ce travail, ainsi que leurs interprétations constituent ce dernier chapitre

Introduction

La résolution du système d'équations des bilans thermiques au niveau de chaque partie du capteur par deux méthodes numériques, la méthode itérative de Gauss-Seidel et la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4, nous a permis d'obtenir un ensemble de résultats numériques que nous avons validé par un travail expérimental mené au Centre de Développement des Energies Renouvelables à Bouzareah [13].

Le capteur solaire plan étudié présente les caractéristiques suivantes [13]:

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 = 2.07 m ² Doté d'une surface noire sélective
Isolation	Laine de verre Le fond=50 mm Les cotés=20 mm
Vitrage	Epaisseur=4 mm Transmissivité=0.83

Tableau IV.1. Caractéristiques du capteur plan étudié [13]

L'expérience a été faite le 10 octobre 2007 à Bouzareah de coordonnées géographiques:

Latitude 36,8° nord,

Longitude 3.09°,

Altitude 345 m.

Dans cette partie du mémoire, nous étudierons l'effet des paramètres opérationnels internes et externes sur le rendement instantané du capteur solaire en régimes permanent et transitoire, à ce dernier nous accorderons un intérêt particulier à cause de son caractère réaliste.

IV.1. Etude de l'effet des paramètres opérationnels sur le rendement instantané du capteur solaire plan à eau en régime permanent

IV.1.1. Effet du rayonnement global sur les températures des différents composants du capteur

L'analyse des courbes de la figure IV.1 permet de remarquer que la température de l'absorbeur est la plus élevée, ce qui s'explique aisément par son facteur d'absorption solaire élevé. Puis, dans un ordre décroissant, nous avons la température du fluide caloporteur résultant du coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur, ensuite la température de la face intérieure de l'isolant qui se trouve directement sous l'absorbeur dont la conductivité thermique est élevée, puis la température de la face intérieure de la vitre du fait de l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement I.R et par convection d'autre part.

On notera que la face extérieure de la vitre généralement soumise à l'action du vent a une température légèrement inférieure à celle de la face intérieure.

La température la moins élevée est celle de la face extérieure de l'isolant résultant d'une part de sa faible conductivité thermique et d'autre part de l'effet du vent.

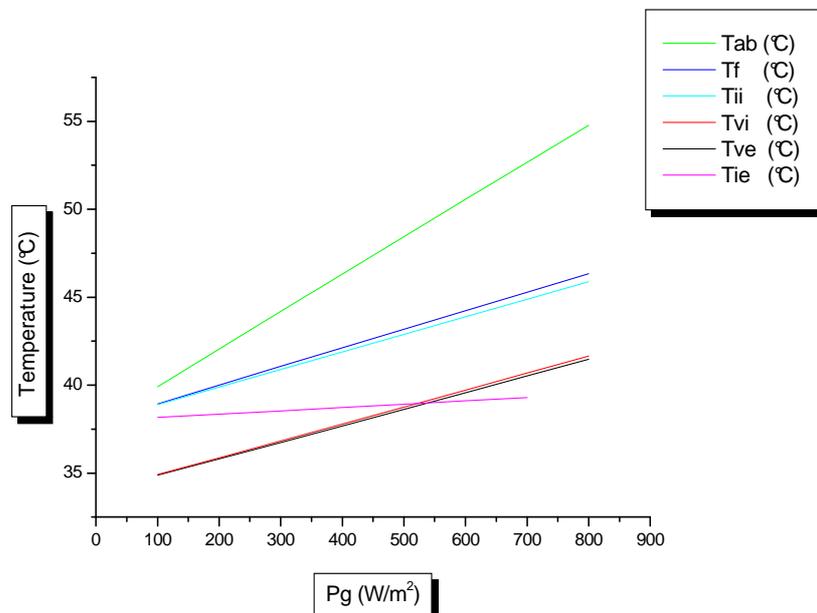


Figure IV.1. Variation des températures des composants du capteur en fonction du rayonnement global

IV.1.2. Effet du rayonnement global

La figure IV.2 montre que le rendement instantané du capteur est une fonction croissante du rayonnement solaire global, ceci s'explique par la relation qui existe entre l'énergie utile récupérée par le fluide de travail et le rayonnement solaire global.

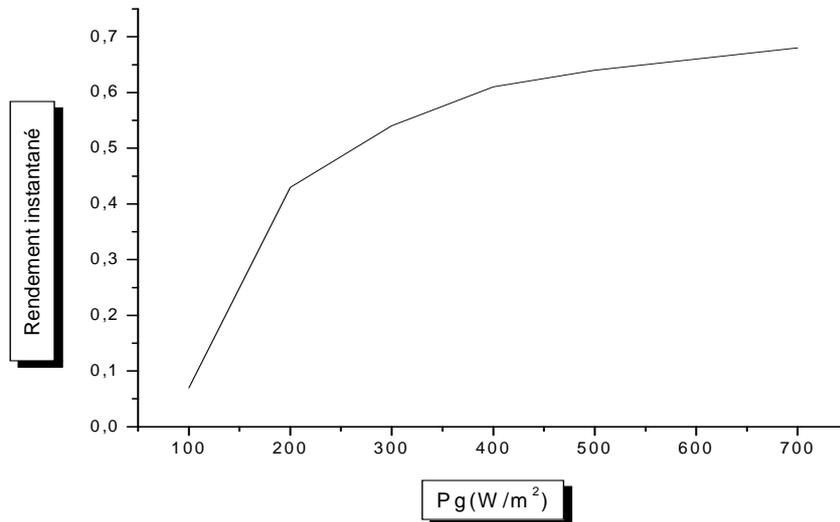


Figure IV.2. Variation du rendement instantané en fonction du rayonnement global

IV.1.3. Effet de la température ambiante

Il est aisé de remarquer sur la figure IV.3 l'allure croissante de la courbe de variation du rendement instantané du capteur en fonction de la température ambiante. En effet, un abaissement de la température ambiante conduit à une diminution des températures des composants du capteur et par conséquent à un rendement moindre.

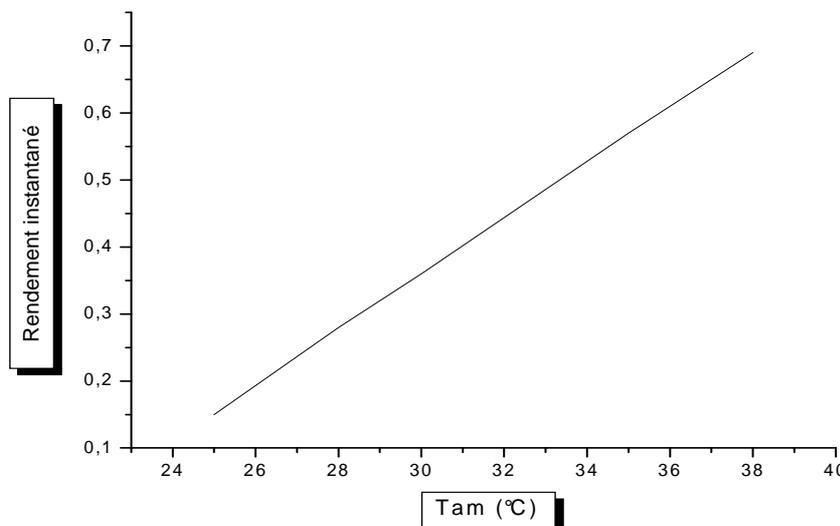


Figure IV.3. Variation du rendement instantané avec la température ambiante

IV.1.4. Effet de la chaleur spécifique

La chaleur spécifique est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du fluide caloporteur pour accroître sa température de 1 degré, par conséquent, plus la température du fluide croît (du fait de l'augmentation de la puissance solaire), plus son agitation thermique s'élève d'où l'augmentation de la chaleur spécifique, ce fait explique la relation de proportionnalité qui existe entre la chaleur spécifique du fluide caloporteur et le rendement instantané du capteur (figure IV.4).

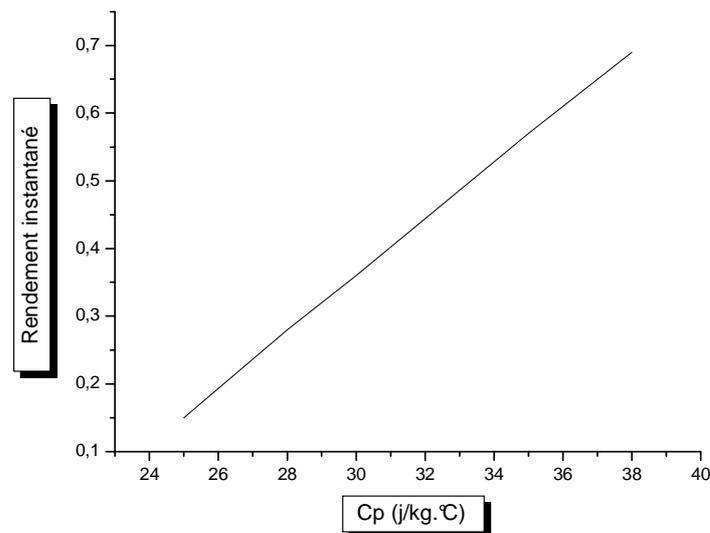


Figure IV.4. Variation du rendement instantané en fonction de la chaleur spécifique

IV.1.5. Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur

L'effet de la température d'entrée du fluide caloporteur sur le rendement instantané du capteur solaire est mis en évidence sur la figure IV.5 qui permet d'observer que pour une température de sortie donnée, l'augmentation de la température d'entrée du fluide conduit à une diminution du rendement instantané.

En effet, l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur étant étroitement liée à l'écart de température entre la sortie et l'entrée du fluide, il s'ensuit un abaissement de celle-ci et par conséquent du rendement instantané.

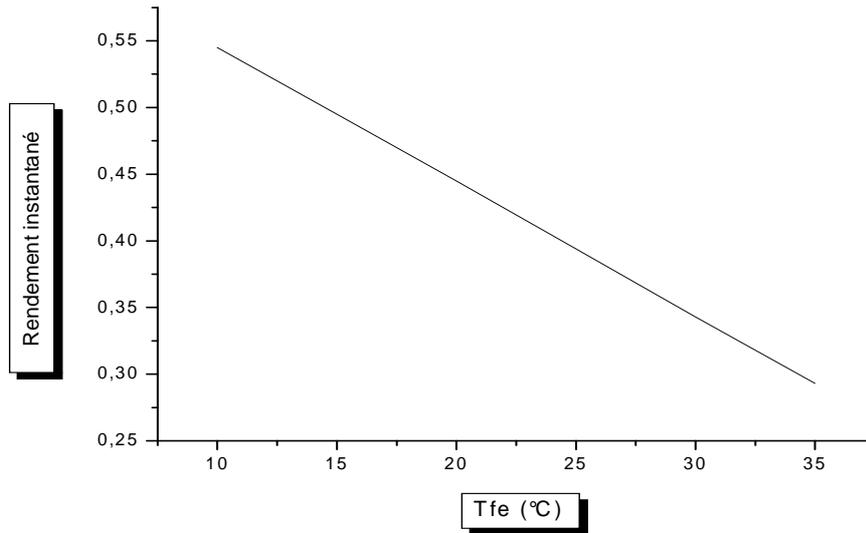


Figure IV.5. Variation du rendement instantané en fonction de la température d'entrée du fluide caloporteur

IV.1.6. Effet du débit

La figure IV.6 montre clairement que le rendement instantané du capteur solaire est une fonction linéaire croissante du débit du fluide.

En fait, l'augmentation du débit conduit l'écoulement du fluide vers la turbulence ce qui favorisera le transfert thermique convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur.

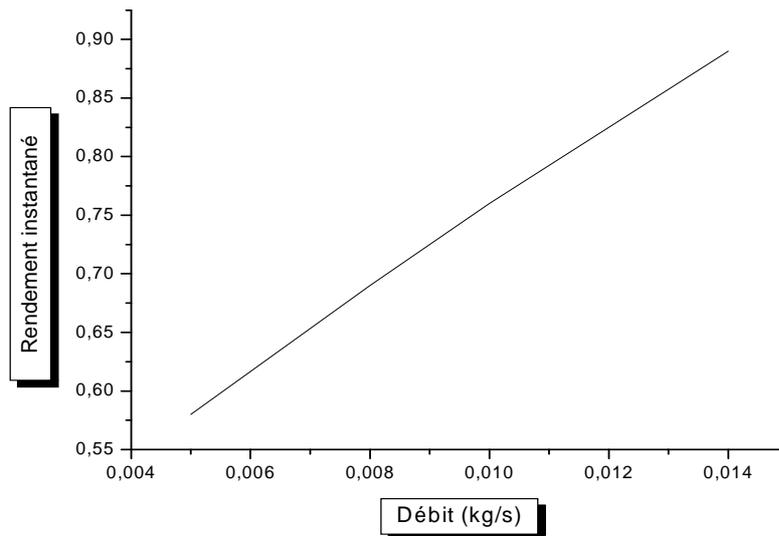


Figure IV.6. Variation du rendement instantané du capteur plan en fonction du débit

IV.2. Effet des paramètres opérationnels sur le rendement instantané du capteur solaire plan à eau en régime transitoire

IV.2.1. Variation temporelle des puissances solaires reçue et absorbées

L'évolution temporelle du rayonnement solaire global reçu par unité de surface plane horizontale et des puissances absorbées par la vitre et l'absorbeur du capteur solaire est illustrée par la figure IV.7.

Il apparait nettement sur cette figure que la puissance solaire est maximale entre 12^h00 et 14^h00, ce qui peut être expliqué par la hauteur du soleil et la masse atmosphérique.

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

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

La puissance absorbée par l'absorbeur est importante du fait de son coefficient d'absorption élevé, contrairement à la couverture transparente qui présente une puissance absorbée très faible, ceci est dû à ses propriétés optiques à savoir, son faible coefficient d'absorption et son coefficient de transmission élevé, le même résultat est obtenu dans [1], [7].

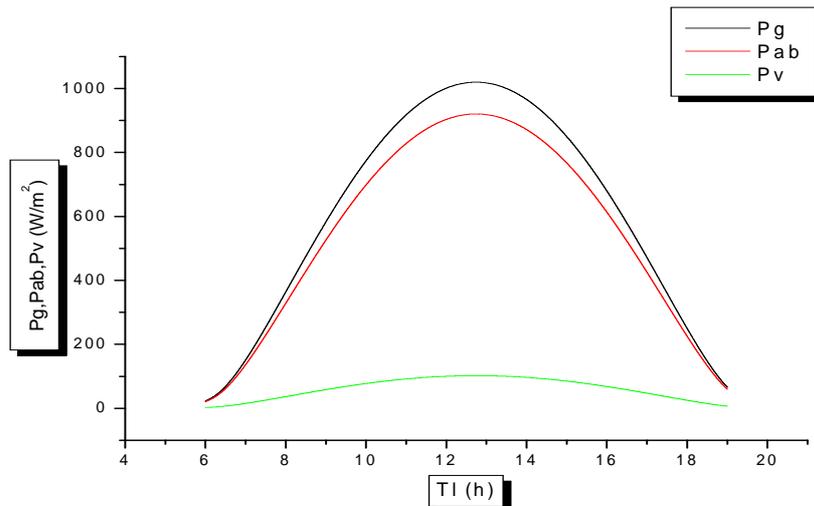


Figure IV.7. Variation temporelle des puissances solaires reçues et absorbées

IV.2.2. Variation temporelle des températures de l’ambiance et du ciel

La température du ciel varie en fonction de celle de l’ambiance (figure IV.8), il s’ensuit que les courbes représentatives de l’évolution temporelle des températures de l’ambiance et du ciel ont la même allure, elles atteignent leurs valeurs maximales entre 13^h00 et 15^h00 tout comme le rayonnement global, cela s’explique par l’effet de serre :

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

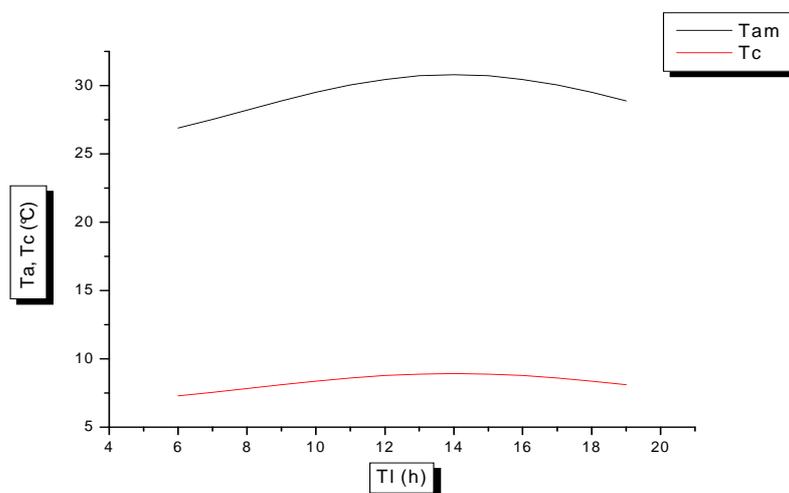


Figure IV.8. Variation temporelle des températures de l’ambiance et du ciel

IV.2.3. Validation des résultats

La confrontation des résultats numériques obtenus par la méthode de Gauss-Seidel et de Runge Kutta d'ordre 4 avec les résultats issus de l'expérience [13] pour les variations temporelles de la température du fluide (figure IV.9), a permis de noter que les valeurs obtenues par la méthode de Gauss-Seidel et de Runge Kutta 4 sont très proches les uns des autres cependant la méthode de Runge Kutta 4 permet d'approcher davantage les valeurs expérimentales, ce qui la qualifie comme la meilleure méthode.

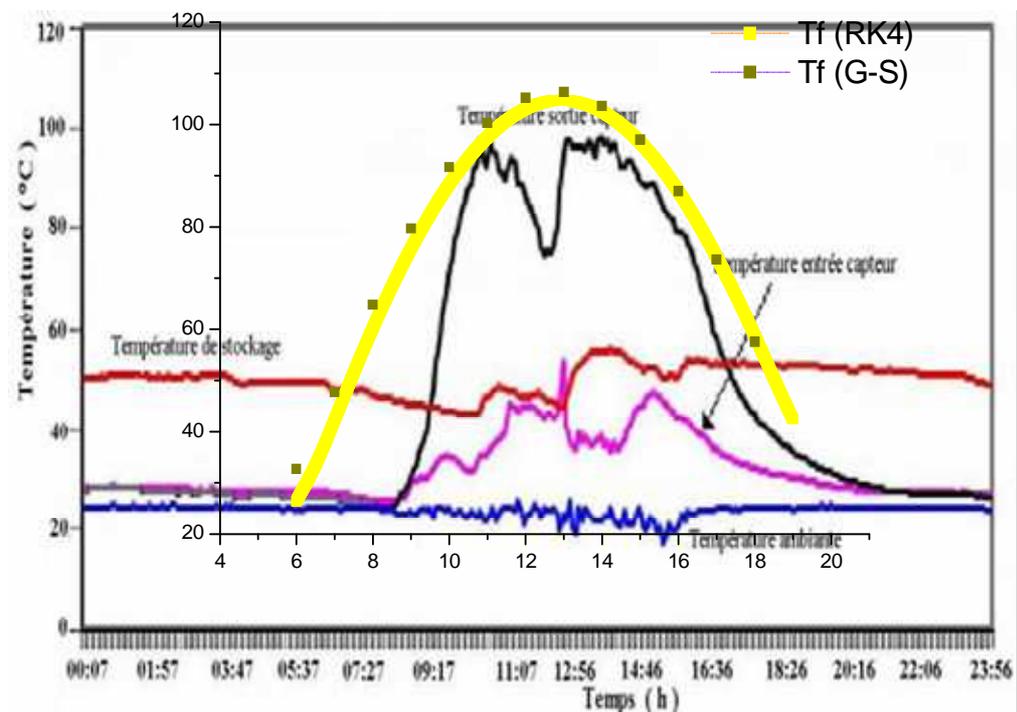


Figure IV.9. Variation temporelle de la température du fluide

Les températures du fluide obtenues par les méthodes de Gauss-Seidel et de Runge Kutta 4 ainsi que l'écart entre ces valeurs sont regroupées dans le tableau suivant :

Tl (h)	Tf (G-S) en °C	Tf (RK4) en °C	Ecart (%)
6	32.691145	26.364089	19.35
7	47.693906	42.183365	11.55
8	64.789681	60.121103	7.2
9	79.703170	75.709230	5.01
10	91.686168	88.295787	3.69
11	100.30895	97.500496	2.79
12	105.26910	103.03387	2.12
13	106.39004	104.72089	1.56
14	103.62646	102.51701	1.07
15	97.071795	96.514921	0.57
16	86.949077	86.943164	0.0068
17	73.604762	74.169483	0.76
18	57.552442	58.779040	2.08

Tableau IV.2. Les températures du fluide

IV.2.4. Variation temporelles des températures des différentes parties du capteur

D'après la figure IV.10, on remarque que la température la plus élevée est celle de l'absorbeur, résultant de la puissance importante qu'il absorbe. Un faible écart sépare les températures de l'absorbeur et du fluide caloporteur, cela est dû principalement au coefficient de convection entre ces derniers qui présente des valeurs importantes.

On trouve dans un ordre décroissant la température de la face intérieure de l'isolant, du fait de son emplacement directement sous l'absorbeur qui a une conductivité thermique élevée, puis vient la température de la face intérieure de la vitre, ceci s'explique par l'absorption du rayonnement incident d'une part, et la chaleur cédée par l'absorbeur sous forme de rayonnement et de convection d'autre part. puis, la température de la vitre extérieure qui est légèrement inférieure à celle de la face intérieure, ceci est dû à son affectation par l'action du vent qui cause des déperditions thermiques par convection avec l'air ambiant. D'une autre part, la température du côté intérieur de la vitre est supérieure à son côté extérieur à cause de l'emprisonnement du rayonnement I.R entre l'absorbeur et la face intérieure de la vitre. La température la moins importante est celle de la face

extérieure de l'isolant résultant de sa faible conductivité thermique ainsi que sa soumission à l'action du vent.

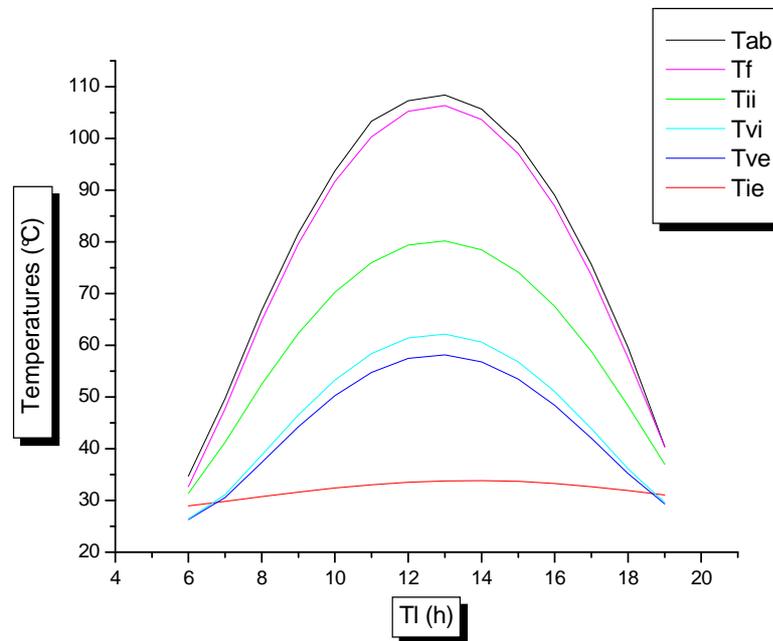


Figure IV.10. Evolution temporelle des températures des différentes parties du capteur

IV.2.5. Effet des paramètres externes sur le rendement instantané du capteur

IV.2.5.1. Les paramètres d'ensoleillement

IV.2.5.1.a. Effet du rayonnement global

Il est évident que la puissance utile récupérée par le fluide de travail dépend étroitement du rayonnement solaire global. Ainsi et comme le montre la figure IV.11, la puissance utile est une fonction linéaire croissante du rayonnement solaire.

En outre, le rendement instantané du capteur étant lui-même lié à la puissance utile et donc au rayonnement, il en résulte qu'une augmentation de ce dernier conduit à un accroissement du rendement instantané (figure IV.12).

Ces résultats sont en bon accord avec ceux trouvés dans la littérature [3], [28].

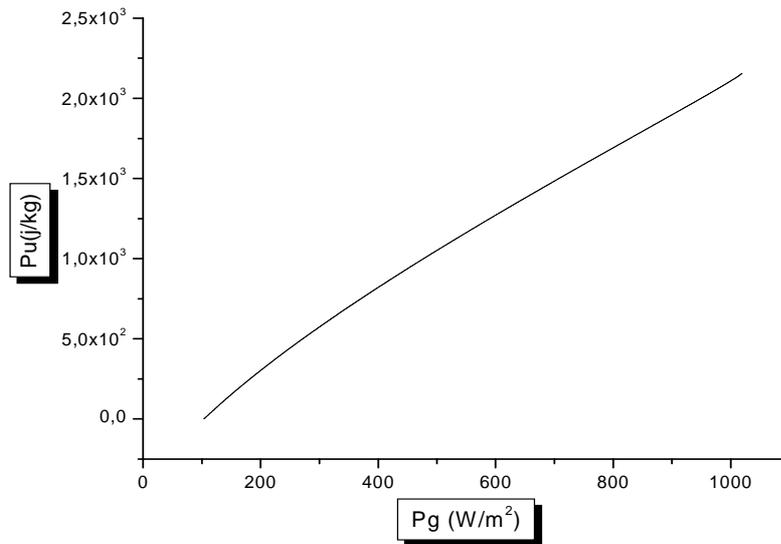


Figure IV.11. Variation de la puissance utile en fonction du rayonnement global

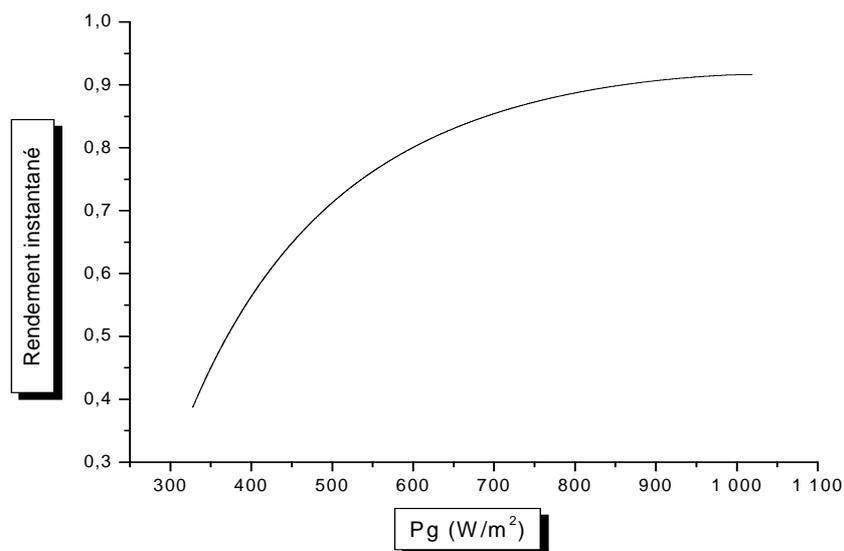


Figure IV.12. Variation du rendement instantané avec le rayonnement global

IV.2.5.1.b. Effet du trouble atmosphérique sur le rayonnement global

La figure IV.13 permet de remarquer que le rayonnement solaire présente des valeurs optimales dans le cas d'un ciel pur, où une grande partie atteint le sol, pour des conditions atmosphériques normales, cette partie devient moins importante, jusqu'à atteindre une faible partie dans le cas où l'atmosphère est polluée (zone industrielle).

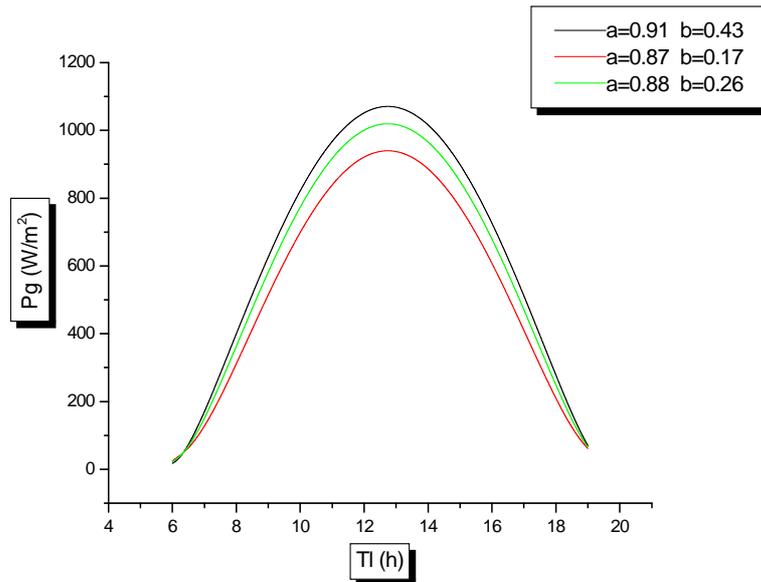


Figure IV.13. Effet du trouble atmosphérique sur le rayonnement global

IV.2.5.1.c. Effet de la température de l’ambiance

La diminution de la température ambiante conduit à une baisse de la température au niveau des différentes composants du capteur (vitre, absorbeur, fluide) et par conséquent à une décroissance du rendement du capteur (figure IV.14).

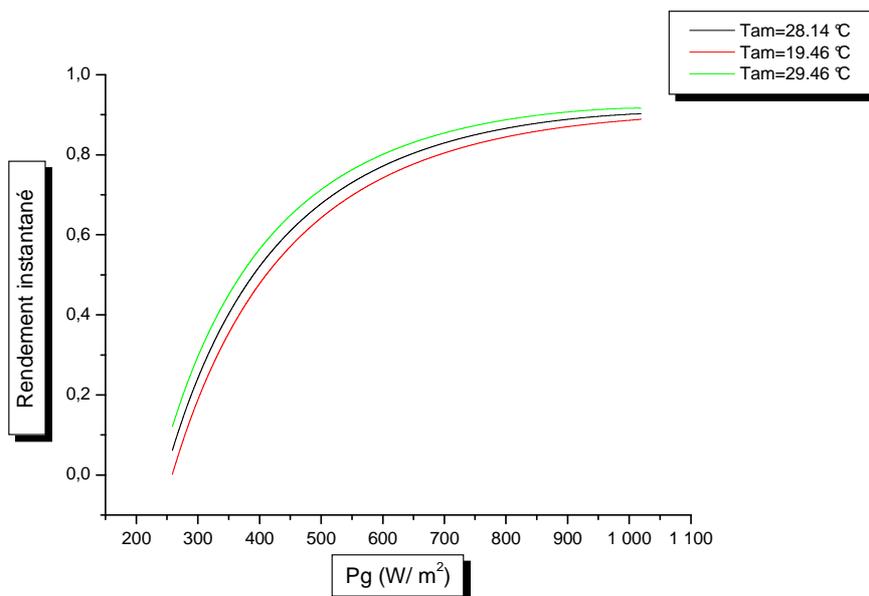


Figure IV.14. Evolution du rendement instantané en fonction de la température de l’ambiance

IV.2.5 .1.d. Variation temporelle du rendement instantané

L'analyse du comportement d'un capteur au cours d'une journée (figure IV.15) montre que le rendement augmente graduellement aux premières heures de la journée pour atteindre des valeurs maximales entre 13^h00 et 15^h00, bien que l'irradiation solaire commence à décroître à partir de 13^h00 global ce qui semble en bon accord avec les résultats trouvés dans la littérature [12].

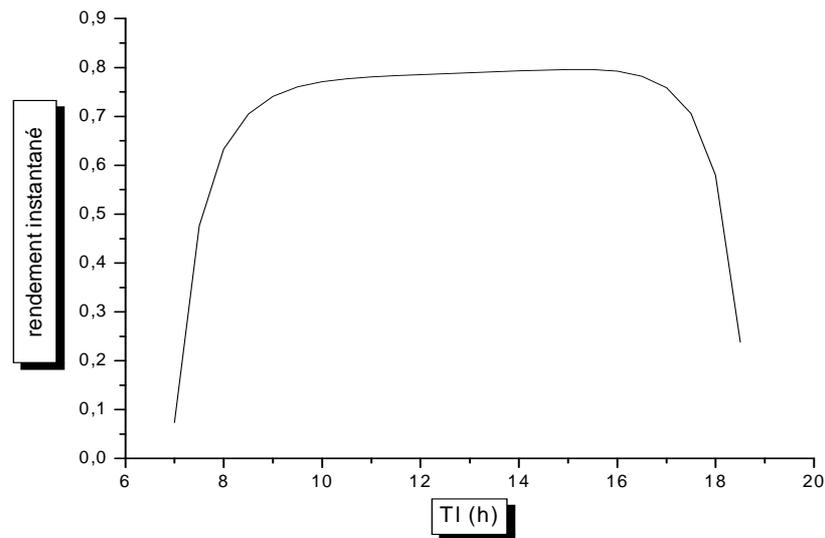


Figure IV.15. Evolution temporelle du rendement instantané du capteur

IV.2.5.2. Effet de la vitesse du vent

La figure IV.16 montre l'effet de l'accroissement de la vitesse du vent sur le rendement instantané du capteur, on remarque qu'il est favorable pour les puissances solaires supérieures à 450 W/m² et inversement.

En effet, l'augmentation de la vitesse du vent engendre une baisse de la température de la vitre d'où un accroissement de l'écart entre la température de l'absorbeur et de la vitre comme le montrera plus tard la figure IV.21.

Pour les puissances solaires inférieures à 450 W/m² (aux environs de 8^h00 du matin), l'effet de l'accroissement de la vitesse du vent sur le rendement instantané est défavorable cela est dû à l'inertie thermique du capteur solaire.

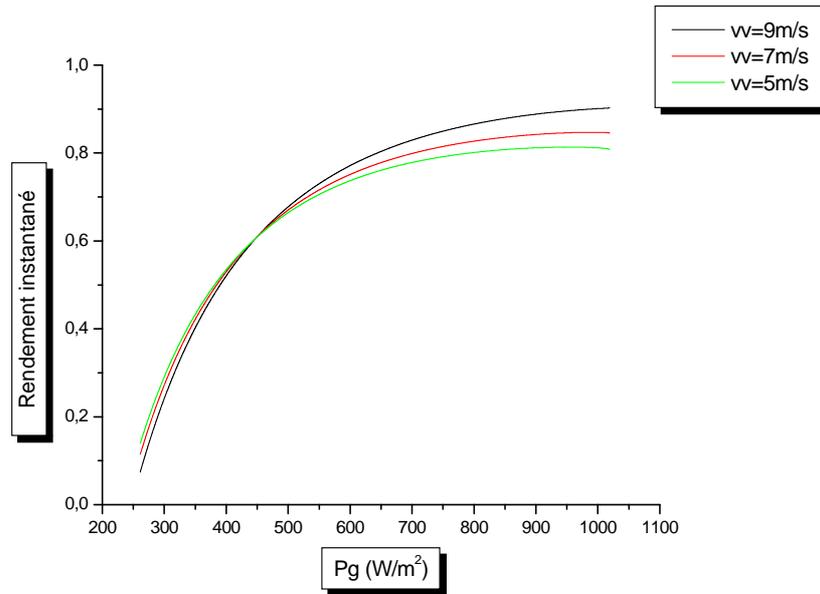


Figure IV.16. Evolution du rendement instantané du capteur en fonction de la vitesse du vent

IV.2.6. Effet des paramètres internes

IV.2.6.1. Les paramètres de construction

IV.2.6.1. a. L'absorbeur

☀ Effet des propriétés thermophysiques et optiques de l'absorbeur

La nature du matériau de l'absorbeur influe sur le rendement instantané du capteur (figure IV.17). Il est clair qu'un absorbeur en acier poli donnera un meilleur rendement que celui en cuivre poli ou en aluminium poli (annexe B).

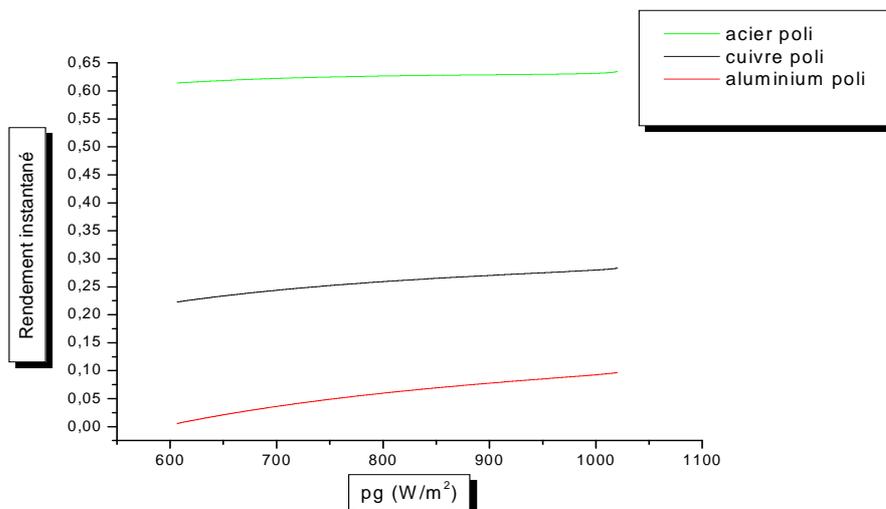


Figure IV.17. Variation du rendement instantané en fonction des propriétés de l'absorbeur

☀ Effet des dimensions des tubes de l'absorbeur

La figure IV.18 permet d'observer que l'augmentation des dimensions des tubes de l'absorbeur conduit à l'accroissement du rendement du capteur ce qui peut être expliqué par le nombre Reynolds. En effet, un tube plus grand implique un Reynolds plus élevé donc création de la turbulence qui favorisera le transfert convectif entre l'absorbeur et le fluide d'où une amélioration du rendement du capteur.

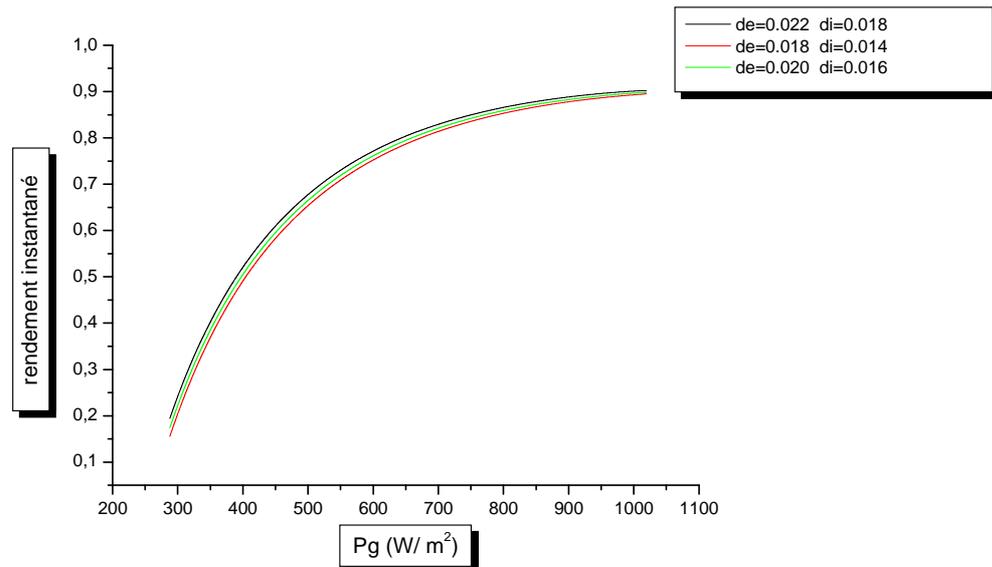


Figure IV.18. Effet des dimensions des tubes de l'absorbeur sur le rendement instantané du capteur

☀ Effet de la couche sélective

La figure IV.19 montre l'influence de la couche sélective sur le rendement instantané du capteur solaire plan.

On remarque qu'un absorbeur en cuivre poli non sélectif ($\alpha_{ab}=0,25$ [1]), donne un rendement nettement inférieur à celui d'absorbeur doté d'une surface sélective en chrome noir ($\alpha_{ab}=0,95$ [1]).

L'élévation de l'absorptivité de l'absorbeur entraîne l'accroissement de la puissance solaire absorbée par l'absorbeur d'où l'augmentation du rendement instantané du capteur.

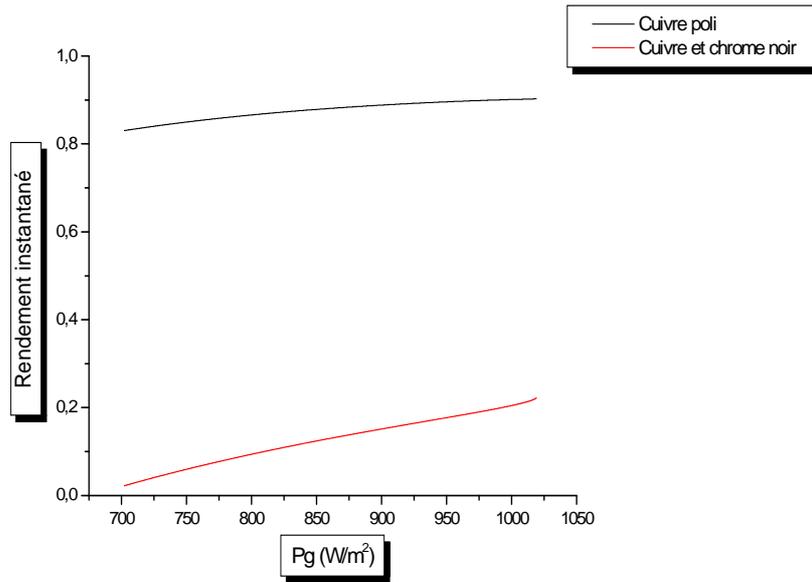


Figure IV.19. Variation du rendement instantané en fonction de la sélectivité de l'absorbeur

☀ Effet de la température de l'absorbeur

La figure IV.20 montre l'évolution du rendement instantané en fonction de la température de l'absorbeur, on remarque qu'il existe une fonction croissante entre le rendement instantané et la température de l'absorbeur. Ceci s'explique par le fait que plus la température de l'absorbeur augmente, plus la chaleur transmise au fluide de travail est importante d'où l'augmentation du rendement instantané du capteur.

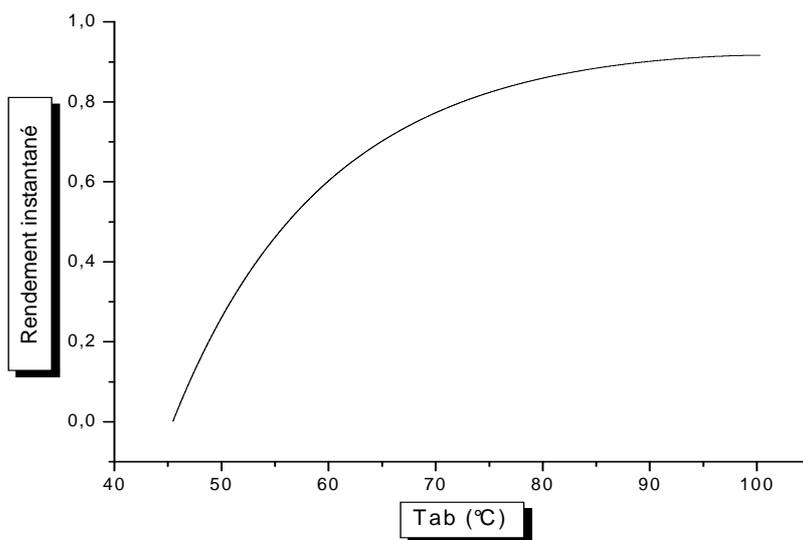


Figure IV.20. Effet de la température de l'absorbeur sur rendement instantané du capteur

☀ Effet de la différence de température entre l'absorbeur et la couverture transparente

D'après la figure IV.21, on remarque que le rendement instantané est une fonction croissante de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre.

Nous savons que la différence de température entre l'absorbeur et la vitre du capteur figure dans le nombre de Rayleigh qui intervient pour déterminer le coefficient de transfert convectif entre l'absorbeur et la vitre, ce nombre adimensionnel fournit un critère de passage de la convection naturelle laminaire à la convection naturelle turbulente. L'augmentation de la différence de température entre l'absorbeur et la vitre élève le nombre de Rayleigh d'où une augmentation du rendement instantané du capteur.

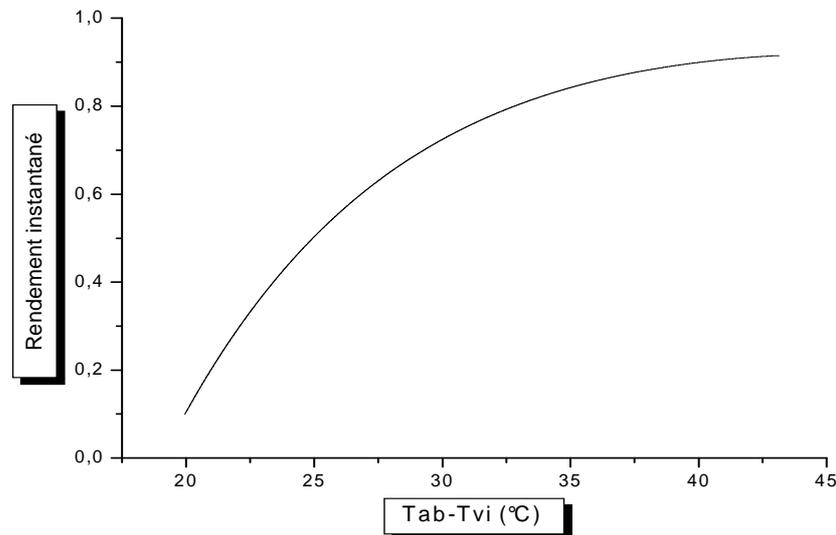


Figure IV.21. Variation du rendement instantané du capteur en fonction de l'écart de température entre l'absorbeur et la vitre

☀ Effet de la différence de température entre l'absorbeur et l'ambiance

D'après la figure IV.22, on voit que le rendement sera d'autant meilleur que la température de l'absorbeur sera proche de la température de l'ambiance. C'est pour cette raison qu'il ne faut pas rechercher de hautes températures du fluide caloporteur avec les capteurs solaires plans. Le même résultat est trouvé dans les littératures [1], [27].

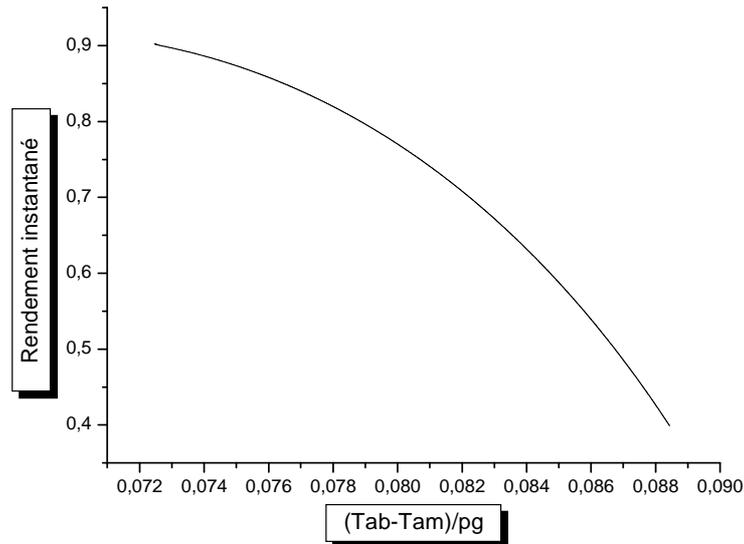


Figure IV.22. Variation du rendement instantané du capteur en fonction de la différence de température entre l'absorbeur et l'ambiance

IV.2.6.1. b. La couverture transparente

☀ Effet des propriétés optiques de la vitre

Il apparait, selon la figure IV.23 que l'utilisation du polyméthacrylate dont la transmissivité est plus élevée que celle du verre et du polycarbonate (annexe B) et qui transmettra par conséquent une proportion plus importante de l'énergie incidente (92%) donnera un meilleur rendement au capteur solaire.

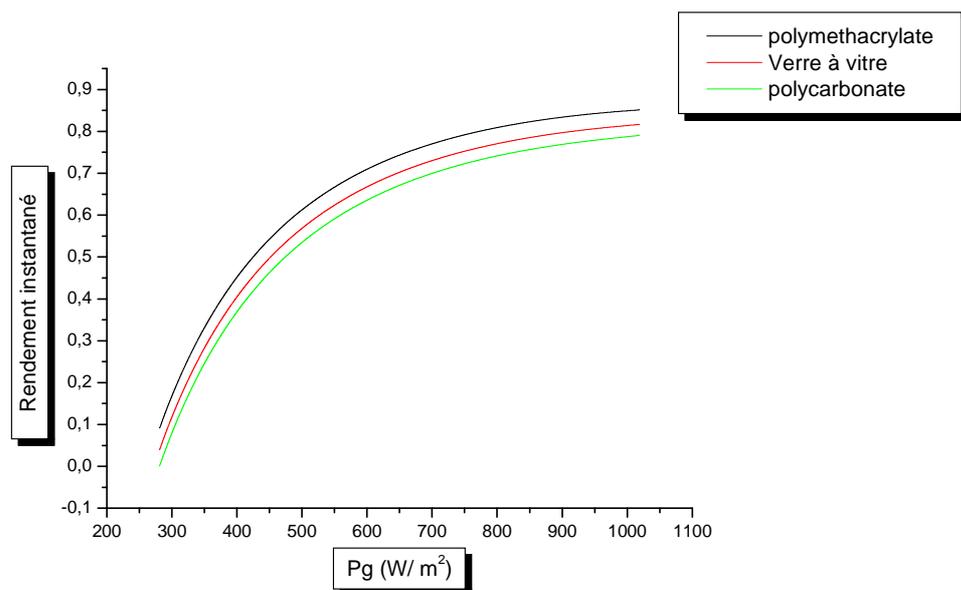


Figure IV.23. Variation du rendement en fonction des propriétés optiques de la vitre

☀ Effet de l'épaisseur de la vitre

D'après la figure IV.24, on remarque que le rendement instantané du capteur est amélioré avec la diminution de l'épaisseur de la vitre. En effet, plus l'épaisseur de la vitre est grande, plus sa capacité calorifique est importante et plus son inertie thermique est meilleure d'où la diminution de la température du capteur.

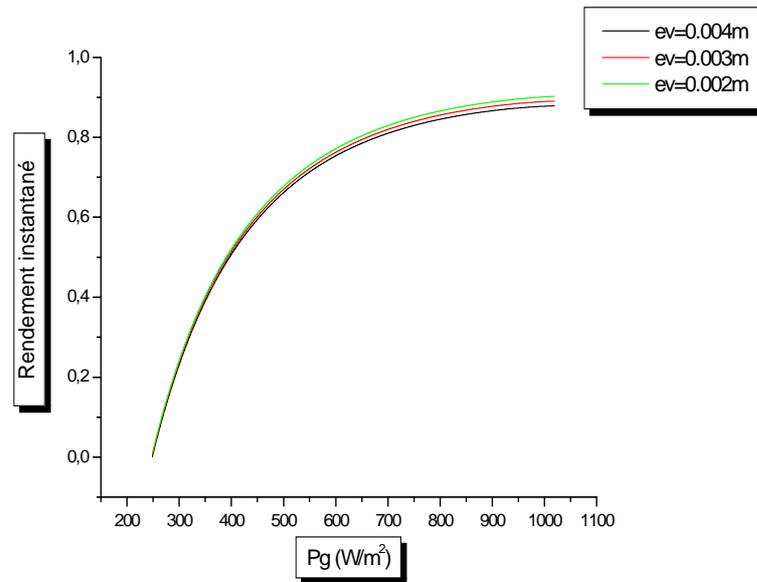


Figure IV.24. Variation du rendement instantané en fonction de l'épaisseur de la vitre

IV.2.6.1. c. Le fluide caloporteur

☀ 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.25). 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 raison 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.

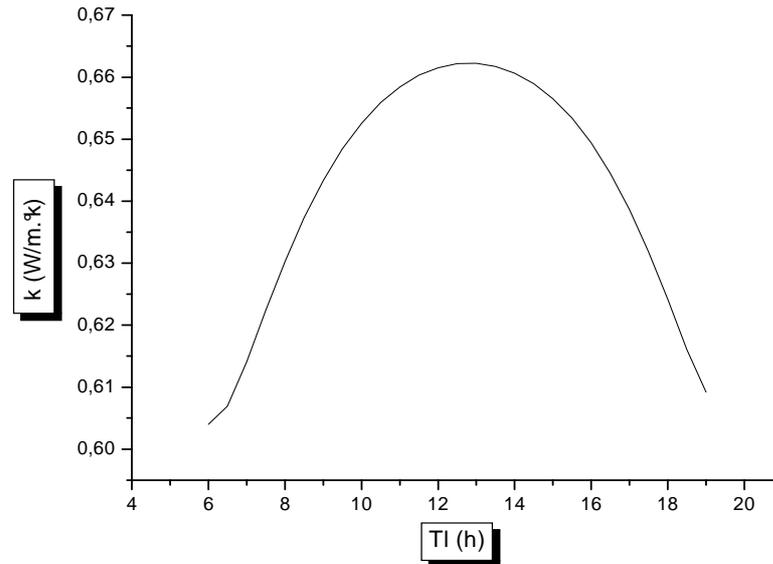


Figure IV.25. Variation temporelle de la conductivité thermique du fluide caloporteur

☀ Variation temporelle de la chaleur spécifique du fluide caloporteur

On remarque sur la figure IV.26 que la variation temporelle de la chaleur spécifique est proportionnelle à celle du rayonnement global, ce qui peut être expliqué par le fait que la chaleur spécifique est la quantité de chaleur qu'il faut fournir à l'unité de masse du fluide pour accroître sa température de 1 degré, il en résulte que la chaleur spécifique augmente d'autant plus que la température croît.

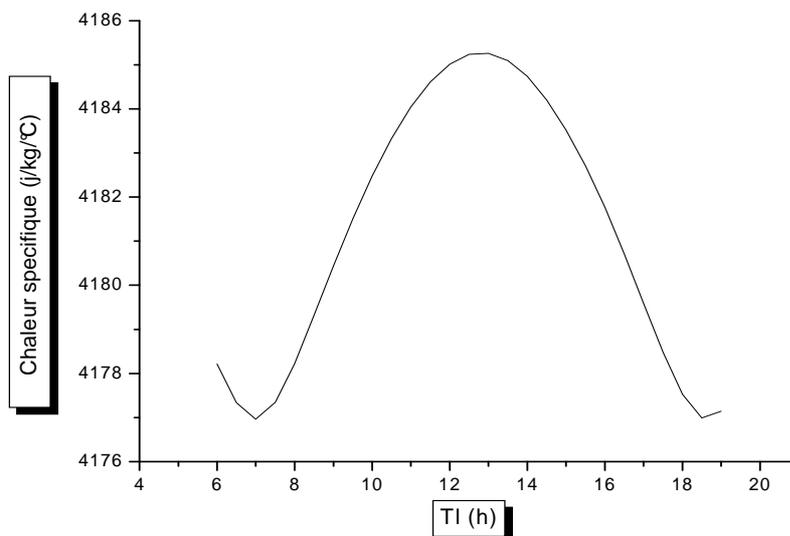


Figure IV.26. Variation temporelle de la chaleur spécifique du fluide caloporteur

☀ Variation temporelle de la masse volumique du fluide caloporteur

La courbe de la figure IV.27 illustrant la variation temporelle de la masse volumique du fluide présente un minimum vers 13^h00, ceci peut être aisément expliqué par la densité du fluide qui diminue avec l'augmentation de la température du fluide.

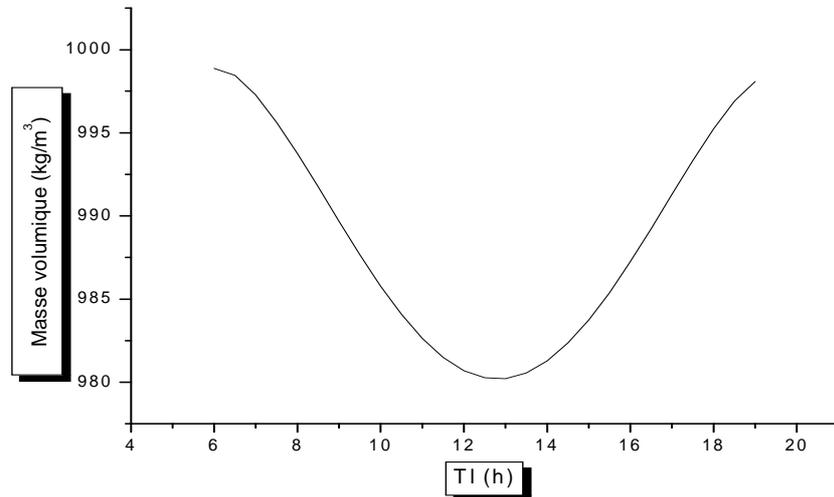


Figure IV.27. Variation temporelle de la masse volumique du fluide caloporteur

☀ Variation temporelle de la viscosité dynamique du fluide caloporteur

La viscosité dynamique diminue avec l'augmentation de la température, il en résulte l'allure en cloche inversée de la courbe temporelle de la viscosité dynamique du fluide avec une valeur minimale à 13^h00 (figure IV.28).

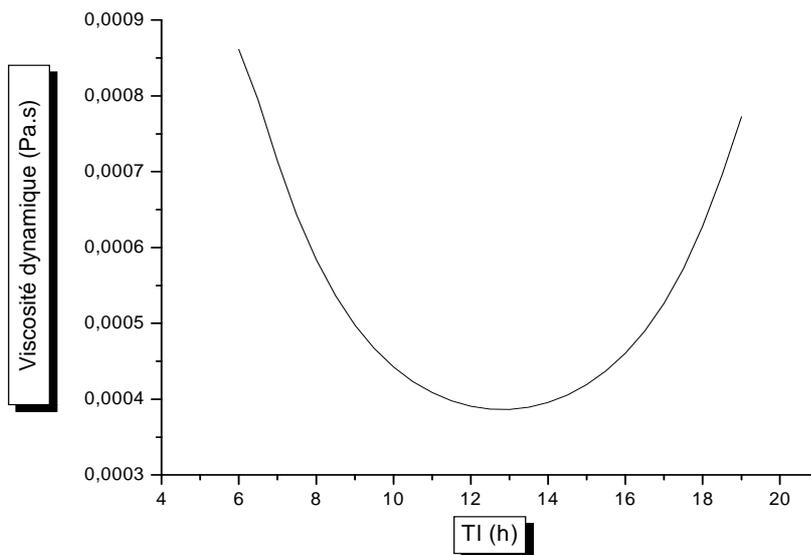


Figure IV.28. Variation temporelle de la viscosité dynamique du fluide caloporteur

☀ Variation temporelle du nombre de Prandtl

La figure IV.29 montre la variation temporelle du nombre de Prandtl qui diminue pour atteindre son minimum entre 12^h00 et 13^h00. Cette variation est directement influencée par la température du fluide. En effet, la diminution de la viscosité cinématique entraîne la diminution de l'énergie dépensée pour véhiculer le fluide. En outre, plus la diffusivité thermique du fluide est grande plus la propagation de la chaleur est rapide. La combinaison de ces deux faits conditionnée par l'augmentation de la température du fluide explique la diminution du nombre de Prandtl avec l'augmentation de la température du fluide caloporteur.

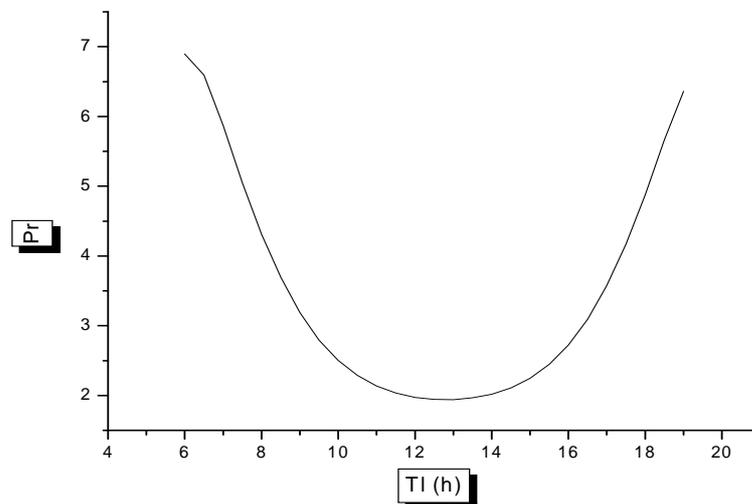


Figure IV.29. Variation temporelle du nombre de Prandtl

☀ Variation temporelle du nombre de Reynolds

La variation du nombre de Reynolds a une allure croissante dans le temps comme le montre la figure IV.30, cette augmentation est conditionnée par l'accroissement de la température du caloporteur. En effet, le nombre de Reynolds est le rapport entre la force d'inertie et la force de viscosité qui évoluent contrairement à l'évolution de la température du fluide, cependant la diminution de la force d'inertie est nettement inférieure de celle de la force de viscosité ce qui assurera une augmentation du nombre de Reynolds avec la température du fluide.

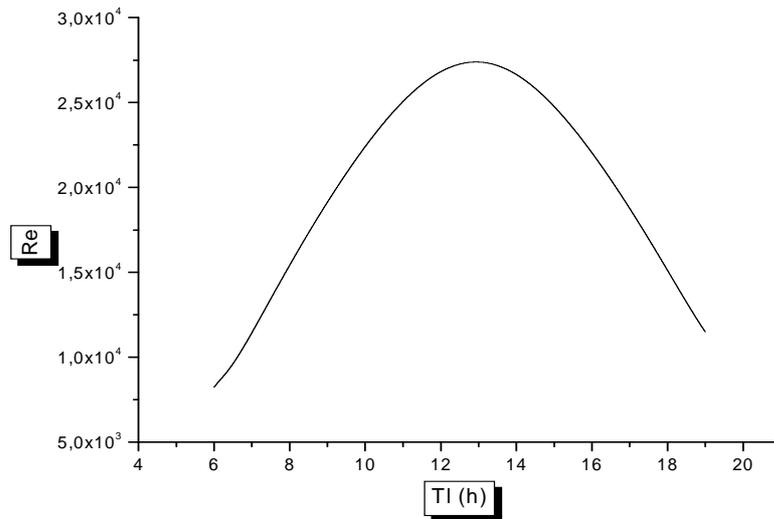


Figure IV.30. Variation temporelle du nombre de Reynolds

☀ **Effet de la chaleur spécifique du fluide caloporteur**

L'augmentation de la chaleur spécifique du fluide caloporteur entraîne l'accroissement de sa capacité calorifique d'où l'augmentation du rendement instantané du capteur solaire (figure IV.31).

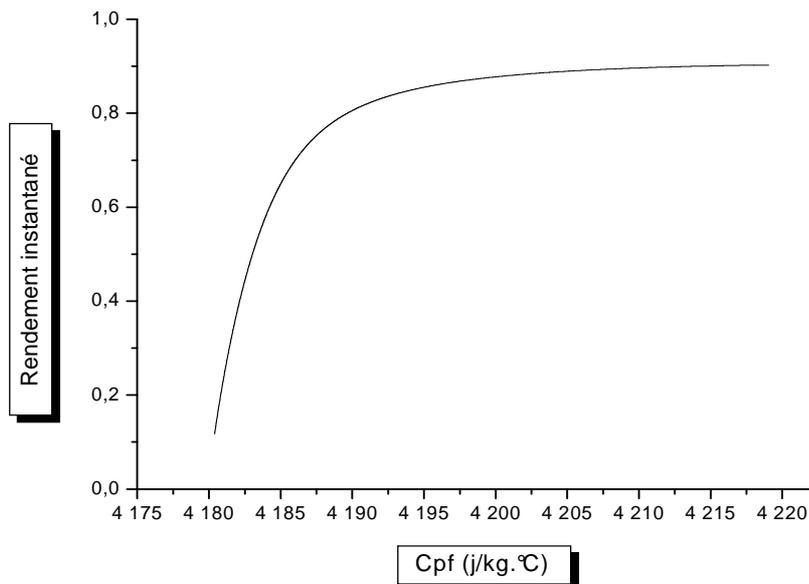


Figure IV.31. Evolution du rendement instantané en fonction de la chaleur spécifique

☀ Effet de la masse volumique du fluide caloporteur

La figure IV.32 montre une fonction décroissante entre le rendement instantané du capteur et la masse volumique du fluide caloporteur. Quand la température du fluide augmente il devient moins dense d'où la diminution de sa masse volumique.

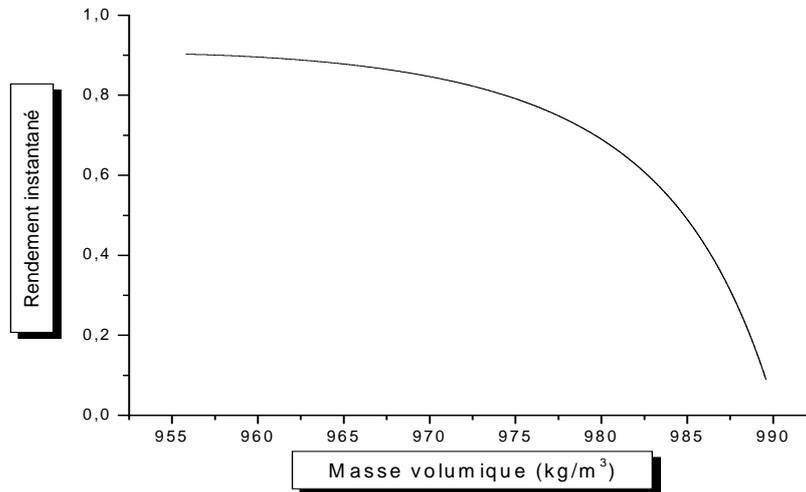


Figure IV.32. Evolution du rendement instantané en fonction de la masse volumique

☀ Effet de la conductivité thermique du fluide caloporteur

D'après la figure IV.33, on remarque qu'il existe une fonction croissante entre ces deux grandeurs, plus la conductivité thermique du fluide augmente plus son aptitude à dissiper la chaleur croît aussi, d'où l'augmentation du rendement instantané.

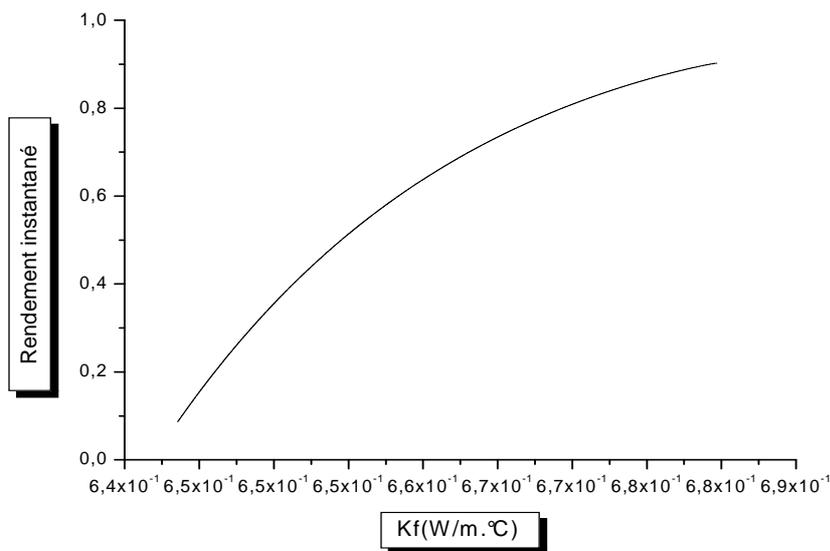


Figure IV.33. Variation du rendement instantané en fonction de la conductivité thermique du fluide caloporteur

☀ Effet de la viscosité dynamique du fluide caloporteur

La figure IV.34 montre l'effet défavorable de l'augmentation de la viscosité dynamique du fluide sur le rendement instantané du capteur. En effet, plus la viscosité dynamique du fluide augmente, plus l'écoulement du fluide est ralenti, d'où la détérioration du transfert convectif causé par la diminution du nombre de Reynolds (qui influe directement sur le coefficient de convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur), d'où la baisse du rendement du capteur.

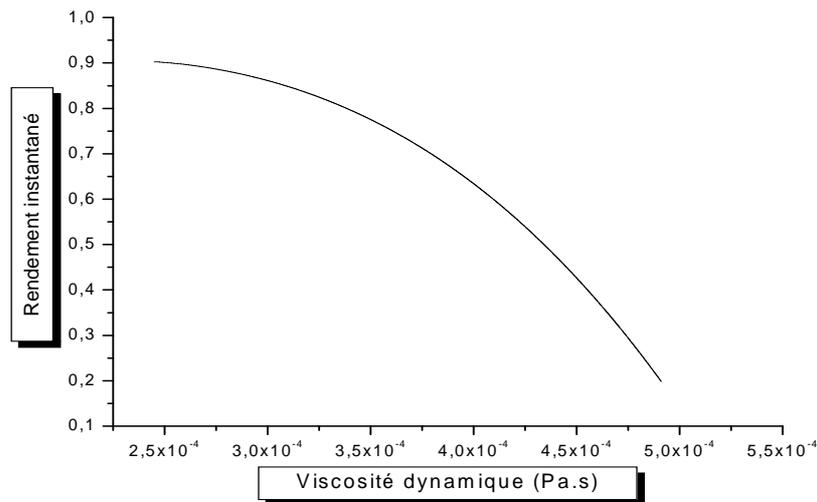


Figure IV.34. Variation du rendement instantané en fonction de la viscosité dynamique du fluide caloporteur

☀ Effet du nombre de Prandtl

Le nombre de Prandtl est le rapport de la viscosité cinématique à la diffusivité thermique du fluide caloporteur. La diminution de la viscosité cinématique entraîne la baisse de l'énergie dépensée pour véhiculer le fluide. D'autre part plus la diffusivité thermique du fluide est grande plus la propagation de la chaleur est rapide et plus le fluide extrait facilement la chaleur de la paroi. Donc, la diminution de la viscosité cinématique et l'augmentation de la diffusivité thermiques explique la baisse du nombre de Prandtl avec l'augmentation de la température du fluide caloporteur (figure IV.35).

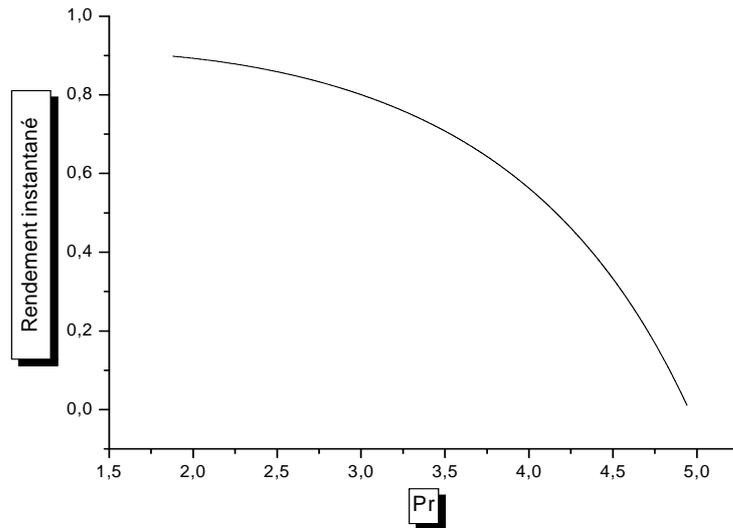


Figure IV.35. Variation du rendement instantané en fonction du nombre de Prandtl

☀ **Effet du nombre de Reynolds**

L'augmentation du nombre de Reynolds a un effet favorable sur le rendement instantané du capteur comme le montre la figure IV.36. L'accroissement de ce nombre adimensionnel traduit l'augmentation de la turbulence dans l'écoulement du fluide d'où une amélioration du transfert thermique convectif entre l'absorbeur et le fluide caloporteur, ce qui améliorera le rendement instantané du capteur plan.

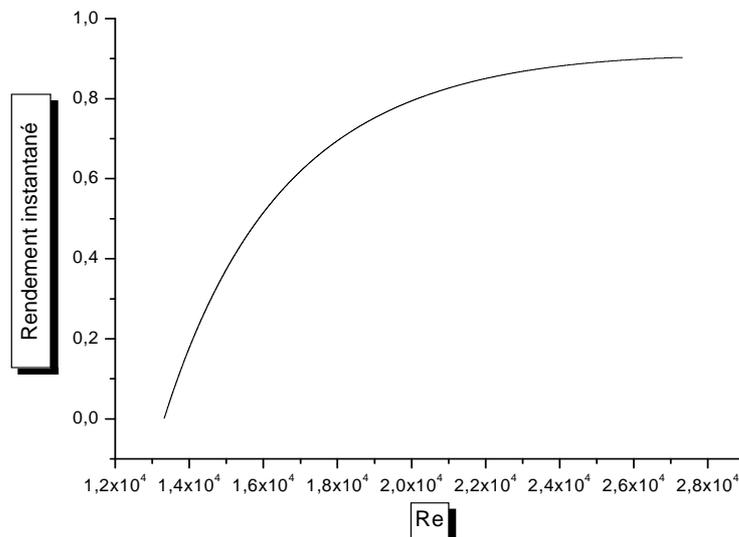


Figure IV.36. Variation du rendement instantané en fonction du nombre de Reynolds

☀ Effet du débit du fluide caloporteur

D'après la figure IV.37, il apparaît que le rendement instantané augmente en fonction du débit du fluide. En effet, l'augmentation du débit entraîne directement l'accroissement de la vitesse de l'écoulement du fluide d'où l'augmentation du nombre de Reynolds. Ce nombre adimensionnel caractérise le type de l'écoulement du fluide qui peut être laminaire, transitoire ou turbulent.

On en déduit que l'augmentation du débit augmente la turbulence de l'écoulement d'où la favorisation de transfert thermique convectif et par conséquent l'augmentation du rendement du capteur. D'une autre part, l'augmentation du débit augmente la capacité calorifique du fluide caloporteur, d'où l'accroissement de la chaleur utile qui influe favorablement sur le rendement instantané du capteur. Le même résultat est trouvé dans la littérature [27] et [28].

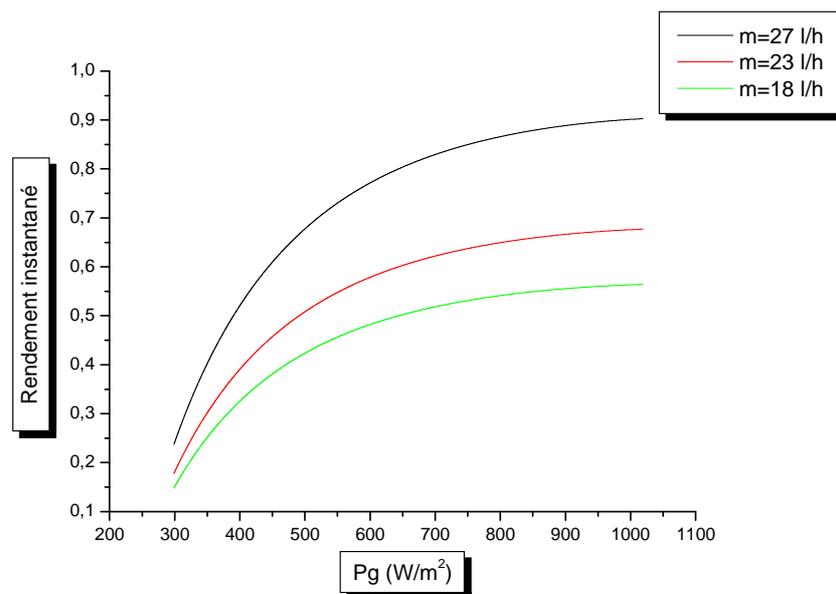


Figure IV.37. Variation du rendement instantané en fonction du débit du fluide

☀ Effet de la température d'entrée du fluide caloporteur

D'après la figure IV.38, on voit que la diminution de la température d'entrée du fluide caloporteur fait augmenter le rendement instantané du capteur. En effet, la température d'entrée du fluide de travail agit directement sur l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur qui est en relation proportionnelle avec la différence de température du fluide entre la sortie et l'entrée. Donc, plus la température d'entrée du fluide caloporteur diminue,

plus l'énergie utile récupérée par le fluide caloporteur augmente, d'où l'augmentation du rendement instantané et inversement.

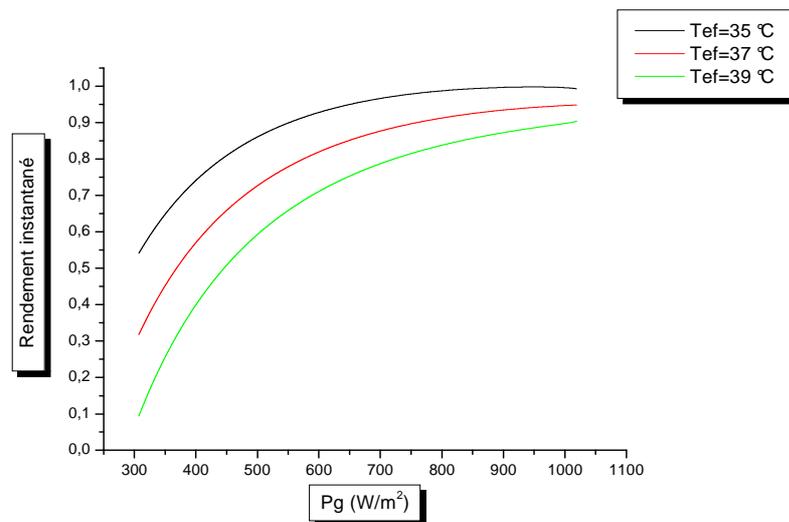


Figure IV.38. Variation du rendement instantané en fonction la température d'entrée du fluide

IV.2.5.1. d. L'isolant

☀ Effet des propriétés thermophysiques de l'isolant

La mousse de polyuréthane donne un rendement meilleur par rapport à la laine de verre et le polystyrène expansé (figure IV.39) du fait de ses propriétés thermophysiques, à savoir, une faible conductivité thermique et une chaleur spécifique importante (annexe B).

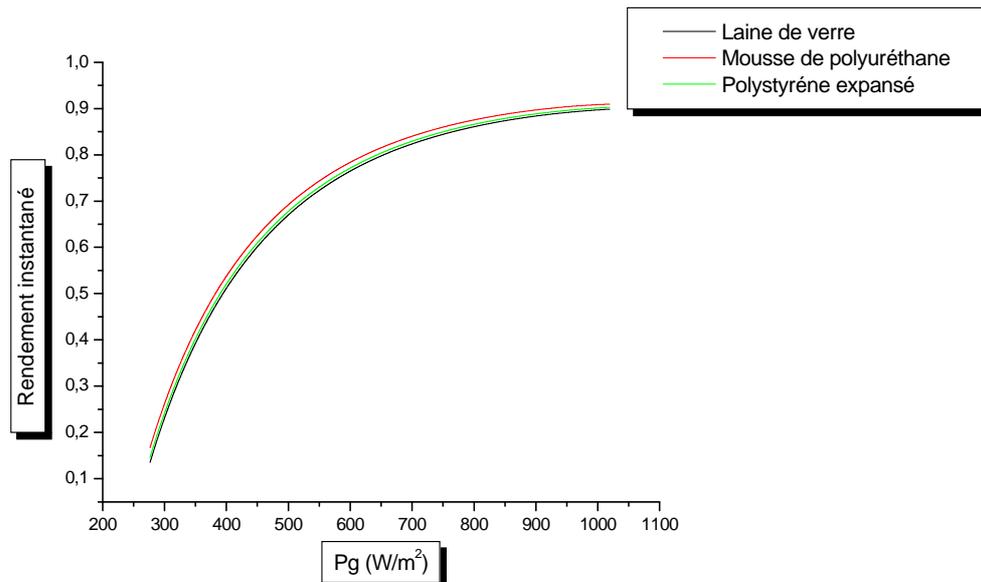


Figure IV.39. Evolution du rendement instantané en fonction des propriétés de l'isolant

☀ Effet de l'épaisseur de l'isolant

L'effet favorable de l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant sur le rendement instantané du capteur est illustré sur la figure IV.40.

En fait, l'augmentation de l'épaisseur de l'isolant diminue le coefficient de conduction de l'isolant qui est inversement proportionnel à l'épaisseur de l'isolant, cependant, il est nécessaire d'optimiser cette épaisseur pour établir le meilleur compromis rendement-coût.

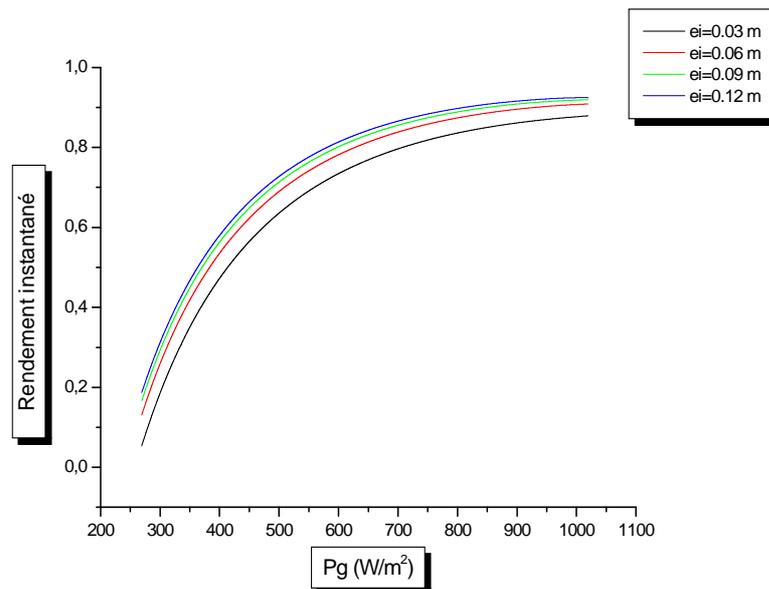


Figure IV.40. Evolution du rendement instantané en fonction de l'épaisseur de l'isolant

IV.2.6.2. Les paramètres de position

IV.2.6.2.a. Effet de l'inclinaison du capteur

Il est aisé de remarquer sur la figure IV.41 que le rendement instantané du capteur solaire plan croît avec l'augmentation de l'inclinaison du capteur.

Selon [36], la position optimale qui assure la bonne réception des rayonnements solaires en période hivernale lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel est une inclinaison plus élevée que la latitude du lieu de 10 à 15°. Contrairement à la période estivale, pendant laquelle il est préférable d'incliner le capteur moins de la latitude du lieu de 10 à 15°.

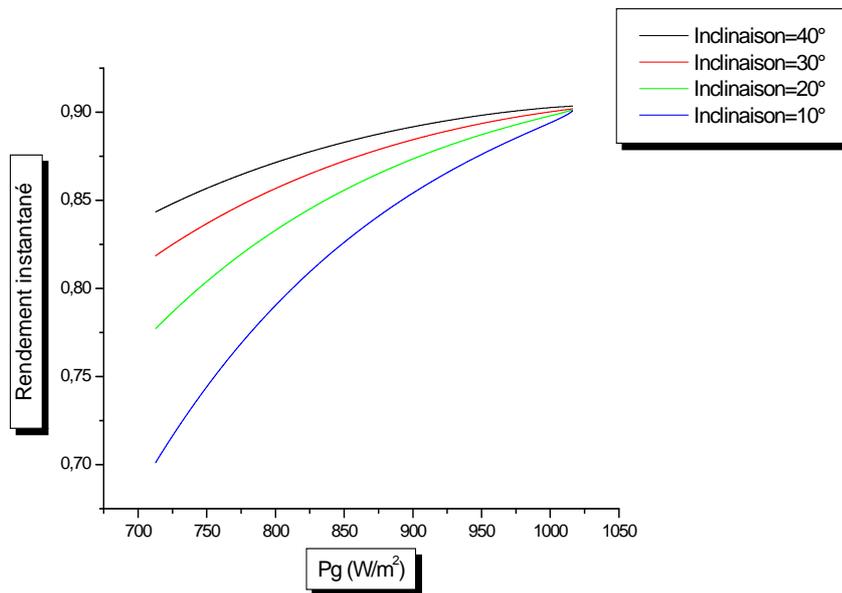
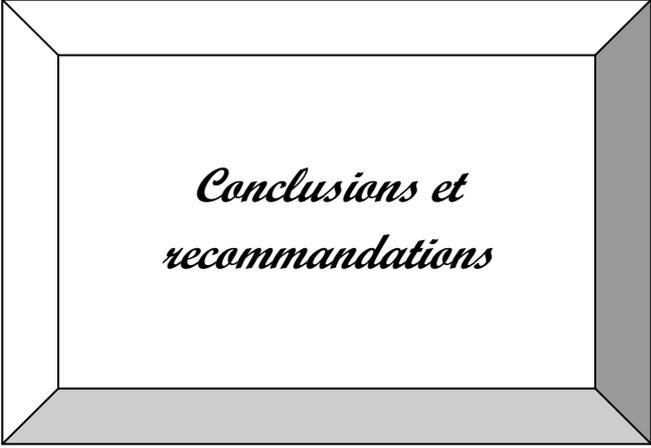


Figure IV.41. Evolution du rendement instantané en fonction de l'inclinaison du capteur



*Conclusions et
recommandations*

CONCLUSION

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

Après une présentation succincte de quelques données astronomiques, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents échanges thermiques mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernants le comportement thermique de ce dispositif en régimes permanent et transitoire. La résolution du système d'équations discrétisées par la méthode des différences finies a été abordée par une approche numérique basée sur les méthodes de Gauss-Seidel et de Runge-Kutta d'ordre 4.

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 dans les deux régimes étudiés.

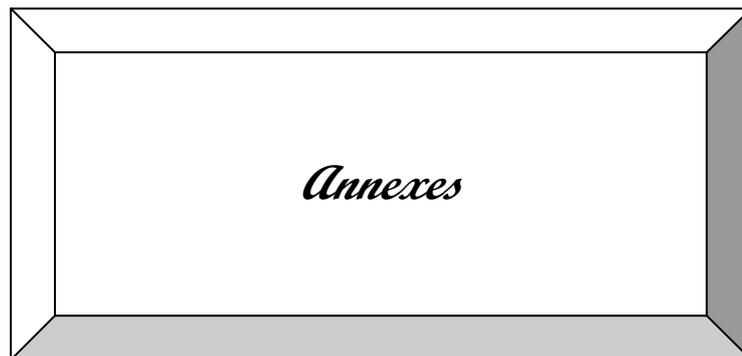
Les résultats obtenus montrent également l'influence des propriétés optiques et thermophysiques des différents composants du capteur sur son rendement instantané. On notera ainsi que :

- 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.
- L'isolant doit posséder une épaisseur et une chaleur spécifique élevées, ainsi qu'une faible conductivité thermique afin d'améliorer le rendement instantané du capteur.

- Le fluide caloporteur doit avoir d'une part une chaleur spécifique et une conductivité thermique élevées et d'autre part, une viscosité dynamique et une masse volumique réduites.

Par ailleurs, pour avoir un bon rendement il faut :

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



Annexe A : différents instruments de mesure du rayonnement solaire et différentes stations de l'O.N.M.

Annexe B : propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan.

Annexe C : les méthodes de discrétisation.

Annexe D : les méthodes de résolution.

Annexe A

Instruments de mesure du rayonnement solaire et différentes stations de l'O.N.M

1. Instruments de mesure du rayonnement solaire

Les mesures solarimétriques ne datent pas d'aujourd'hui, les premières mesures ont été entreprises par Pouillet en 1837.

Selon la composante du rayonnement solaire, différents appareils de mesure sont utilisés.

- **Rayonnement solaire total**

Pour mesurer le rayonnement solaire total parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians on utilise un pyrromètre.

- **Rayonnement solaire global**

On utilise un pyranomètre (figure 1.A) pour mesurer le rayonnement solaire global parvenant sur une surface à partir d'un angle solide 2π stéradians.



Figure 1.A. Un pyranomètre

- **Rayonnement solaire direct**

L'appareil de mesure du rayonnement solaire direct est un pyrhélioimètre (figure 2.A), orientable de façon que la surface réceptrice soit normale aux rayons solaires.



Figure 2.A. Pyrhélioimètre

- **Rayonnement solaire diffus**

Quant à la mesure du rayonnement solaire diffus, elle est entreprise à l'aide d'un pyranomètre muni d'un dispositif pare-soleil.

2. Les différentes stations de (O.N.M)

Le tableau 1.A présente les principales stations de l'O.N.M

Station	Elévation	Latitude	Longitude
Adrar/Touat	2630	+27883	-000283
Ain Safra	10580	+32767	-000600
Ain bessam	7480	+36317	+003533
Alger port	80	+36767	+003100
Annaba/el mellah	40	+36833	+007817
Aoulef	3090	+26967	+001083
Arzew	40	+35817	-000267
Batna	10520	+35550	+006183
Bechar/ouakda	7730	+31617	-002233

Bejaia-port	40	+36750	+005100
Bejaia/soummam	20	+36717	+005067
Beni abbes	4990	+30133	-002167
Beni-saf	680	+35300	-001350
Biskra	870	+34800	+005733
Bordj bou arreridj	9280	+36067	+004767
Bordji b mokhtar	3980	+21333	+000950
Bou-saada	4610	+35333	+004200
Bouhegouf	1110	+36500	+007717
Bouira	6350	+36383	+003900
Cap carbon	40	+36750	+005100
Cap falcon	1040	+35767	-000800
Chlef	1430	+36217	+001333
Constantine/el bey	6940	+36283	+006617
Dar-el-beida/houari	250	+36717	+003250
Dellys	120	+36917	+003950
Djanet/tiska	10540	+24550	+009467
Djelfa/tlets	11780	+34667	+003350
El bayadh	13410	+33667	+001000
El golea	3970	+30567	+002867
El kheiter	10000	+34150	+000067
El oued/guemer	630	+33500	+006117
El-kala	100	+36900	+008450
Ft flatters/bordj-o	3870	+28133	+006817
Ghardaia/noumerate	4500	+32383	+003817
Ghazaouet	830	+35100	-001867
Guelma	2270	+36467	+007467
Hassi-messaoud/irar	1420	+31667	+006150
Hassir`mel	7640	+32933	+003283
Ighil izane	750	+35733	+000533
Illizi/illirane	5580	+26500	+008417
In amenas/zarzaitin	5620	+28050	+009633

In salah	2930	+27200	+002467
In salah north	2690	+27250	+002517
In-guezzam	4110	+19567	+005767
Jijel	20	+36833	+005783
Jijel/taher	20	+36833	+005783
Khenchella	11160	+35417	+007150
Ksar chellala	8000	+35167	+002317
Laghouat	7650	+33767	+002933
Maghnia	4260	+34817	-001783
Mascara	4740	+35600	+000300
Mascara/ghriss	5110	+35267	+000150
Mecheria	11490	+34933	-000433
Medea	9810	+36267	+002750
Miliana	7150	+36300	+002233
Mostaganem	1370	+35883	+000117
M̄sila	4410	+35667	+004500
Naama	11660	+33267	-000300
Oran port	220	+35700	-000650
Oran tafaraoui	1110	+35483	-000517
Oran/es senia	900	+35633	-000600
Oran/tafaroui	0	+35483	-000533
Ouargla	1410	+31917	+005400
Oum el bouaghi	8890	+35883	+007117
Saida	7700	+34867	+000150
Setif/ain-arnat	10380	+36183	+005417
Sidi bel abbes	4500	+35183	-002617
Skikda	70	+36933	+006950
Souk ahras	6800	+36283	+007950
Tamanrasset	13780	+22783	+005517
Tamanrasset/aguenna	13770	+22817	+005467
Tebessa	8130	+35483	+008132
Tenes	590	+36550	+001333

Tiaret	11270	+35250	+001433
Timimoun	3120	+29250	+000283
Tindouf	4310	+27667	-008132
Tizi-ouzou	1950	+36700	+004050
Tlemcen/zenata	8050	+34867	-001333
Touggourt/sidi mahd	850	+33117	+006133

Tableau 1.A. Les différentes station de l'O.N.M

Annexe B

Propriétés thermiques et optiques des différents composants du capteur plan

Les caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques pouvant constituer l'absorbeur d'un capteur solaire plan sont regroupés dans le tableau (1.B)

Métal	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Absorptivité	Emissivité
Cuivre	384	8900	398	0.25	0.02
Acier inoxydable	14	7800	460	0.01	0.04
Aluminium	204	2700	879	0.63	0.09

Tableau 1.B. Caractéristiques thermophysiques des matériaux métalliques

Les propriétés optiques de quelques surfaces sélectives figurent dans le tableau 2.B [13]

Support et traitement	Absorptivité de la surface	Emissivité de la surface	Effet de l'humidité
Acier et nickel noir sur nickel	0.95	0.07	Variable
Acier et chrome noir sur nickel	0.95	0.09	Sans effet
Acier et chrome noir	0.91	0.07	Oxydation rapide
Cuivre et chrome noir	0.95	0.14	Peu d'effets
Acier galvanisé et chrome noir	0.95	0.16	Couche sélective pèle rapidement
Cuivre et cuivre noir	0.88	0.15	
Acier et oxyde de fer	0.85	0.08	Peu d'effets
Alu et oxyde de manganèse	0.70	0.08	
Acier et couche organique sur oxyde de fer	0.90	0.16	Peu d'effets
Acier et couche organique sur chrome noir	0.94	0.2	Peu d'effets

Tableau 2.B. Propriétés optiques de quelques surfaces sélectives

Les propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes [4], [13] sont listées dans le tableau 3.B

Matériau	Epaisseur (mm)	Transmissivité (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Conductivité thermique (W/m. K)
Verre à vitre	3	85-92	2700	840	0.93
Polycarbonate	3.2	82-89	1200	1260	0.2
Polyméthacrylate	3.2	89-92	1200	1460	0.2
Polyster armé	1	77-90	1400	1050	0.21
Polyfluoroéthyle propylène	0.05	97	2.51	1170	0.25
Polyfluorure vinyle	0.1	93	1.5	1380	0.12

Tableau. 3. B. Propriétés optiques et thermiques de quelques surfaces transparentes

Le tableau 4.B regroupe le degré d'émissivité de quelques matériaux

Matériaux	Température (°C)	Emissivité
Aluminium nu après laminage	170	0.04
Aluminium anodisé noir	50	0.98
Béton	20	0.93
Glace lisse	0	0.97
Fer poncé	20	0.24
Verre	90	0.94
Cuivre légèrement ternis	20	0.04
Cuivre oxydé	130	0.76
Acier trempé	200	0.52
Acier oxydé	200	0.79

Tableau 4.B. Degré d'émissivité de quelques matériaux

Le tableau 5.B donne les propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolants [4]

Matériau	Conductivité thermique (W/m. K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg. K)	Diffusivité thermique 10 ⁻⁷ m ² /s
Air à 20 °C	0.025	1.2	1003	208
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6
Laine de verre	0.036	40	840	10.7
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine de roche	0.04	40	840	11.9
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47
Feutre d'amiante	0.047	116	800	5.1
Liège expansé	0.048	120	1380	2.9
Perlite	0.048	60	840	9.5
Silicate de calcium	0.052	200	920	2.8
Magnésie	0.055	200	880	3.1
Béton cellulaire	0.075	280	800	3.3
Vermiculite	0.09	80	880	12.8
Papier journal comprimé	0.105	130	1340	6
Bois de pin	0.118	500	1210	1.95
Papier	0.14	700	1340	1.5
Bois de sapin	0.144	535	272	9.9
Caoutchouc	0.153	1200	2170	0.6
Pvc	0.166	1380	1000	1.2
Bois de chêne	0.198	825	2400	1.0
Plâtre	0.35	800	800	5.5
Brique	0.697	1700	900	4.6

Tableau 5.B. Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants

Annexe C

Les méthodes de discrétisation

Dans le but de passer d'un problème continu (exact) au problème discret (approché), on peut utiliser une des méthodes suivantes :

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis.
- La méthode des volumes finis.

1. Méthode des différences finies

Elle consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées ou combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage.

La méthode des différences finies présente des avantages à savoir, une grande simplicité d'écriture, et un faible cout de calcul, et quelques inconvénients tels que une limitation de la géométrie des domaines de calcul, des difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue ainsi que l'absence de résultats de majorations d'erreurs.

Nous donnons dans ce qui suit quelques formules d'approximation des dérivées par des différences finies pour la dérivée première :

- Différence divisée progressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_i}{h} \quad (1.C)$$

- Différence divisée progressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{-u_{i+2} + 4 \times u_{i+1} - 3 \times u_i}{2 \times h} \quad (2.C)$$

- Différence divisée régressive d'ordre un

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_i - u_{i-1}}{h} \quad (3. C)$$

- Différence divisée régressive d'ordre deux

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{3 \times u_i - 4 \times u_{i-1} + u_{i-2}}{2 \times h} \quad (4. C)$$

- Différence divisée centrée

$$\frac{du}{dx} \approx \frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{h} \quad (5. C)$$

Avec :

$$h = x_{i+1} - x_i \quad (6. C)$$

2. Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis permet de résoudre de manière discrète une EDP dont on cherche une solution approchée suffisamment fiable. De manière générale, cette EDP porte sur une fonction u , définie sur un domaine. Elle comporte des conditions aux bords permettant d'assurer existence et unicité d'une solution.

La méthode des éléments finis présente les avantages suivants :

- Traitement possible de géométries complexes.
- Détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- Possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

Mais également quelques inconvénients dont :

- Complexité de mise en œuvre.
- Coût en temps de calcul et en mémoire.

Quelques formules d'approximation des dérivées partielles par des différences finies pour les dérivées partielles premières :

➤ Différences divisées progressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i,j}}{\Delta x} \quad (7.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j}}{\Delta y} \quad (8.C)$$

➤ Différences divisées régressives

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i-1,j}}{\Delta x} \quad (9.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j} - u_{i,j-1}}{\Delta y} \quad (10.C)$$

➤ Différences divisées centrées

$$\frac{\partial u}{\partial x}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i+1,j} - u_{i-1,j}}{2 \times \Delta x} \quad (11.C)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y}(x_i, y_j) \approx \frac{u_{i,j+1} - u_{i,j-1}}{2 \times \Delta y} \quad (12.C)$$

3. Méthode des volumes finis

Elle intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit des approximations discrètes conservatives, et apparait particulièrement adaptée aux équations de la mécanique des fluides.

La mise en œuvre de cette méthode est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles, cependant, elle permet d'utiliser des volumes élémentaires de forme élémentaire quelconque, donc de traiter des géométries complexes.

Dans ce qui suit l'approche des volumes finis en dimension un :

A partir d'un maillage en volume finis, où on prend les inconnues x_i au centre du volume de contrôle on a :

$$u''(x_i) = \frac{d^2 u}{dx^2}(x_i) = \frac{u_{i+1} - 2 \times u_i + u_{i-1}}{h^2} \quad (13.C)$$

Annexe D

Méthodes de résolution numérique

1. Méthodes itératives

Il existe deux grandes familles de méthodes numériques qui permettent de résoudre les systèmes d'équations linéaires [8].

*Les méthodes directes

Elles conduisent à une solution en un nombre fini d'étapes, et sans les erreurs d'arrondi, cette solution serait celle du système. On peut citer les méthodes de Gauss, de Gauss-Jordan, de Croot et Doolittle et de Cholevsky,.....

*Les méthodes itératives

Elles font passer d'un vecteur estimé $X^{(k)}$ de la solution, à un autre estimé $X^{(k+1)}$ de cette solution. S'il y a convergence, la solution ne pourrait donc être atteinte qu'après un nombre infini d'opérations. On peut citer les méthodes de Jacobi, de Gauss-Seidel, et de relaxation,...

La méthode de Gauss-Seidel a été choisie pour résoudre les systèmes d'équations obtenus au chapitre III, pour les raisons suivantes [8], [9]:

- La matrice obtenue est creuse c'est-à-dire qu'un grand nombre des éléments de la matrice sont nuls en plus du fait qu'elle a une structure bande.
- Elle consomme moins de mémoire car elle ne fait appel qu'à des produits matrice vecteur.
- Elle converge rapidement.

Pour résoudre un système linéaire par la méthode itérative de Gauss-Seidel [8], on opère comme suit :

$$\text{Soit : } AX=B \quad (1.D)$$

A : une matrice carrée d'ordre n.

Ecrivons A sous la forme suivante :

$$A=M-N \quad (2.D)$$

L'équation (1.D) peut s'écrire:

$$MX=NX+B \quad (3.D)$$

La méthode itérative associée à l'égalité (3.D) consiste, à partir d'un vecteur initial $X^{(0)}$ à générer la suite $X^{(1)}, X^{(2)}, \dots, X^{(k+1)}$ de la manière suivante :

$$X^{(k+1)}=M^{-1}NX^{(k)}+M^{-1}B \quad (4.D)$$

Cette suite d'égalités peut être représentée par la relation itérative suivante :

$$X^{(k+1)}=T X^{(k)}+V \quad (5.D)$$

Où :

$$T=M^{-1}N \quad (6.D)$$

$$V=M^{-1}B \quad (7.D)$$

Il est évident qu'on doit choisir une matrice T qui assure la convergence de telle sorte que $TX+V$ ne soit pas chère à calculer. Dans le cas de la méthode de Gauss-Seidel :

$$A=M-N \quad (8.D)$$

Où :

$$M=D-L \quad (9.D)$$

$$N=U \quad (10.D)$$

On réécrit (5.D) de la manière suivante :

$$X^{(k+1)}=(D-L)^{-1} U X^{(k)}+(D-L)^{-1}B \quad (11.D)$$

Comme l'inverse de (D-L) peut être compliqué à calculer, il est préférable d'écrire le système comme suit:

$$X^{(k+1)}=D^{-1}LX^{(k+1)}+D^{-1}UX^{(k)}+D^{-1}B \quad (12.D)$$

En développant cette récurrence vectorielle on obtient:

mathématiciens Carl Runge et Martin Wilhem Kutta qui élaborèrent cette méthode en 1901.

La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 (RK4) est très couramment utilisée pour la résolution des équations différentielles ordinaires (EDO), et très stable pour les fonctions courantes de la physique.

La méthode de RK4 est dérivée de la méthode d'Euler, elle utilise trois points intermédiaires pour progresser du point (x_i, y_i) au point (x_{i+1}, y_{i+1}) suivant les calculs suivants [37]:

$$T1 = h \times f(x_i, y_i) \quad (18.D)$$

$$T2 = h \times f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T1}{2}\right) \quad (19.D)$$

$$T3 = h \times f\left(x_i + \frac{h}{2}, y_i + \frac{T2}{2}\right) \quad (20.D)$$

$$T4 = h \times f(x_i + h, y_i + T3) \quad (21.D)$$

$$Y_{i+1} = h \times (T1 + 2 \times T2 + 2 \times T3 + T4)/6 \quad (22.D)$$

Avec :

$$h = x_{i+1} - x_i \quad (23.D)$$

Les méthodes de Runge-Kutta présentent les avantages et les inconvénients suivants :

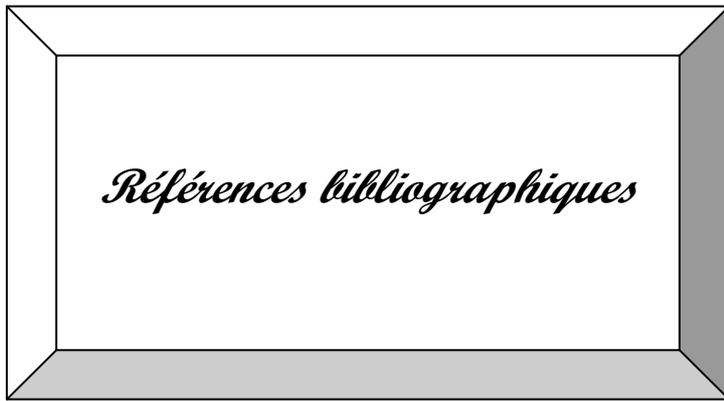
Les avantages

- Elles sont des méthodes à mise en route autonome grâce à l'utilisation des conditions initiales dès le début du calcul.
- Ce sont des méthodes pas à pas : pour obtenir y_{i+1} on n'a besoin que de l'information obtenue au point précédent (x_i, y_i) .
- Elles ne nécessitent pas le calcul des dérivées de $f(x, y)$.

Les inconvénients

- Elles sont assez longues, exigeant à chaque pas plusieurs calculs de $f(x, y)$.

- La détermination de l'erreur de troncature n'est pas aisée. Cependant, certains auteurs ont donné des règles simples, comme Collatz si : $\left| \frac{T_2 - T_3}{T_1 - T_2} \right|$ dépasse quelques centièmes il faut diminuer h.
- Ces méthodes peuvent donner dans certains cas de mauvais résultats même si les erreurs de troncature sont faibles, ce phénomène est dit « instabilité partielle » et l'équation différentielle est raide (de petites erreurs : troncature, arrondissement).



Références bibliographiques

- [1] **J, Bernard.** Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [2] **C, Vauge.** Introduction générale sur les différentes énergies renouvelables, Techniques de l'Ingénieur, B263. (1982).
- [3] **A, H, Khedim.** Energie solaire et son utilisation sous forme thermique et photovoltaïque, Centre de Publication Universitaire. (2003).
- [4] **Z, Sen.** Solar energy fundamentals and modeling techniques, Springer. (2008).
- [5] **R, Bernard; G, menguy; M, Schwartz.** Le rayonnement solaire, conversion thermique et applications, Technique et Documentation. (1979).
- [6] **J, A, Duffie; W, A, Beckman.** Solar engineering of thermal processes, John Wiley and Sons. (1980).
- [7] **A, Sfeir ; G, Guarracino.** Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [8] **Ch, Perrin de Brichambaut; C, Vauge.** Le gisement solaire, Technique et Documentation, Paris. (1982).
- [9] **J, Bonal; P, Rossetti.** Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).
- [10] **O, Sotehi.** Etude des caractéristiques de fonctionnement et de la performance d'un distillateur solaire; thèse de magistère, Université de Constantine. (2009).
- [11] **P, H, Communay.** Héliothermique : le gisement solaire, méthodes et calculs, Groupe de Recherche et d'Édition, France. (2002).
- [12] **N, Bellel.** Contribution à la réalisation et simulation d'un capteur plan à eau type collecteur; thèse de magistère, Université de Constantine. (1989).
- [13] **S, A, Hakem ; N, Kasbadji-Merzouk ; M, Merzouk.** Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables, p 153-162. (2008)
- [14] **T, Enrênez; J, P, Bibring; M, Blanc; M, A, Barucci; F, Roques, P, Zarka.** Le système solaire, Éditions et EDP sciences, Paris. (2003).
- [15] **U, Eiker.** Solar technologies for buildings, John Wiley sans Sons, England. (2001).

- [16] **M, Capderou**. Atlas solaire de l'Algérie, O.P.U, Alger. (1985).
- [17] **A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni**. Evaluation du potentiel énergétique solaire, Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [18] **K, Merzouk**. Potentiel énergétique éolien, Bulletin des Energies Renouvelables, N°1, p 11, Juin. (2002).
- [19] **D, K, Edwards**. Capteurs solaires, Edition SCM, paris. (1979).
- [20] **S, El Mokretar; R, Miri; M, Belhamel**. Etude du bilan d'énergie et de masse d'un séchoir de type serre, applications au séchage des produits agro-alimentaires, Revue des Energies Renouvelables, Vol 7, p 109-123. (2004).
- [21] **N, Bellel**. Etude des transferts thermiques le long d'un tube cylindrique appliquée à deux géométries ; thèse de doctorat, Université de Constantine. (2004).
- [22] **A, Degionanni**. Techniques de l'ingénieur, conduction, BE8200. (1981).
- [23] **M, E, A, Bekkouche**. Modelisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires; thèse de doctorat, Université de Tlemcen. (2009).
- [24] **J, P, Petit**. Techniques de l'ingénieur, notions de transferts thermiques par convection, A1540. (1979).
- [25] **S, Kalogirou**. Solar energy engineering: processes and systems, Elsevier. (2009).
- [26] **A, Guedira; A, Benallou**. Procédure de qualification des capteurs plans sous ensoleillement naturel au Maroc, Revue des Energies Renouvelables, journées de thermique, p 79-84. (2001).
- [27] **A, Sfeir ; G, Guarracino**. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [28] **J, Desautel**. Les capteurs héliothermiques, Edisud. (1979).
- [29] **J, M, Radigeois**. Installations solaires à capteur plan, B268-1. (1980).
- [30] **A, A, Zaid; A, Moulla; M, S, Hantala; J, Y, Demsons**. Amélioration des performances des capteurs solaires plans à air: application au séchage de l'oignon jaune et du hareng, Revue des Energies Renouvelables, vol 4, p 69-78. (2001).

- [31] **F, Benyelles; B, Benabadjia; B, Benyoucef; Z, Ziani.** Comparaison entre un capteur à aérogel de silice et d'autres capteurs plans, 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique. (2007).
- [32] **K, Aoues; N, Moummi; A, Moummi; M, Zellouf; A, Labed; E, Echouri.** Etude de l'influence des rugosités artificielles sur les performances thermiques des capteurs solaires plans à air, Revue des Energies Renouvelables, Vol 11, N°2, p219-227. (2008).
- [33] **K, Aoues; N, Moummi; M, Zellouf; A, Moummi; A, Labed; E, Achouri ; A, Benchabane.** Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire plan à air : étude expérimentale dans la région de Biskra, Revue des Energies Renouvelables, vol 12, N°2, p 237-248. (2009).
- [34] **A, Labed; N, Moummi; K, Aoués; M, Zellouf; A, Moummi.** Etude théorique et expérimentale d'un capteur solaire plan à air muni d'une nouvelle forme de rugosité artificielle, Revue des Energies Renouvelables, Vol 12, n° 4, p 551-561. (2009).
- [35] **H, Abdi ; N, Ait Messaoudene.** Etude expérimentale et théorique des performances de deux capteurs plans à contact direct eau-plaque d'absorption, Revue des Energies Renouvelables, Chemss, p 53-60. (2000).
- [36] **N, Hamani ; A, Moummi ; N, Moummi ; A, Saadi ; Z, Mokhtari.** Simulation de la température de sortie de l'eau dans un capteur solaire cylindro-parabolique dans le site de Biskra, Revue des Energies Renouvelables, Vol 10, n° 2, p 215-244. (2007).

تأثير العوامل الداخلية و الخارجية على الفعالية اللحظية للملقط الحراري

ملخص

تمنح الشمس للأرض كميات هائلة من الطاقة التي يمكن استغلالها بعدة طرق. في هذه المذكرة سنتطرق إلى كيفية استغلال الطاقة الحرارية الشمسية باستعمال ملقط حراري مائي. تعتبر دراسة اثر العوامل الداخلية و الخارجية على الفعالية اللحظية للملقط الحراري ذات أهمية كبرى قبل تصميمه. تلبية لهذه الضرورة قمنا بدراسة التصرف الحراري للملقط في حالة النظام الدائم و الانتقالي و ذلك بتطوير برنامج حسابي في المخبر.

حل جملة المعادلات التي تحكم التصرف الحراري للملقط تم بطريقتين عدديتين مختلفتين. أثبتنا صحة النتائج التي تحصلنا عليها بعمل تجريبي أنجز في نفس الظروف الجوية في مركز تطوير الطاقات المتجددة. سمحت النتائج المتحصل عليها بتعيين تأثير العوامل الداخلية و الخارجية على الفعالية اللحظية للملقط الحراري و بتبيين الفعل الهام للإشعاع الشمسي.

الكلمات المفتاحية: ملقط حراري- نظام انتقالي- نظام دائم- فعالية لحظية

Effect of internal and external parameters on the working characteristics of the flat plat collector

Abstract

The sun gives to the earth gigantic quantities of energy that can be used under different forms.

In this work, we have studied the way to exploit the solar energy by thermal voice by using a flat plat collector.

Before designing this device, it is important to study the effect of internal and external parameters on the working characteristics of the flat plat collector on permanent and transient regimes.

For this, we have developed a calculating program in the laboratory. The resolution of the system of equations governing the thermal behavior of the flat plat collector has been done by using two numerical methods, Gauss-Seidel method and Runge Kutta 4 method. The results obtained have been valided by an experimental work in the same metheorogical data in the center of development of renewable energies.

The results obtained allow us to precise the effect of internal and external parameters on the efficiency of the flat plat collector, and to show the important effect of the incident solar radiation.

Key words: flat plat collector- transient regime- permanent regime- efficiency

*Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur
solaire plan*

Résumé

Le soleil fournit à la terre de gigantesques quantités d'énergie qui peuvent être exploitée sous des formes diverses. Dans le présent mémoire, l'exploitation de l'énergie solaire par voie thermique en utilisant un capteur solaire plan à eau a été étudiée.

Avant de concevoir un tel dispositif, il est d'une grande importance d'accorder une attention particulière à l'effet des paramètres opérationnels internes et externes sur les performances de cet appareil thermique.

Pour répondre à cette nécessité, nous avons étudié le comportement thermique d'un capteur solaire plan à eau en régimes permanent et transitoire, en développant un programme de calcul au laboratoire. La résolution du système d'équations obtenu est abordée par deux approches numériques, la méthode de Gauss-Seidel et la méthode de Runge Kutta d'ordre 4. Les résultats obtenus ont été validés par un travail expérimental qui a été mené dans les mêmes conditions météorologiques au Centre de Développement des Energies Renouvelables.

Les résultats que nous avons obtenus ont permis de préciser l'effet des paramètres internes et externes sur le rendement instantané du capteur, et de mettre en évidence l'effet prédominant de l'éclairement énergétique.

Mots clefs : capteur solaire plan, régime permanent, régime transitoire, rendement instantané.