

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

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

N° :...../2018



DOMAINE : Sciences de la matière

FILIERE : Physique

**OPTION : Physique Energétique
et Energies Renouvelables**

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

Par: DEHIRI Zohra

Intitulé

**Etude numérique d'un capteur solaire
thermique plan dans la région de Boussaâda**

Soutenu le 25/06 /2018 devant le jury composé de:

Dr. Ben hamida Mohamed	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Président
Pr. Mayouf Si Abdallah	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Rapporteur
Dr. Boudilmi Aissa	Université Mohamed Boudiaf- M'sila	Examineur

Année universitaire : 2017/2018

Dédicace

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Ma mère, qui a travaillé pour mon succès, à cause de son amour et de son soutien pour moi.

Mon père, qui peut se vanter et trouver ici à la suite des années de sacrifices et de difficultés pour m'aider.

Mes sœurs : Safia ,Sabrina , Chahrazad, Imane , Isra , Ibtihale.

*Toute la famille **DEHIRI** .*

*Je n'oublie pas tous mes amis surtout MOUISSAT Zahra , NOURI Kaouter, MESALI
HAOUA,BEN TOUMI Hadjer.*

DEHIRI Zohra

Remerciements

Remerciements

Ce travail a été réalisé au département de physique.

En premier lieu, Je remercie ALLAH (ﷻ) le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

*Je remercie vivement mon Encadreur **PR.SIABDALLAHMAYOUF** pour m'avoir dirigé au cours de ce travail.*

*Je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury **Ben hamida Mohamed et Boudilmi Aissa** pour le temps et l'énergie qu'ils ont dédiés à la lecture et à la correction de mon manuscrit.*

Enfin, nous adressons également nos remerciements à tous les membres du département de physique

DEHIRI Zohra



Sommaire

Sommaire

Dédicaces	I
Remerciement	II
Sommaire	III
Liste des figures	VII
Liste destableaux.....	IX
Nomenclature	X
Introduction	XIV
INTRODUCTION GENERALE	
I.1. L'énergie solaire thermique	1
I.2. Définition de capteur solaire thermique	1
I.3. Principes de capteur solaire thermique.....	2
I.4.Types des capteurs solaires.....	2
I.4.1. Les capteurs solaires thermiques	2
I.4.2. Capteurs solaires photovoltaïques	2
I.5. Composants des capteurs solaires thermiques.....	2
I.5.1. Le transfert de l'énergie	3
I.5.2. Le stockage	3
I.6. Les différents modèles des capteurs solaires thermiques	3
I.6 .1. Types des capteurs solaires plans	3
I. 6.1.1. Les capteurs plans sans vitrag	3
I.6.1.2. Les capteurs plans vitrés.....	4
I 6.2. Les capteurs sous vide	5
I.6.3. Le capteur cylindro-parabolique.....	5
I.6.4. Le capteur CPC (Compound Parabolique Concentration)	6
I.7. Constituants d'un capteur solaire plan.....	7
I.7.1. Une couverture transparente	7
I.7.2. Partie absorbante.....	7
I.7.3. L'isolation thermique	8
I.7.4. Le coffre	9
I.8. Paramètres régissant le fonctionnement d'un capteur solaires plan	9

I. 8.1. Paramètres externes	9
I. 8.2. Paramètres internes.....	9
I.9. L'utilisation des capteurs.....	10
I.10. Conclusion	10

CHAPITRE II : GISEMENT SOLAIRE

II.1.Introduction	12
II.2. Le soleil	12
II.3. La constante solaire	12
II.4. Aspects géométriques du rayonnement solaire	13
II.5. Mouvements de la terre	13
II.6. La sphère célest	13
II.7. Les coordonnées célestes	14
II.7.1.Les coordonnées géographiques.....	14
II.7.2. Les coordonnées horaires	15
II .7.3. Les coordonnées horizontales	16
II .8. Le temps solaire	17
II .8.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).....	17
II.8.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)	17
II.8.3. Le Temps Universel (T.U)	18
II. 8.4. Le Temps Légal (TL)	18
I.8.5. le Temps Civil	18
II. 9. Direction des rayons solaires par rapport à un plan	19
II.10. Notion du rayonnement solaire	21
II.11. Les différents types de rayonnement solaire	21
II .12. Rayonnement solaire	22
II.12.1. Rayonnement direct.....	23
II.12.2. Rayonnement diffus	24
II.12.3. Rayonnement global	24
II.12.4. Présentation de différents instruments de mesure du rayonnement solaire	25
II.13. Le gisement solaire en Algérie.....	26

II.14. Conclusion.....	27
------------------------	----

CHAPITRE III : MODELE MAHEMATIQUE

III.1.Rappels sur les transferts de chaleur.....	28
III.2. Les modes de transfert thermique	28
III.2.1. La conduction.....	28
III.2.2.La convection.....	30
III.2.2.1. La convection forcée.....	30
III.2.2.2. La convection naturelle	30
III.2.3. Le rayonnement.....	31
III.3. Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré.....	31
III.3.1. Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur.....	31
III.3.2. Échanges thermiques au niveau de la vitre	35
III.4. Perte globale d'énergie	37
III.4.1.Coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur	37
III.4.2. Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur	37
III.4.3. Coefficient des pertes thermiques latérales.....	38
III.2.3. Bilan thermique du capteur solaire plan en régime transitoire	38
III.5. Rendement instantané du capteur solaire.....	39

CHAPITRE IV:ETUDE NUMERIQUE

IV.1. Principe de simulation	40
IV.1.2. procédure de calculi.....	40
IV.2. Le programme principale.....	40
IV.2.1. Présentation des sous –programmes	41
IV.1.hypothèses générales	43
IV.3.2 . Analogies électriques.....	43
IV.3.3. Méthode mathématique de resolution.....	44

CHAPITRE V:RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.INTRODUCTION	46
V.2. Caractéristiques du capteur plan étudié.	46

V.3. Validation du code de calcul	47
V.4. Angle d'inclinaison optimale	47
V.5 . Puissance solairesaisonnaire	49
V.6.variation temporelles de la température des différents composants du capteur	50
V.7. Le rendement thermique horaire	52
CONCLUSION	53
REFERENCE	
RESUME	

*Liste des figures et
des tableaux*

Liste des figures

Chapitre I

Figure (I. 1) : capteur solaire thermique	2
Figure (I. 2.) : Capteurs plans sans vitrage	4
Figure (I. 3.) : Capteur plan vitré	5
Figure (I.4) :Capteur sous vide	5
Figure (I. 5) : Système à réflecteur cylindro-parabolique.....	6
Figure (I. 6): Coupe schématique du capteur CPC	6

chapitre II

Figure(II.1) : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.....	13
Figure(II.2) : La sphère céleste	14
Figure (II.3): Les coordonnées géographique.....	15
Figure (II.4) : coordonnées horaires.....	16
Figure (II.5) : Coordonnées horizontales	17
Figure(II.6) : Représentation des vecteurs unitaires	20
Figure (II.7): Classification des divers rayonnements électromagnétiques	22
Figure (II.8): Les composants du rayonnement solaire	22
Figure (II.9): Le radiomètre de Crookes	25
Figure (II.10): Un pyranomètre.....	26
Figure (II.11): Un pyrhéliomètre	26
Figure (II.12): Carte du monde de l'enseillent moyen annuel.....	27

Chapitre III

Figure (III.1.) : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.....	28
--	----

Chapitre IV

Figure (IV.1): organigramme générale	42
Figure (IV.2): Schéma d'une tranche de tube caloporteur.....	43
Figure(IV.3): Découpage du distillateur en tranches indépendantes	45
Figure (II.4): Maillage par différence finies des éléments d'une tranche.....	45

Chapitre V

Figures (V.1) : Comparaison entre la température de sortie de l'eau expérimentale et numérique.....	47
Figure (V.2) : Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison. (date: 20 Janvier ; NJ=20).....	48
Figure (V.3) : Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison (date: 22 avril NJ=112).....	48
Figure (V.4): Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison (date: 21 Juin NJ=172).....	49
Figure (V.5): Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 60°(date: 20 Janvier ; NJ=20)	49
Figure (V.6): Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 30°(date: 22 Avril NJ=112).....	50
Figure (V.7): Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 20° (date: 21 Juin NJ=172).....	50
Figure (V.8): Evolution temporelle des températures (date: 20 Janvier).....	51
Figure (V.9): Evolution temporelle des températures (date: 22 Avril NJ=112)	51
Figure (V.10) : Evolution temporelle des températures (date: 21 Juin NJ=172).....	52
Figures (V.11) : rendement thermique horaire du capteur.....	52

Liste des tableaux

CHAPITER II

Tableau (II.1): Valeur des coefficients de trouble atmosphérique.....	23
Tableau (II.2): Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude.....	24

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
E	Énergie	J
Ic	La constantesolaire	w/m ²
Δ	La déclinaison	Degré
n_j	Le numéro du jour dans l'année	-
Ω	L'anglehoraire	Degré
A	L'azimutsolaire	Degré
H	La hauteur du soleil	Degré
T.S.M	Le Temps Solaire Moyen	Heure
T.U	Le Temps Universel	heure
TL	Le Temps Légal	Heure
N	le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires	-
N	le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.	-
a et b	Coefficients traduisant les troubles atmosphérique	-
P	la pression atmosphérique en fonction de l'altitude	Bar
I _G	Rayonnement global	w/m ²
Φ	flux de chaleur	W
Q	quantité de chaleur	W
T	Temperature	c°
H	coefficient de convection	
S	surface de contact absorbeur fluide caloporteur	
L	longueur du tube	M
D	Diameter	M
I ^g	clairement global incident sur le plan incliné du capteur plan.	(W/m ²
U	Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur	w/k.m ²
M	La masse	Kg
Lettr Greek	Désignation	Unité
A	L'angle entre le méridien local et la normale au plan	Degré
γ	γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan consid	Degré
k	coefficient de conductivité thermique	W/m.K
A	surface d'échange	m ²

ε	émissivité thermique du matériau	-
Σ	constante de Stefan-Boltzmann.	$W/m^2.K^4$
B	inclinaison du capteur	Degré
Gr	nombre de Grashof	-
Ω	coefficient de Darcy.	-
	nombre de Reynolds	-
R^e		
P_r	nombre de Prandtl.	-
ν	viscosité cinématique de l'eau (m^2/s).	m^2/s
T	coefficient de transmission	
η	Rendement instantané du capteur solaire	-
Qu	puissance utile récupérée par le fluide caloporteur	W

Indice

Désignation

ab	l'absorbeur
ii	la face intérieure de l'isolant
il	l'isolant lateral
i	épaisseur de l'absorbeur.
Abi	contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal
Isol	l'isolant horizontal
isollat	l'isolant lateral
f	fluide.
P	de la paroisolide
v	lavitre.
a	Air
i	Intérieur
am	Ambiante
C	Capteur



Introduction

INTRODUCTION

Compte tenue de l'épuisement des énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme l'énergie solaire. L'objectif de ce projet est utiliser cette énergie pour obtenir de l'eau chaude sanitaire, cette est la plus dominante et aussi la plus facilement exploitable. De part la diversité de son utilisation et l'intérêt qu'elle porte à travers le monde, cette forme d'énergie a connu un grand essor ces dernières années.

Toutefois, le prix élevé de cette énergie par rapport au prix des énergies non renouvelables représente un handicap face à l'expansion de son utilisation.

L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde.

L'utilisation de l'énergie solaire la plus simple et la plus directe, est la production d'eau chaude sanitaire. Les trois parties de fonctionnement d'un système de chauffage solaire sont : la captation, le stockage et la distribution. La captation est la partie essentielle pour la conversion de l'énergie solaire. Elle est représentée par le capteur solaire. C'est ce dernier qui transforme l'énergie solaire en quantité de chaleur qu'il transmet au fluide caloporteur circulant dans son absorbeur. Vu le rôle important que joue le capteur solaire dans la conversion de l'énergie solaire en énergie thermique, plusieurs recherches ont été menées sur l'étude du capteur solaire plan avec le but d'améliorer son rendement instantané qui représente la performance la plus caractéristique.

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. Une étude numérique est menée à la ville de Boussaâda, une série des calculs nous a permis d'obtenir des résultats qui sont comparés avec des résultats expérimentales obtenus dans cette ville représentés graphiquement avec une discussion.

Le présent travail comporte une introduction et cinq chapitres :

- Le premier chapitre présente une introduction générale sur les différents types des capteurs solaires thermiques sous forme d'une recherche bibliographique .

- Le deuxième chapitre consiste à l'étude du gisement solaire avec une présentation de quelques notions et définitions astronomiques, souvent utilisées dans tous les domaines relatifs à l'énergie solaire.
- Dans le troisième chapitre, l'intérêt est porté sur les différents échanges thermiques mis en jeu au sein de notre chauffe-eau-solaire afin de définir les équations régissant le comportement thermique de ce dernier
- Le quatrième chapitre consiste à l'étude numérique ainsi que le principe de simulation .
- Les résultats numériques sont regroupé dans le cinquième chapitre, il présente la variation des puissances globales et les puissances solaires absorbés par le vitre du capteur et les températures des différents composants du capteur en fonction de temps dan trois saisons.
- En fin, cet manuscrite est terminé par une conclusion générale.

Chapitre I :

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction

L'exploitation de l'énergie solaire au moyen de capteurs relève de deux technologies bien distinctes : l'une produit des calories, c'est l'énergie solaire thermique, et l'autre produit de l'électricité et c'est l'énergie photovoltaïque. Abondante, inépuisable et non polluante, ce sont ces caractéristiques qui ont suscité l'intérêt à ce type d'énergie, malgré le coût d'exploitation lourd au départ (coûts de l'installation que ce soit photovoltaïque, thermique ou hybride), qui fait qu'elle n'est pas totalement gratuite. L'utilisation de cette énergie nécessite une certaine connaissance, pour cette raison on va définir dans le deuxième chapitre quelques notions sur le gisement solaire comme la géométrie solaires, les données astronomiques, le rayonnement global et le spectre solaire[1].

I.1. L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique désigne l'énergie récupérée à partir de la lumière du soleil par des capteurs solaires thermiques vitrés pour assurer le chauffage direct de l'eau et des locaux. La chaleur concentrée par les panneaux est transférée à un fluide caloporteur. Quatre mètres carrés permettent de répondre aux besoins en eau chaude d'une famille de quatre personnes et dix à vingt mètres carrés assurent le chauffage d'une maison individuelle. Avec un système d'énergie solaire thermique, un chauffage d'appoint reste nécessaire pour les périodes climatiques les plus défavorables [2].

I.2. Définition de capteur solaire thermique

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique ou collecteur solaire) est un dispositif utilisé pour recueillir l'énergie solaire transmise par rayonnement et la communiquer à un fluide caloporteur (gaz ou liquide) sous forme de chaleur, (Fig. I.1). Cette énergie calorifique peut ensuite être utilisée pour le chauffage de bâtiments, pour la production d'eau chaude sanitaire ou encore dans divers procédés industriels.

Le premier panneau solaire a été construit en 1954 par les laboratoires Bell. Il a été appelé batterie solaire mais c'était juste un effet d'annonce car il était trop coûteux à produire. Ce sont les satellites qui ont réellement fait avancer l'énergie solaire dans les années 1960 lors de la course à l'espace [3].

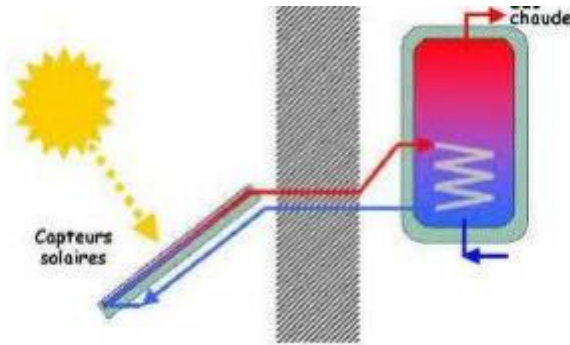


Figure (I.1) : capteur solaire thermique

I.3. Principes de capteur solaire thermique

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur.

Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage.

Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction [3].

I.4. Types des capteurs solaires [4]

Il existe deux grands types de capteurs solaires :

I.4.1. Les capteurs solaires thermiques

Les capteurs de chaleur solaire sont des appareils transformant l'énergie du rayonnement solaire en énergie thermique en se basant sur l'effet de serre.

I.4.2. Capteurs solaires photovoltaïques

Sont des panneaux solaires qui transforment l'énergie du rayonnement solaire en énergie électrique.[4].

I.5. Composants des capteurs solaires thermiques [5]

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

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

4- Un réseau de distribution.

I.5.1. Le transfert de l'énergie

Le transfert de l'énergie d'un capteur solaire thermique vers le ballon de stockage s'effectue de deux façons différentes :

- Soit par circulation avec une pompe commandée par un dispositif de régulation.
- Soit par circulation naturelle ou thermosiphon et que est basé sur le principe de la dilatation causée par une augmentation de la température. En effet l'augmentation de la température du fluide conduit à une diminution de la masse volumique. De ce fait un liquide chaud est plus léger qu'un liquide froid et aura donc la première force qui va mettre le liquide caloporteur en mouvement pour assurer le fonctionnement de chauffe eau solaire[5].

I.5.2. Le stockage

Afin d'assurer le fonctionnement d'un chauffe-eau solaire, il est nécessaire de pouvoir stocker l'eau chaude dans un réservoir, ceci afin de pouvoir l'utiliser pendant la nuit ou pendant les journées sans soleil. Le ballon de stockage doit être calorifugé. Le calorifugeage devra être disposé de façon à permettre la manœuvre et le démontage pour l'entretien des appareils.

Le stockage de l'énergie captée permet de pallier le caractère discontinu de l'énergie solaire . L'accumulation de l'énergie dans le stockage se traduit par une élévation de sa température. Pour apprécier l'efficacité d'un système de stockage , il faut rappeler que le rendement d'un capteur dépend essentiellement de la température moyenne du fluide qui le traverse, donc de la température de fluide au retour du stockage [6].

I.6. Les différents modèles des capteurs solaires thermiques

Afin d'intercepter l'énergie provenant du rayonnement solaire, il existe plusieurs sortes de capteurs solaires[7].

I.6 .1. Types des capteurs solaires plans

I. 6.1.1. Les capteurs plans sans vitrage

C'est le modèle le plus simple, le plus économique mais le moins performant. Il est généralement constitué d'une simple plaque de métal ou de matière plastique (absorbeur) sur laquelle sont collés plusieurs tubes porteurs de fluide caloporteur. Les capteurs plans non

vitrés ne sont pas isolés sur la face avant, c'est pourquoi ils répondent mieux à des applications à basse températures (inférieure à 30°C). Le domaine d'utilisation principal de ce type de capteurs est le chauffage des piscines extérieures. Parce qu'ils n'ont pas de vitrage, ces capteurs absorbent une grande partie de l'énergie solaire. Toutefois, parce qu'ils ne sont pas isolés sur leur face avant, la grande partie de la chaleur absorbée est perdue lorsqu'il y a notamment du vent et que la température extérieure n'est pas assez élevée, (fig.I.2). La typique intégration architecturale qu'autorise ce type de produit permet la mise en œuvre de surface plus grande, pour compenser la différence d'efficacité avec les capteurs plans vitrés, en particulier pendant l'hiver.



Figure (I. 2) : Capteurs plans sans vitrage[8]

I.6.1.2. Les capteurs plans vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures, (Fig.I.3).

Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux aussi l'air de ventilation.



Figure (I. 3) : Capteur plan vitré

I 6.2. Les capteurs sous vide

Les capteurs solaires "sous vide" (Fig.I.4). sont composés d'une série de tubes en verre transparents. Dans chaque tube il y a une plaque absorbante pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour favoriser le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de la plaque absorbante et la plaque absorbante reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement à ce dissiper sous forme de grande longueur d'onde. Ainsi, on peut réaliser des capteurs solaires performants sans une isolation thermique rapportée ou un coffre de protection.[7].7



Figure (I.4) : Capteur sous vide

I.6.3. Le capteur cylindro-parabolique

Les concentrateurs solaires utilisent des surfaces réfléchissantes (miroirs) paraboliques ou cylindro-paraboliques (fig.I.5) pour concentrer les rayons solaires respectivement dans le foyer ponctuel ou dans le foyer linéaire de ces surfaces. Dans le foyer ponctuel ou le long du foyer linéaire se trouvent les récepteurs (absorbateurs) qui captent la chaleur solaire ainsi concentrée. Naturellement, ces concentrateurs doivent suivre le mouvement du soleil.



Figure (I. 5) : Système à réflecteur cylindro-parabolique

I.6.4. Le capteur CPC (Compound Parabolic Concentration)

C'est un capteur plan ou à tubes sous vide avec un réflecteur "concentrateur à segments paraboliques" (fig.I.6). Les réflecteurs CPC ont une géométrie qui permet au rayonnement solaire direct et diffus d'atteindre l'absorbeur, car la surface de l'absorbeur est cylindrique couvrant la totalité de la surface du tube intérieur. Ainsi, la partie face au soleil peut capter le rayonnement direct et la partie cachée peut capter le rayonnement par réflexion [9].

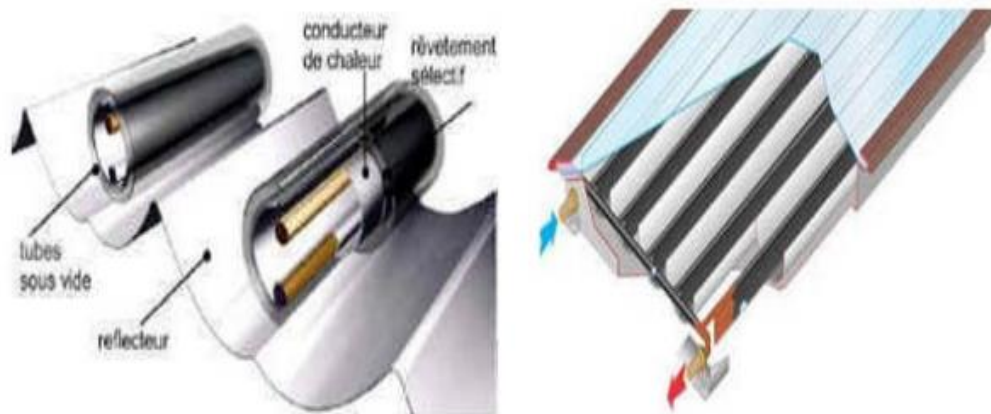


Figure (I. 6): Coupe schématique du capteur CPC [9]

I.7. Constituants d'un capteur solaire plan [10]

Les techniques et les matériaux utilisés dans la fabrication des capteurs solaires sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel du chauffage, du sanitaire et des verrières. Généralement, un capteur solaire est composé des éléments suivants:

- vitre
- absorbeur
- fluide caloporteur isolant

I.7.1. Une couverture transparente

La couverture est la surface à travers laquelle le rayonnement solaire non concentré est admis dans le capteur. On ne peut utiliser que des matériaux transparents. L'intérêt d'une couverture transparente habituelle pour le rayonnement solaire est d'autant plus grand que la température de fonctionnement du convertisseur est élevée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles :

- 1- Recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante.
- 2- Transmettre la plus part du rayonnement reçu.
- 3- S'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage.

L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres[9].

I.7.2. Partie absorbante

Il a pour fonction d'absorber le rayonnement solaire incident, de le convertir en chaleur et de transmettre celle-ci à un fluide caloporteur, tout en minimisant les pertes. En général, l'absorbeur n'est qu'une plaque plane en métal dont la couche superficielle donnant sur le soleil, doit avoir d'un coefficient d'absorption le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95.

L'absorbeur doit assurer les fonctions suivantes

- Absorber la plus grande partie du rayonnement incident.
- Transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur.
- N'accepter que le minimum d'échanges thermiques vers l'extérieur pour rendre efficace cette partie[11].

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau, des mélanges eau glycol sont aussi employés à cause des conditions climatiques, ces mélanges ont une chaleur spécifique inférieure à celle de l'eau pure. Par rapport à l'eau, l'air n'a pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été et il n'y a pas de problème de corrosion. Néanmoins l'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux et les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

D'autre part, quelque soit le système, le contact entre les tuyaux véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime, soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement entre les tuyaux devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tuyau de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés. Les tuyaux de circulation du fluide en contact avec l'absorbeur seront de préférence placés en parallèle plutôt qu'en serpentin

I.7.3. L'isolation thermique

L'absorbeur doit transmettre l'énergie captée au fluide caloporteur en évitant les pertes thermiques par conduction, par 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 l'ordre de 2.5 cm. En plaçant deux vitres, on limite les pertes dues à la réémission ainsi que les pertes par conduction et par convection [10].

➤ 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. 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. Le choix du matériau à utiliser dépend de [9].

- Sa résistance aux températures de fonctionnement.
- La permanence de ces caractéristiques dans le temps (conductivité thermique).
- La résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie....etc.

I.7.4. 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.[11].

I.8. Paramètres régissant le fonctionnement d'un capteur solaires plan [12]

On peut les classer en deux catégories :

I. 8.1.Paramètres externes

- Paramètres d'ensoleillement : éclairement, position du soleil, durée d'insolation.
- Température extérieure sèche.
- Vitesse du vent sur le capteur.

I. 8.2. Paramètres internes

On distingue :

a) paramètres géométriques :

- paramètres de position : inclinaison, orientation du capteur.
- La surface du capteur

b) paramètres de fonctionnement :

- température d'entrée du fluide caloporteur.
- le débit du fluide caloporteur.
- la température des différentes parties du capteur[12].

I.9. L'utilisation des capteurs [13]

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

Les capteur plan peuvent assurer des températures variant de **30 C°** a **150 C°** .

L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

➤ **Des capteurs fixes :**

Ces capteurs ne bougent pas dans la journée qui est le cas des chauffe-eaux solaires domestiques 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 .[13]

I.10. Conclusion

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

efficacité etc. Dans le chapitre suivant nous allons présenter la partie concernant le gisement solaire et les formules mathématiques pour calculer les puissance solaires absorbé soit par le vitre soit par l'absorbeur du capteur .

Chapitre II :
GISEMENT SOLAIRE

II.1. Introduction

La terre est animée d'un mouvement de rotation autour de l'axe des pôles (nord sud). Le centre de la terre décrit une ellipse ayant le soleil comme foyer. Au lieu de faire l'étude de la terre autour du soleil et de son axe ; il est plus important pour notre étude de s'intéresser au mouvement apparent du soleil dans la sphère céleste.

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 [7].

II.2. Le soleil

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1391000 km (100 fois celui de la terre), sa masse est de l'ordre de 2.1027 tonnes. Toute l'énergie du soleil provient des réactions thermo – nucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde 564,106 tonnes d'hydrogène en 560,106 tonnes d'hélium, la différence (4 millions de tonnes) est dissipée sous forme d'énergie ($E=mc^2$), ce qui représente une énergie totale de 36.1022 KW. La terre étant à une distance de 150.106 km du soleil, elle reçoit approximativement une énergie de 1,8.1014 KW [14].

II.3. La constante solaire

La valeur de flux du rayonnement solaire " I_c ", reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne " I_0 " appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m^{-2} . En première approximation, on peut calculer la valeur de " I_c " en fonction du numéro du jour de l'année " n_j " par la relation suivante [15].

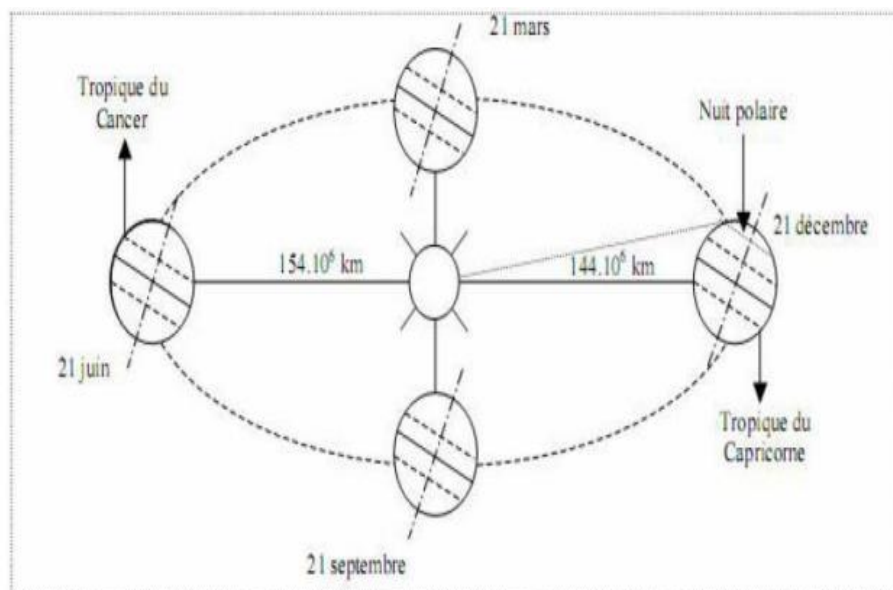
$$I_c = I_0[1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times n_j)] \quad (\text{II.1})$$

II.4. Aspects géométriques du rayonnement solaire

Dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée, notre intérêt va porter dans ce qui suit sur les aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre. La connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire [7].

II.5. Mouvements de la terre

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique [7,16]. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de $149\,675\,106\text{ km}$ [16]. La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles et passant par le centre de la terre appelé l'équateur. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique en fait l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé inclinaison de l'ordre de $23^{\circ}27'$ [7].

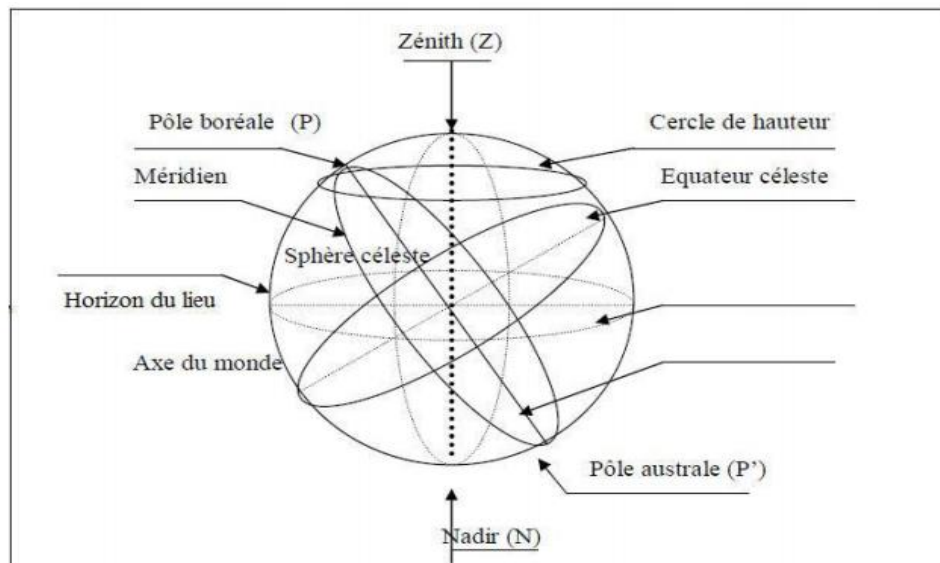


Figure(II.1) : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil

II.6. La sphère céleste

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

différentes caractéristiques sur la sphère elle même comme c'est indiqué sur la figure (figure II.2).



Figure(II.2) : La sphère céleste

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

II.7. Les coordonnées célestes

II.7.1. Les coordonnées géographiques [17]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre (figure II.3).

- La longitude (L) :

C'est l'éloignement par rapport au méridien de **Greenwich**, mesuré en degré. Elle est comptée positivement vers l'est et négativement vers l'ouest, à partir du méridien Greenwich.

- La latitude (Φ) :

C'est l'éloignement d'un point sur la surface de la terre par rapport à **l'équateur**, mesuré en degré (mesurée à partir du centre de la terre), permettent de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

- L'altitude (Φ) :

C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer = 0), elle est exprimée en mètre.

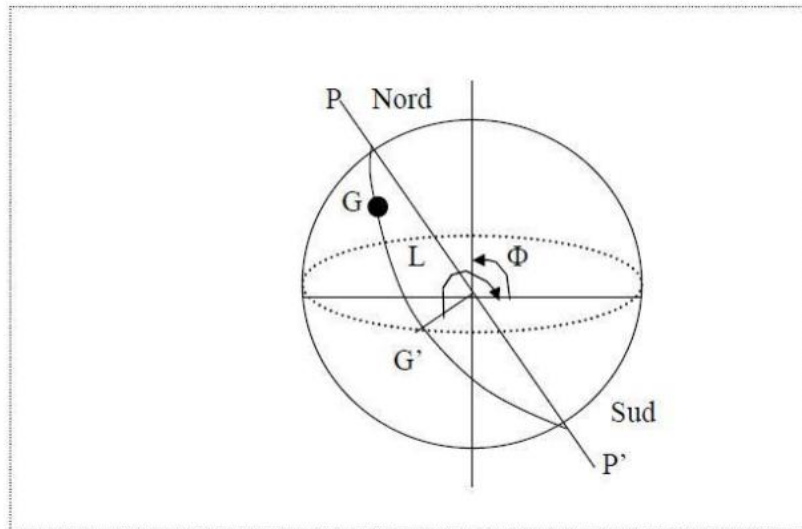


Figure (II.3): Les coordonnées géographiques

II.7.2. Les coordonnées horaires

- La déclinaison (δ) :

C'est l'angle fait par le plan de l'**équateur** avec celui de l'**écliptique**. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours. Elle s'obtient à partir de la formule suivante [16].

$$\delta = 23.45 \sin [(284 + n_j)/365].360 \quad [\text{Degré}] \quad (\text{II.2})$$

Où :

n_j : Le numéro du jour dans l'année compté à partir du 1er Janvier

- L'angle horaire (ω) :

Il est déterminé par la rotation régulière de la terre autour de son axe. Il est compté positivement dans le sens rétrograde de 0° à 360° (figure II.4).

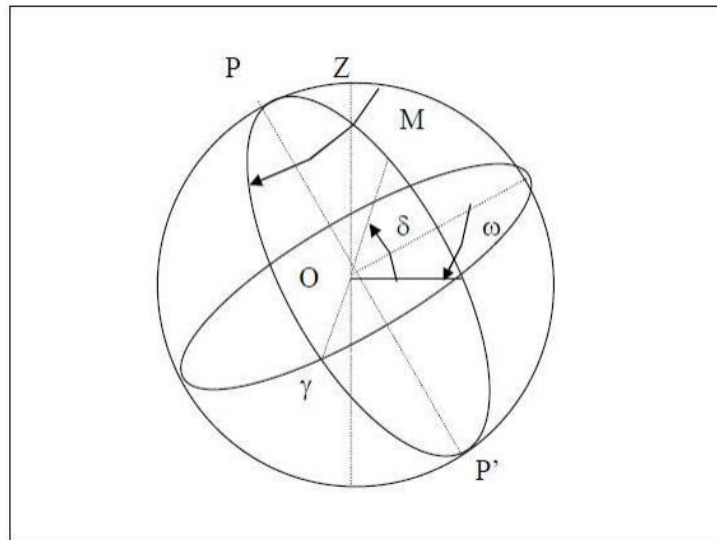


Figure (II.4) : coordonnées horaires

II .7.3. Les coordonnées horizontales

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

L'azimut solaire (a)

Est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre entre le point cardinal **Sud** (dans l'hémisphère Nord) ou Nord (dans l'hémisphère Sud) et la projection sur le plan horizontal local de la droite reliant la terre au soleil. Il est compté de 0° à 360° d'Ouest en Est, ou de 0° à 180° à partir du Sud vers l'Ouest, (figure II.5).

On note ici que **l'azimut solaire** est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de **l'azimut géographique**, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation.

- La hauteur du soleil (h)

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir, On appelle quelque fois **distance zénithale** le complément de l'angle h : $z + h = 90^\circ$ (figure II.5).

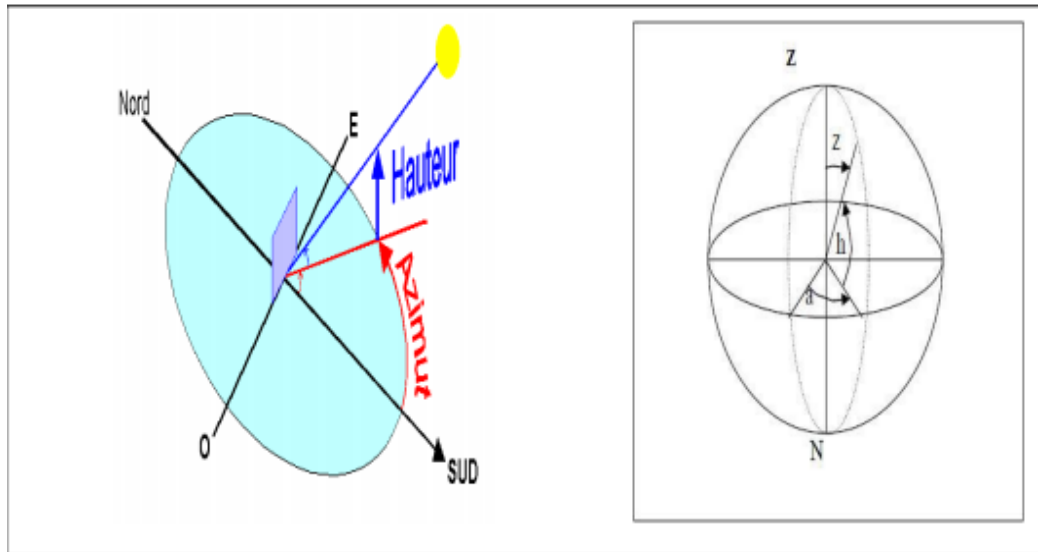


Figure (II.5) : Coordonnées horizontales.

L'équation de passage des coordonnées horizontales aux coordonnées horaires est [4] :

$$\sin (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \sin (\omega)$$

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \sin (\Phi) - \cos (\Phi) \times \sin (\delta)$$

$$\sin (h) = \cos (\Phi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\Phi) \times \sin (\delta)$$

II .8. Le temps solaire

II .8.1. Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω . Il est donné sous la forme suivante [18] :

$$TSV = 12 + \omega/15 \quad (II.3)$$

ω : En degré.

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

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.8.2. Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Il est appelé parfois temps locale (TSM), Il est donné par la relation [18] :

$$Et = TSV - TSM \quad (II.4)$$

Avec :

Et : l'équation du temps, qui corrige le T.S.V par rapport au T.S.M.

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

$$\text{Ou: } N' = (nj - 81) \times 360 / 365$$

Où : nj est le numéro du jour dans l'année.

II.8.3. Le Temps Universel (T.U)

C'est le temps civil moyen du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore **GMT** (Greenwich Mean Time) [18].

$$TU = TSM - (L/15) \quad (II.5)$$

Où : L : est la longitude.

$L > 0$; pour les villes situées à l'Est de Greenwich.

$L < 0$; pour les villes situées à l'Ouest de Greenwich.

$TU = TSM$; pour le méridien de Greenwich.

II.8.4. Le Temps Légal (TL)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par [18] :

$$TL = TU + \Delta H \quad (II.6)$$

Où :

ΔH : le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré. $\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

I.8.5. le Temps Civil

Représente le temps qui a pour origine minuit [18].

II. 9. Direction des rayons solaires par rapport à un plan

On considère un plan quelconque situé dans un lieu de latitude caractérisé par deux angles : α : L'angle entre le méridien local et la normale au plan (figure II.6).

$\alpha = 0$; le plan est orienté vers le Sud.

$\alpha = \pi$; le plan est orienté vers le Nord.

$\alpha = -\pi/2$; le plan est orienté vers l'Est.

$\alpha = \pi/2$; le plan est orienté vers l'Ouest.

γ = l'angle entre le plan horizontal et le plan considéré.

$\gamma = 0$; le plan est horizontal.

$\gamma = \pi/2$; le plan est vertical.

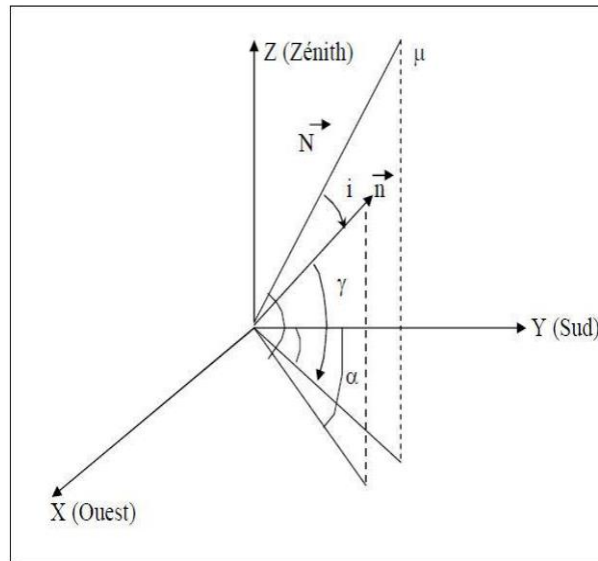
Soit :

N : le vecteur unitaire porté par la direction des rayons solaires.

n : le vecteur unitaire porté par la normale à la surface.

i : l'angle d'incidence (n, N) . (figure II.6)

$$\vec{N} \left\{ \begin{array}{l} \sin(\alpha) \times \cos(h) \\ \cos(\alpha) \times \cos(h) \\ \sin(h) \end{array} \right. \quad \vec{n} \left\{ \begin{array}{l} \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) \\ \cos(\alpha) \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{array} \right. \left. \right\}$$



Figure(II.6) : Représentation des vecteurs unitaires

$$\vec{N} = \|\vec{n}\| \times \|\vec{N}\| \times \cos(i) = \cos(i) .$$

$$\vec{N} \times \vec{n} = \sin(a) \times \cos(h) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + \cos(a) \times \cos(h) \times \cos(\alpha) \cos(\gamma) + \sin(h) \times \sin(\gamma) = \cos(i) .$$

Par conséquent

$$\cos(i) = \cos(h) \times \cos(\gamma) \times \cos(a - \alpha) + \sin(h) \times \sin(\gamma)$$

Exprimons $\cos(i)$ en coordonnées horaires, il en résulte:

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta)) \times \sin(\gamma)$$

Dans les cas particuliers où les surfaces sont horizontales ou verticales avec différentes orientations, l'expression devient:

- **Surface horizontales:** $\gamma = \pi / 2$

$$\cos(i) = (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta)) + \sin(\Phi) \sin(\delta)$$

- **Surface verticales:** $\gamma = 0$

$$\cos(i) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta))$$

- **Surface verticales orientées vers le Sud :** $\alpha = 0$.

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \sin(\delta) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \\ & \sin(\Phi) \sin(\delta) \times \sin(\gamma)) \end{aligned}$$

- Surfaces verticales orientées vers le Nord: $\alpha = \pi$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) - \cos(\Phi) \times \sin(\delta)) \times \cos(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + \sin(\Phi) \sin(\delta) \times \sin(\gamma)) \end{aligned}$$

- Surface verticales orientées vers l'Est: $\alpha = -\pi/2$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & -\cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + \sin(\Phi) \sin(\delta) \times \sin(\gamma)). \end{aligned}$$

- Surfaces verticales orientées vers l'Ouest: $\alpha = +\pi/2$

$$\begin{aligned} \cos(i) = & \cos(\delta) \times \sin(\omega) \times \sin(\alpha) \times \cos(\gamma) + (\sin(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) + (\cos(\Phi) \cos(\omega) \cos(\delta) \\ & + \sin(\Phi) \sin(\delta) \times \sin(\gamma)) \end{aligned}$$

• Surface orientée vers le sud et incline d'un angle β par rapport à l'horizontale

$$\cos(i) = \cos(\delta) \cos(\omega) \cos(\Phi - \beta) + \sin(\delta) \sin(\Phi - \beta)$$

II.10. Notion du rayonnement solaire

Le rayonnement solaire subit un certain nombre d'altération et d'atténuations aléatoires en traversant l'atmosphère; réflexion sur les couches atmosphériques, absorption moléculaire, diffusion moléculaire et par les aérosols (la poussière, les gouttelettes). Au niveau du sol, à cause de la diffusion, une partie du rayonnement est diffuse (c'est-à-dire isotrope). L'autre partie dite directe est anisotrope [7].

II.11. Les différents types de rayonnement solaire

L'homme est exposé à une grande variété de sources d'énergie naturelles ou artificielles qui émettent un rayonnement sur plusieurs bandes du spectre électromagnétique. Les rayonnements se déplacent dans le vide à grande vitesse. On peut les considérer comme des ondes ou des particules qui se déplacent en ligne droite. Les rayonnements électromagnétiques se caractérisent par leur vitesse, leur fréquence et leur longueur d'onde. La figure (II.7), donne une classification de ces rayonnements en fonction de leur longueur d'onde.

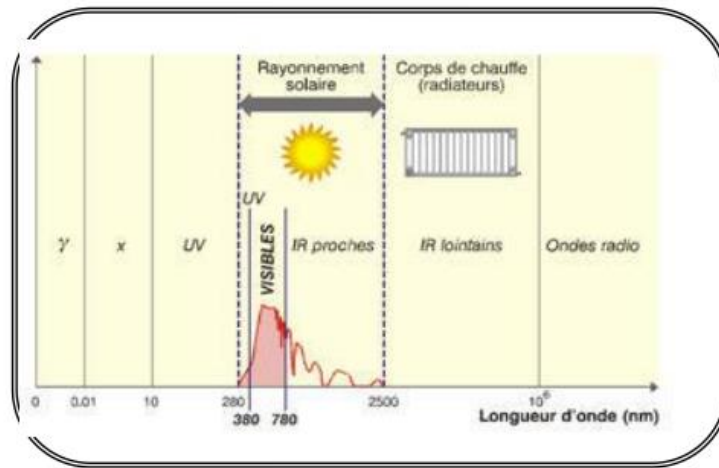


Figure (II.7) : Classification des divers rayonnements électromagnétiques

II .12. Rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m² (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du **rayonnement direct et du rayonnement diffus** (figure II.8) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

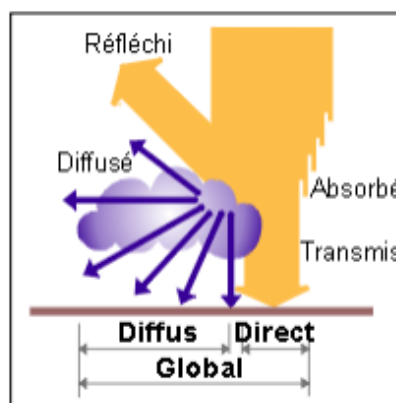


Figure (II.8) : Les composants du rayonnement solaire

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

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

Le rayonnement global qui est la somme du rayonnement direct et diffus. Nous exposons dans ce qui suit les expressions et les principales caractéristiques des deux composantes du rayonnement global.

II.12.1. Rayonnement direct

L'expression du rayonnement direct pour un plan orienté vers le sud est donnée par [8,19] :

$$I_{\text{dir}} = I_c \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \times \cos(i) \quad (\text{II.7})$$

Avec :

$$\cos(i) = \cos(h) \cdot \cos(\gamma) \cdot \cos(a - \alpha) + \sin(h) \sin(\gamma)$$

et

$$\sin(h) = \cos(\Phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\Phi) \sin(\delta)$$

a et b : Coefficients traduisant les troubles atmosphérique (II.1)

P: la pression atmosphérique en fonction de l'altitude.

Tableau (II.1): Valeur des coefficients de trouble atmosphérique

	Ciel Pur	Conduction normale	Zone industrielles
a	0.87	0.88	0.91
b	0.17	0.26	0.43

Tableau (II.2): Variation de la pression atmosphérique avec l'altitude

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

II.12.2. Rayonnement diffus

Le rayonnement diffus provient de tous les éléments irradiés par le soleil. Le flux diffus reçu par la surface de captation se caractérise par deux composantes du flux à savoir :

- Le flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1) donné par la relation :

$$\varphi_1 = \varphi_0 \times \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \quad (\text{II.8})$$

- Le flux émis par le sol (φ_2), donné par l'expression :

$$\varphi_2 = \rho \times \frac{1 - \cos(b)}{2} \times (I_c \times \tau_{\text{dir}} \times \sin(h) + \varphi_0) \quad (\text{II.9})$$

Avec

$$\varphi_0 = I_c \times \sin(h) \times (0.271 - 0.2939 \times \tau_{\text{dir}}) \quad (\text{II.10})$$

τ_{dir} : Étant la transmissivité total de la couche atmosphérique pour le flux solaire incident direct est donnée par [8]:

$$\tau_{\text{dir}} = a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \quad (\text{II.11})$$

ρ : L'albédo du sol

II.12.3. Rayonnement global

Le rayonnement global IG sur une surface est la somme du rayonnement direct (I_{dir}) et du rayonnement diffus (I_{dif}), soit :

$$I_G = I_{\text{dir}} + I_{\text{dif}} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

$$I_{\text{dir}} = I_c \times a \times \exp\left(\frac{-b}{\sin(h)} \times \frac{p}{1000}\right) \times \cos(i)$$

$$I_{\text{dif}} = \varphi_1 + \varphi_2$$

II.12.4. Présentation de différents instruments de mesure du rayonnement solaire.

Quelle que appapeil pour mesure du rayonnement solaire

Un radiomètre est un instrument de mesure du rayonnement.

Le radiomètre de Crookes est un appareil permettant de mettre en évidence l'énergie transportée par les radiations, il est constitué d'une ampoule de verre contenant de l'air à faible pression et un petit moulin à quatre pales ayant chacune une face noire et une face blanche. Il en résulte une dissymétrie dans l'absorption du rayonnement incident, qui provoque la mise en rotation du moulin. Voir William Crookes.



Figure (II.9) : Le radiomètre de Crookes

Un pyranomètre est un radiomètre pour la mesure du rayonnement dans un plan, le rayonnement incident étant issu de l'ensemble de l'hémisphère situé au-dessus de l'instrument.



Figure (II.10) :Un pyranomètre

Un pyrhéliomètre est un radiomètre muni d'un collimateur, pour la mesure du rayonnement solaire direct sous incidence normale.

Un héliographe est un instrument enregistrant la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes.



Figure (II.11) : Un pyrhéliomètre

II.13. 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 [20]

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

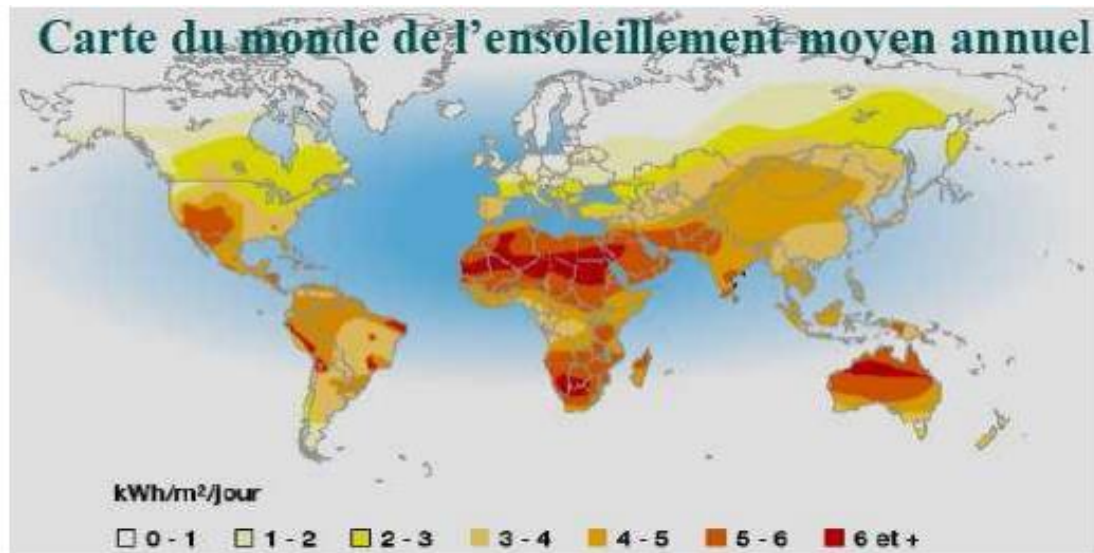


Figure (II.12) : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [21]

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 T Wh/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.

II.14. Conclusion

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale. La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel solaire [21].

Chapitre III :

MODELE MAHEMATIQUE

III.1 . Rappels sur les transferts de chaleur

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

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température par conduction des hautes vers les basses températures. La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur [22].

III.2. Les modes de transfert thermique

Dans notre étude, nous allons étudier un capteur solaire plan incliné avec un angle β de l'horizontale dans des différents régions en Algérie (Boussaâda), Constantine, Ghardaïa) .

La (figure III.1) représente ce modèle de capteur solaire qui met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, conduction, convection et rayonnement.

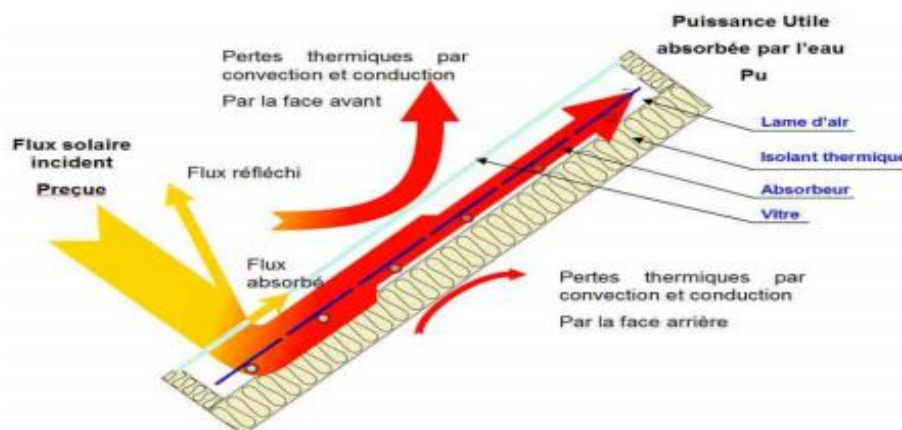


Figure (III.1) : Les différents échanges thermiques dans un capteur plan

III.2.1. 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. La loi

correspondant à ce processus de diffusion thermique est la loi de Fourier donnée par la relation :

$$\Phi = -k.A. \text{grad } T \quad (\text{III.1})$$

Φ : flux de chaleur (W).

k : coefficient de conductivité thermique (W/m.K).

A : surface d'échange (m²).

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 hevai.

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

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

φ_1 et φ_2 sont exprimés par

$$\varphi_1 = \frac{L_1}{s_{abi}.k_i} + \frac{L_{isolat}}{s_{ai}.k_{ab}} \quad (\text{III.3})$$

$$\varphi_2 = \frac{L_1}{s_{abil}.k_{il}} + \frac{L_{isol}}{s_{abil}.k_{ab}} \quad (\text{III.4})$$

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.

L_1 : épaisseur de l'absorbeur.

sabi : surface de contact entre l'absorbeur et l'isolant horizontal.

ki : conductivité thermique de l'isolant horizontal.

L_{isol}: épaisseur de l'isolant horizontal.

L_{isolat}: épaisseur de l'isolant latéral.

kab: conductivité thermique de l'absorbeur.

kil: conductivité thermique de l'isolant latéral.

III.2.2. La convection

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

On distingue deux types de convection :

III.2.2.1. La convection forcée

Le mouvement du milieu est engendré par un dispositif externe (le vent, une pompe, un ventilateur...etc.).

III.2.2.2. 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]:

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

Φ : 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.

III.2.3. 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 [25].

La loi fondamentale du rayonnement est celle de Stefan-Boltzmann [25]:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{III.6}$$

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

ε : émissivité thermique du matériau.

σ : constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,6 \cdot 10^{-8}$ (W/m².K⁴).

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.

III.3. Les différents échanges thermiques dans un capteur plan vitré

III.3.1. Échanges thermiques au niveau de l'absorbeur

➤ Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le vitrage est donné par:

$$\Phi = S_1 \cdot h_{c12} (T_{ab} - T_v) \tag{III.7}$$

T_{ab}: température de l'absorbeur. (°K).

T_v : température de la vitre. (°K).

S_1 : surface de l'absorbeur. (m²).

h_{c12} : coefficient d'échange thermique par convection entre la vitre et l'absorbeur (W/(m°K)).

$$h_{c12} = Nu \frac{k_{air}}{b} \quad (III.8)$$

$$Nu = 1 + 1.44 \left(1 - \frac{1708}{Gr Pr \cos \beta} \right) \left(\frac{|x| + x}{2} \right) \left(\frac{|y| + y}{2} \right) \quad (III.9)$$

$$x = 1 - \frac{1780 \sin(1.8\beta)}{Gr Pr \cos \beta} \quad y = \frac{(Gr Pr \cos \beta)^{1/3}}{5830} \quad (III.10)$$

Pr : nombre de Prandtl.

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

Gr : nombre de Grashof.

k_{air} : conductivité thermique de l'air (W/ (°K m)).

β : inclinaison du capteur (rad).

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage est donné par

L'équation (III.11):

$$\Phi_{r12} = S_1 \cdot h_{r12} (T_{ab} - T_v) \quad (III.11)$$

$$h_{r12} = \frac{\sigma(T_v + T_{ab})(T_{ab}^2 + T_v^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (III.12)$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: sont respectivement les émissivités de l'absorbeur et du vitrage.

σ : constante de Stéphane Boltzman

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W / m}^2 \cdot \text{K}^4$$

Le flux de chaleur échangé par conduction entre l'absorbeur et l'isolant est donné par l'équation (III.13):

$$\Phi_{\text{cdisolant}} = \frac{T_{\text{ab}} - T_{\text{isol}}}{\frac{L_1}{S_{14}^a k_{\text{isol}}} + \frac{L_{\text{isol}}}{S_{14}^a k_{\text{abs}}}} + \frac{T_{\text{ab}} - T_{\text{isol}}}{\frac{L_1}{S_{14}^1 k_{\text{isollat}}} + \frac{L_{\text{isollat}}}{S_{14}^1 k_{\text{abs}}}} \quad (\text{III.13})$$

$$\frac{T_{\text{ab}} - T_{\text{isol}}}{\frac{L_1}{S_{14}^a k_{\text{isol}}} + \frac{L_{\text{isol}}}{S_{14}^a k_{\text{abs}}}}$$

Echange aux niveaux des surfaces horizontales :

$$\frac{T_{\text{ab}} - T_{\text{isol}}}{\frac{L_1}{S_{14}^1 k_{\text{isollat}}} + \frac{L_{\text{isollat}}}{S_{14}^1 k_{\text{abs}}}}$$

Echange aux niveaux des surfaces latérales :

T_{isol} : température de l'isolant ($^{\circ}\text{K}$).

S_{14}^a : surface de contact absorbeur isolant pour la face avant (m^2).

S_{14}^1 : surface de contact absorbeur isolant pour la face latérale (m^2).

K_{isol} : conductivité thermique de l'isolant (laine de roche). (W/m.K).

K_{isollat} : conductivité thermique de l'isolant. (Laine de verre) (W/m.K).

K_{abs} : conductivité thermique de l'absorbeur (W/m.K).

L_1 : épaisseur de l'absorbeur (m).

L_{isol} : épaisseur de l'isolant (laine de roche). (m).

L_{isollat} : épaisseur de l'isolant latéral (laine de verre). (m).

Le flux de chaleur échangé par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (eau):

$$\Phi_{c13} = h_{c13} \cdot S_{13} (T_{ab} - T_f) \quad (III.14)$$

T^f : température du fluide caloporteur (°K).

S : surface de contact absorbeur fluide caloporteur (m²).

h^{c13} : coefficient d'échange par convection entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (W/(m²°K)).

Le coefficient d'échange de chaleur par convection à l'intérieur des tubes $hc13$ est calculé suivant Gnielinski. Il a exploité un grand nombre de données expérimentales sur le transfert de chaleur

dans les tubes et il a proposé une corrélation utilisable pour le régime de transition et pour le régime turbulent en tenant compte de la longueur d'établissement de l'écoulement. Les propriétés physiques sont calculées à la température moyenne de l'eau.

$$N^u = \frac{\Omega}{8} \frac{(R_e - 10^3) Pr}{1 + 12.7 \left(\frac{\Omega}{8}\right)^{0.5} (Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{d_i}{l}\right)^{2/3} \right] \quad (III.15)$$

Ω : coefficient de Darcy.

Pr : nombre de Prandtl.

R^e : nombre de Reynolds.

d^i : diamètre intérieur (m).

l : longueur du tube (m).

Cette corrélation est valable pour $0.6 < Pr < 2000$, et $2300 < R^e < 10^6$.

Le nombre de Reynolds est donné par:

$$R_e = \frac{VD}{\nu} \quad (III.16)$$

D: diamètre du tube (m).

ν : viscosité cinématique de l'eau (m²/s).

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

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

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

$$\Omega = 0.3164 R_e^{-0.25} \quad (III.17)$$

Si $10^5 \leq R_e \leq 10^6$, on applique la relation de Herman

$$\Omega = 0.0054 + 0.3964 R_e^{-0.3} \quad (III.18)$$

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

$$h_{cl3} = \frac{N_u k_{eau}}{d_i} \quad (III.19)$$

K_{eau} : conductivité thermique de l'eau (W m⁻¹°K⁻¹).

d_i : diamètre du tube intérieur (m).

Le flux de chaleur incident reçu par l'absorbeur est donné par (III.20) :

$$\Phi_{incident1} = \alpha_1 \tau_2 S_1 I_g \quad (III.20)$$

α_1 : coefficient d'absorption de l'absorbeur.

τ_2 : coefficient de transmission de la vitre.

I_g : éclairement global incident sur le plan incliné du capteur plan. (W/m²)

On désigne par m_1 la masse de l'absorbeur (en kg) et par C_1 sa chaleur spécifique (J / (kg°K)).

III.3.2. Échanges thermiques au niveau de la vitre

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

$$\Phi_{\text{incident } 2} = \alpha_2 S_2 I_g \quad (\text{III.21})$$

α_2 : coefficient d'absorption de la vitre.

S_2 : surface de la vitre (m²).

Le flux de chaleur échangé par convection entre le vitrage et l'air ambiant est donné par:

$$\Phi_{c2am} = h_{c2am} S_2 (T_v - T_{am}) \quad (\text{III.22})$$

T_{am} : température ambiante (°K).

h_{c2am} : coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'air ambiant. Ce dernier est dû entièrement à la vitesse du vent (W/(m²°K)).

$$h_{c2am} = 5.67 + 3.86 V^{vent} \quad (\text{III.23})$$

V^{vent} : vitesse du vent (m/s).

Le flux de chaleur échangé par rayonnement entre le vitrage et le ciel est donné par

l'équation :

$$\Phi_{r2ciel} = h_{r2ciel} S_2 (T_v - T_{ciel}) \quad (\text{III.24})$$

$$h_{r2ciel} = \varepsilon_2 \sigma (T_{ciel} + T_v) (T_v^2 + T_{ciel}^2) \left(\frac{T_v - T_{ciel}}{T_v - T_{am}} \right) \quad (\text{III.25})$$

$$T_{ciel} = 0.0552 T_{am}^{1.5} \quad (\text{III.26})$$

T^{ciel} : température du ciel ($^{\circ}\text{K}$).

h^{r2ciel} : coefficient d'échange par rayonnement entre le vitrage et le ciel ($\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$).
[26...27]

III.4. Perte globale d'énergie [26]

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

III.4.1. Coefficient des pertes thermiques vers l'avant du capteur[26] :

Le coefficient de pertes thermiques global vers l'avant du capteur sera donné par la relation suivante :

$$U^{\text{av}} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{1}{h_{\text{r2ciel}} + h_{\text{c2am}}} + \frac{1}{h_{\text{c12}} + h_{\text{r12}}}} \quad (\text{III.27})$$

III.4.2. Coefficient de pertes thermiques vers l'arrière du capteur [26]:

Ce coefficient est peu important que celui d'avant, vue le capteur est très bien isolé à l'arrière.

L'expression évaluant ce coefficient est donné par:

$$U^{\text{arr}} = \frac{k_{\text{isol}}}{E_{\text{isol}}} = R_3 \quad (\text{III.28})$$

K^{isol} : coefficient de conductivité thermique de l'isolant ($\text{W}/(^{\circ}\text{K m})$).

E^{isol} : épaisseur de l'isolant (m).

III.4.3. Coefficient des pertes thermiques latérales [26]:

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

$$U^{lat} = \frac{k_{isol}}{E_{isol}} \frac{A_{lat}}{A_c} \quad (III.29)$$

A^{lat} : surface latérale du capteur (m^2).

A^c : surface du capteur (m^2).

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

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

III.2.3. Bilan thermique du capteur solaire plan en régime transitoire [26]

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

• Vitre

$$m_v \cdot C_v \frac{dT_v}{dt} = \alpha_v \cdot S_v \cdot G + S_{ab}(h_{cabv} + h_{rabv})(T_{ab} - T_v) - h_{cvam} \cdot S_v(T_v - T_{am}) - h_{rcv} \cdot S_v(T_v - T_{ciel}) \quad (III.31)$$

• Absorbeur

$$m_{ab} \cdot C_{ab} \frac{dT_{ab}}{dt} = a_{ab} \cdot \tau_v \cdot S_{ab} \cdot G - S_{ab}(h_{cabv} + h_{rabv})(T_{ab} - T_v) - (\psi_1 + \psi_2)(T_{ab} - T_i) - h_{cabf} \cdot S_{abf}(T_{ab} - T_f) \quad (III.32)$$

• Fluide caloporteur

$$m_f \cdot C_f \frac{dT_f}{dt} = h_{cabf} \cdot S_{abf}(T_{ab} - T_f) = \quad (III.33)$$

$$\psi 1 = \frac{1}{\left(\frac{lab}{sabi.\lambda a}\right) + \left(\frac{li}{Sabi.\lambda ab}\right)} \quad \psi 2 = \frac{1}{\left(\frac{lab}{Sabi.\lambda ab}\right) + \left(\frac{lil}{Sabil.\lambda ab}\right)} \quad (III.34)$$

Avec :

mv, mab, mf: masses respectives de la vitre, l'absorbeur et de fluide.

Cv, Cab, Cf : chaleurs massiques respectivement de la vitre, l'absorbeur et le fluide caloporteur.

III.5.Rendement instantané du capteur solaire [26]

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

$$\text{Puissance de sortie} = \text{Puissance captée} - \text{Pertes} \quad (III.35)$$

$$\eta = \frac{\text{Puissance thermique utile par } m^2 \text{ du capteur}}{\text{Flux solaire incident sur le pian du capteur}} \quad (III.36)$$

$$\eta = \frac{Q_u}{A I_g} = \frac{[(\alpha\tau)_{eff} G - U_T (T_{abs} - T_{am})]}{A_c I_g} \quad (III.37)$$

Qu : puissance utile récupérée par le fluide caloporteur (W)[26].

Chapitre IV :
ETUDE NUMERIQUE

IV.1. Principe de simulation

l'isolateur solaire est décomposé spatialement en un certain nombre de section « dx » suivant l'axe des « dx » et « dy » suivant l'axe « x » et « dt » suivant l'axe temporelle fictif « T ». Donc nous avons un repère tridimensionnel dans lequel les deux variables d'espace « x » et « y » et le temps « t » jouent le même rôle .

dans l'intervalle de temps t et $t+dt$, on décrit tout le système de la première à la dernière section spatiale suivant t , O_x , et O_y . La résolution des systèmes d'équation exprimant les bilans thermiques donne la répartition des températures relatives à chaque section .

chaque unité peut avoir son découpage spatial propre, mais le découpage temporel doit être le même pour tout le système.

Notons que la résolution de système des équations pour déterminer les diverses températures du système sont calculés par la méthode de Gauss-Seidel .

IV.1.2. procédure de calcul

Les pluparts des coefficients d'échanges thermiques sont en fonction des températures inconnues, dans ce cas nous proposons la procédure suivante :

Etape 1 : calculer les divers coefficients d'échange thermiques h entre les divers éléments caractérisés par leur température à l'instant t .

Etape 2 : recalculer les températures à partir des valeurs h , ainsi déduites

Etape 3 : recalculer les coefficients h à partir des nouvelles températures .

Les étapes 2,3 sont reprises jusqu'à ce que toutes les températures soient fixes pour deux itérations successives

On exécute ensuite le même algorithme pour l'intervalle $t+dt$ et $t+2dt$, etc jusqu'à épuisement complet du temps t .

IV.2. Le programme principale

Le programme principal sert de liaison entre tous les sous programmes. il les appelle lors des calculs ou des commandes spécifiques à chacun d'eux .

IV.2.1. Présentation des sous –programmes

DATE permet de calculer le numéro de jour dans l'année , l'angle horaire w_s du soleil au-dessus de l'horizon et le rayonnement extraterrestre journalier frappant un plan horizontal en moyenne mensuelle.

ANIC permet de calculer l'angle d'incidence des rayonnements solaires frappant un plan horizontal et un plan incliné.

RAYN permet de calculer l'angle horaire w , le rayonnement globale journalier, le rayonnement directe et diffus et l'indice de clarté.

PSV permet de calculer la puissance absorbe par la vitre, le plan noir .

TEMA lecture des températures ambiante a chaque instant .

HCOM calcule les coefficients d'échange thermique par conduction a travers la couverture ,le plan noir et l'isolant.

HCVA calcule le coefficient d'échange thermique du au vent.

TMMO calcule les température moyennes de chaque constituant de distillateur

HRAY calcule les coefficients d'échange thermique par rayonnement entre la vitre et la voute céleste ,entre la vitre et le plan noir, entre le plan noir et l'isolant avant et entre l'isolant arrière et le sol .

PSAU calcule les propriétés physique de l'eau caloporteur .

HNWA calcule le coefficient d'échange thermique par convection entre le plan noir et l'eau caloporteur

HCNI calcule le coefficient d'échange thermique par convection entre le plan noir et l'isolant avant.

REND l'efficacité globale ,et le rendement du capteur instantané et journalier.

La figure (IV.1) montre comment ces divers sous-programmes sont organisés dans le programme principal.

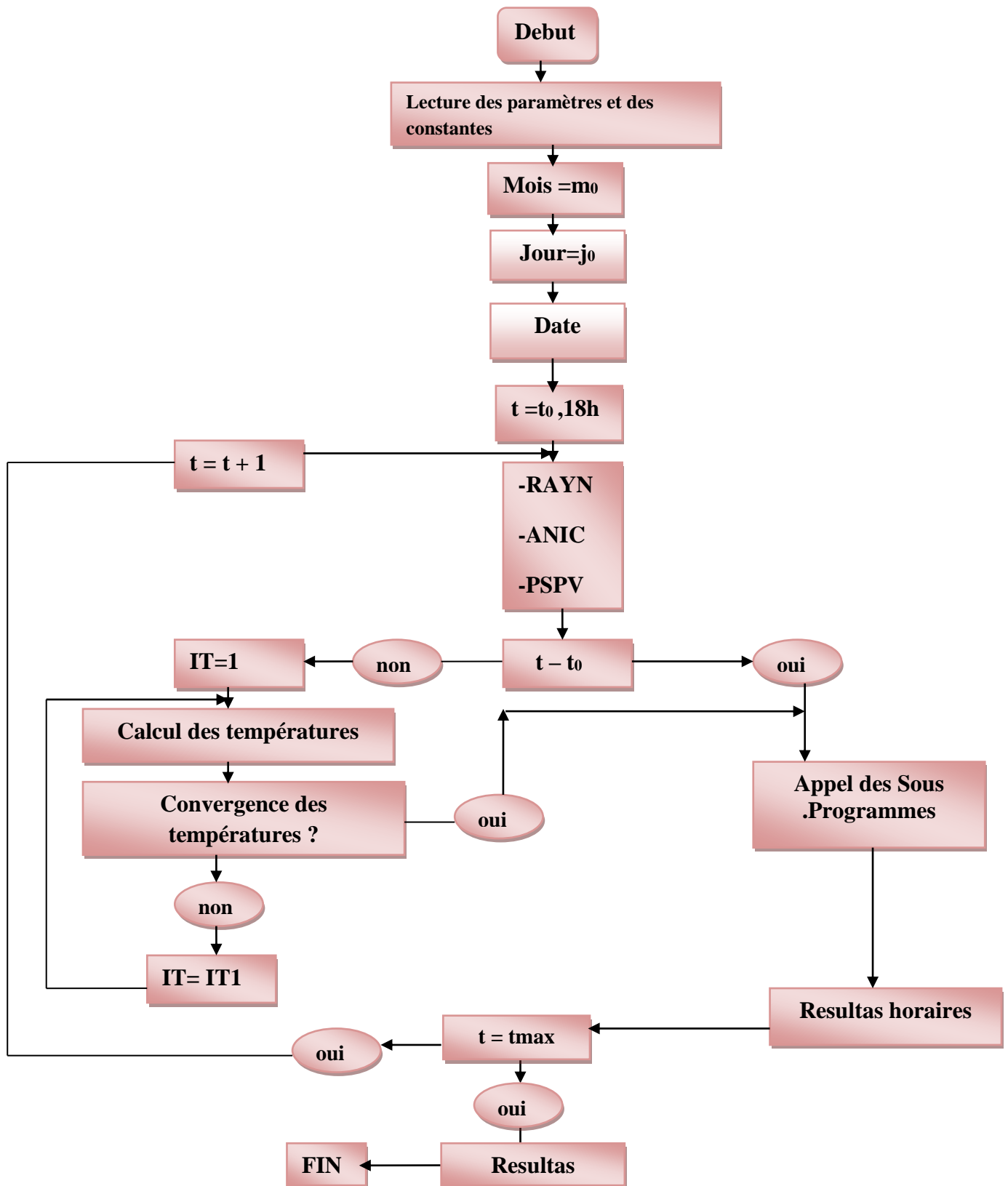


Figure (IV.1) : organigramme générale

Etude Théorique

IV.1. hypothèses générales

Ces hypothèses sont valables pour l'ensemble du système :

- 1- la voute céleste est considérée comme un corps noir
- 1 -les propriétés physique des matériaux sont considérer constante
- 3- l'écoulement du fluide caloporteur est unidirectionnel , et se fait dans un tube cylindrique (figure IV.2)
- 4- la température et la vitesse de fluide caloporteur est uniforme en tout point d'une section normale
- 5 -la conduction thermique dans le fluide est négligeable devant le transfert par convection
- 6- l'échange thermique dans les coude des tube négligeable

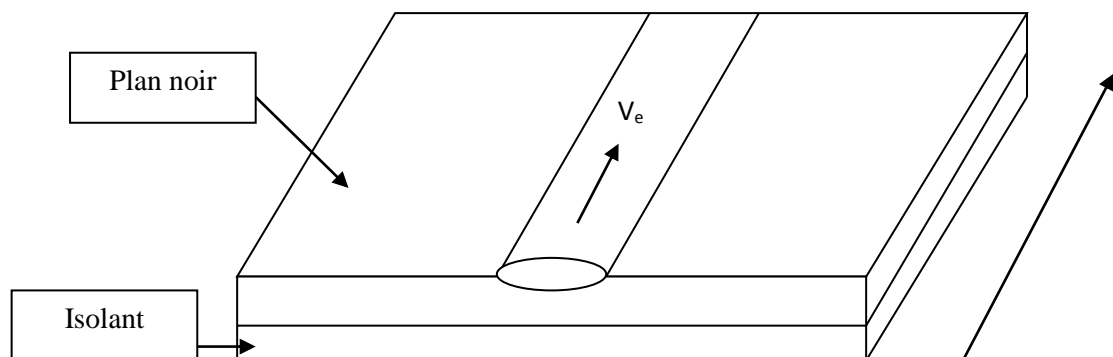


Figure (IV.2) : Schéma d'une tranche de tube caloporteur

IV.3.2. Analogies électriques

La densité de flux de chaleur échangée entre un point de température T_1 et un autre point de température T_2 peut s'écrire sous la forme :

$$Q_{21} = h_{21} \cdot S \cdot (T_2 - T_1)$$

Cette expression est semblable à la loi d'OHM autorisant les analogies suivantes entre les grandeurs thermique et électriques

Tableau de comparaison

Grandeur thermique	Grandeur électrique
Température	Potentiel électrique
Flux thermique	Courant électrique
Resistance thermique	Resistance électrique

Selon ces hypothèses, on peut applique les lois d’OHM et de KIRSHOFF considérons une section spatiale quelconque du système a l’instant t , soit i l’un des milieux représentes dans cette section (mi) sa masse (kg), cpi sa chaleur spécifique (j/kg.k°)et Ti sa température (k°).

Le bilan thermique au nœud i donne :

$$Mi.cpi \frac{\partial Ti}{\partial t} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_{ji}}(T_j - T_i) + pi$$

J,i ensemble de j pour les quelles Tj est un potentiel connecté a Ti

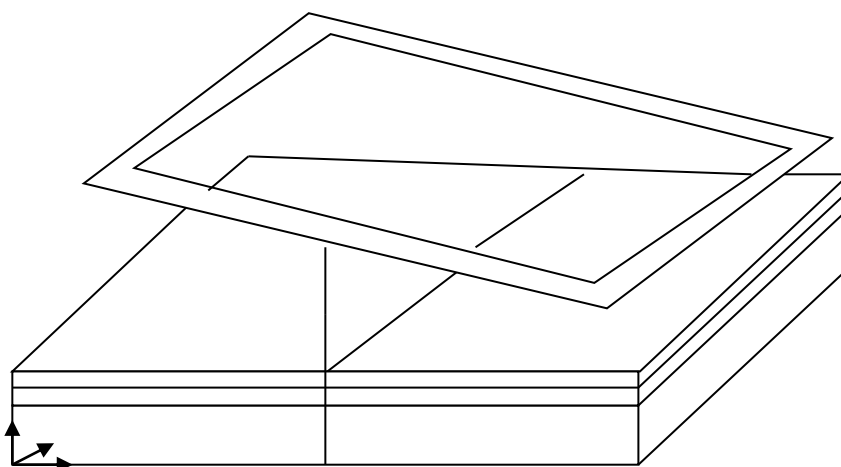
Pi :terme source ou puits

IV.3.3. Méthode mathématique de résolution

Pour déterminer les températures dans les différents points du distillateur on applique la loi d’OHM aux nouds du réseau électrique

Considérons une demi-tranche d’une marche (plan ABCD de la figure IV.3).
découpons la en

MxN mailles rectangulaire identique (figure IV.4). définies par i xj nouds dans la direction des x des y [28]



Figure(IV.3) : Découpage du distillateur en tranches indépendantes

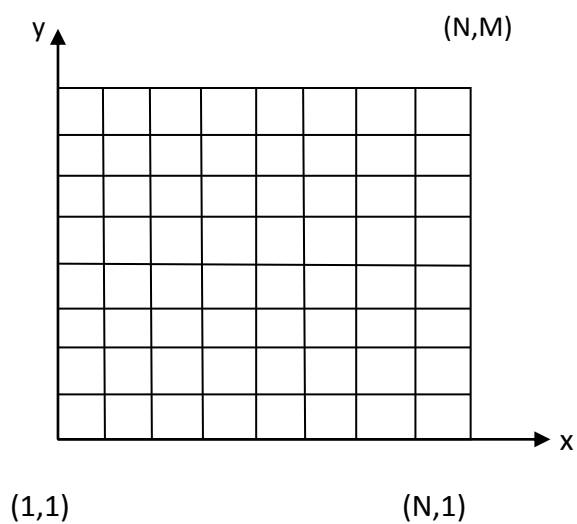


Figure (IV.4) :Maillage par différence finies des éléments d'une tranche.

Chapitre V :
RESULTATS ET
DISCUSSIONS

V.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'exposer des résultats numériques obtenus par notre code de calcul qui a été élaboré par un programme écrit en Fortran sur un capteur plan dans la région de Boussaâda.

A partir de la résolution des systèmes des équations discrétiser dans le chapitre III, nous permet d'obtenir des différents résultats avec la considération des hypothèses suivants:

- les calculs sont effectués à Boussaâda en tenant compte des coordonnées géographiques (Latitude **35° 13' Nord**, longitude **4° 10' Est**, décalage horaire une heure)
- les températures ambiantes pendant l'Hiver et l'Été ont été données arbitrairement sauf pour la date 22.04.017 qu'ils ont été obtenues expérimentalement par [28] .
- les calculs sont effectués à partir d'un instant initial t_0 ($t_0=8$ h) à chaque constituant du capteur à une température initiale (température d'ambiante) et avec un pas de temps $\Delta t=1$ s et un pas d'espace $\Delta x=\Delta y=0.05$.
- les résultats suivants ont été faits dans trois saisons dans l'année.
- les résultats obtenus sont présentés en fonction des paramètres météorologiques et de construction qui influence sur le rendement du capteur.

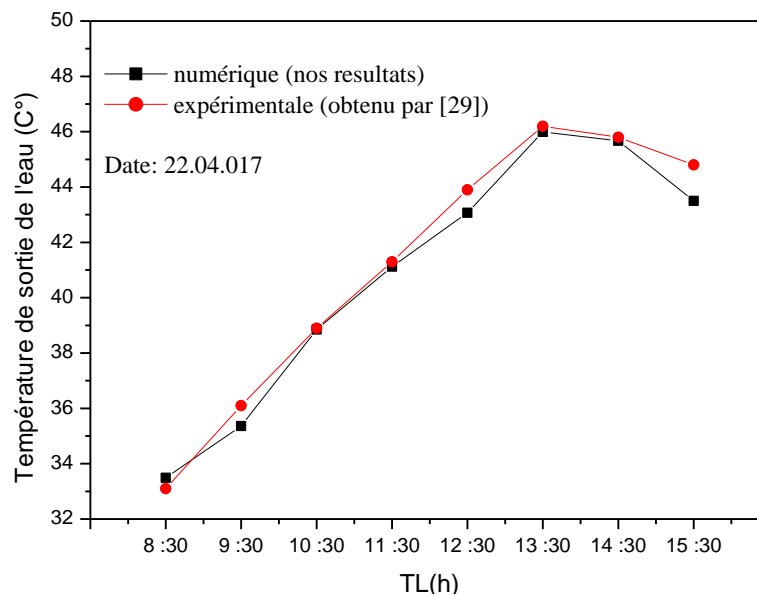
V.2. Caractéristiques du capteur plan étudié

Les caractéristiques des différents constituants de notre capteur sont :

- ❖ longueur du capteur $L=1.07$ m
- ❖ largeur du capteur $l = 80$ cm
- ❖ Un absorbeur plat en acier galvanisé peint en noir mat ; d'épaisseur égale à 1mm
- ❖ l'écartement absorbeur -vitre égale à 1.5 cm
- ❖ l'écoulement est en dessous de l'absorbeur
- ❖ le fluide caloporteur est l'eau
- ❖ l'isolation de la base en bois, d'épaisseur de 1 cm
- ❖ une couverture transparente en verre ordinaire d'épaisseur 4mm
- ❖ diamètre de conduit=14mm et d'épaisseur 0.8mm
- ❖ longueur du tube =8m sous forme serpentant

V.3 Validation du code de calcul

Pour valider notre code de calcul, nous avons comparé nos résultats numériques avec ceux obtenus par Bentoumi H. et Si Abdallah [28]. La figure (V.1) représente la comparaison de la température expérimentale et numérique de sortie de l'eau. Cette figure montre une bonne concordance entre les valeurs mesurées et celles obtenues par simulation numérique à part quelques écarts de température qui sont dus principalement aux pertes thermiques et des erreurs induites par le calcul numérique.



Figures (V.1) : Comparaison entre la température de sortie de l'eau expérimentale et numérique

V.4. Angle d'inclinaison optimale

Pour obtenir un meilleur rendement, nous allons chercher l'angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale qui assure un maximum de l'intensité solaire globale à chaque saison, pour cela il suffit d'entrer le numéro de jour dans l'année et on varie l'angle β et on calcule la puissance solaire globale correspondant à cet angle.

a) Pendant l'Hiver (date: 20 Janvier ; NJ=20)

D'après la figure (V.2) ; on remarque que l'angle optimal qui correspond à la valeur maximale de la puissance globale est ($\beta = 60^\circ$).

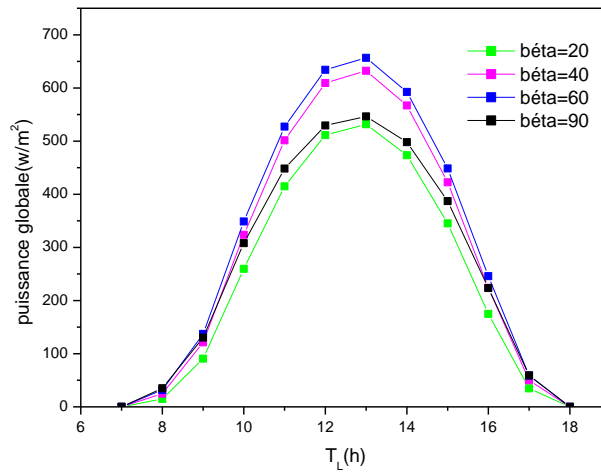


Figure (V.2) Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison. (date: 20 Janvier ; NJ=20)

b) Pendant le Printemps (date: 22 avril ; NJ=112)

La figure (V.3) montre que l'angle optimale qui est ($\beta= 30^\circ$).

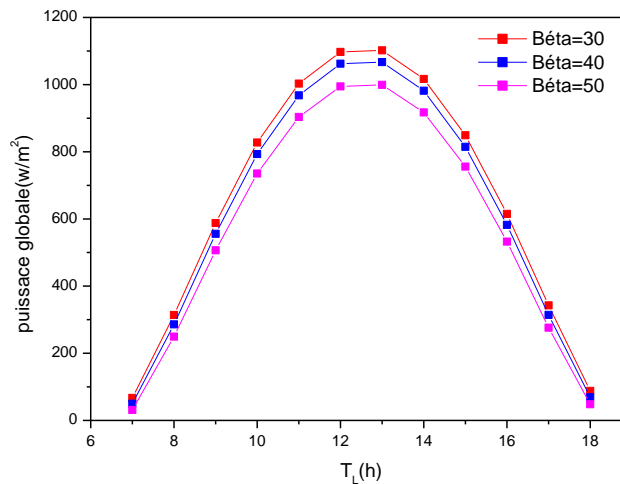


Figure (V.3) Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison (date: 22 avril NJ=112)

c) Pendant le l'Eté (21 Juin ; NJ=172)

D'après la figure (V.4) on observe que l'angle optimale qui correspondent à la valeur maximale de la puissance globale est ($\beta= 10^\circ$).

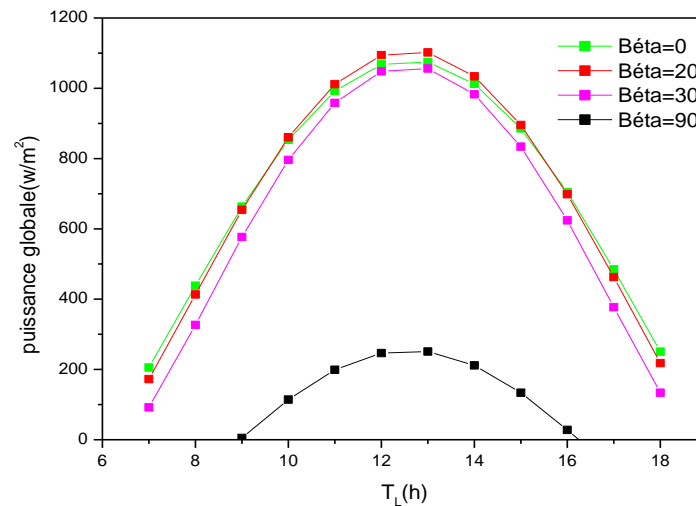


Figure (V.4) Evolution temporelle des puissances globales pour des différents angles d'inclinaison (date: 21 Juin NJ=172)

V.5 . Puissance solaire saisonnière

Les figures (V.5 - V.7) représentent la variation temporelle de la puissance globale et les puissances absorbées par l'absorbeur (la plaque noire) et la vitre du capteur pour des différents nombres des jours dans l'année et avec les angles d'inclinaison optimale calculés dans le paragraphe précédent. On remarque que le maximum des ces puissances est vers 13 h quelque soit le numéro du jour dans l'année et on remarque aussi que la plaque noire (l'absorbeur) du capteur absorbe une quantité considérable de la puissance globale.

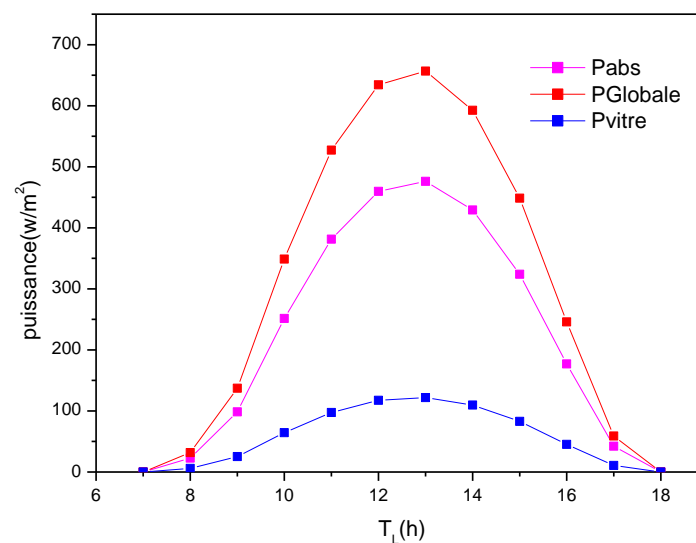


Figure (V.5) Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 60° (date: 20 Janvier ; NJ=20)

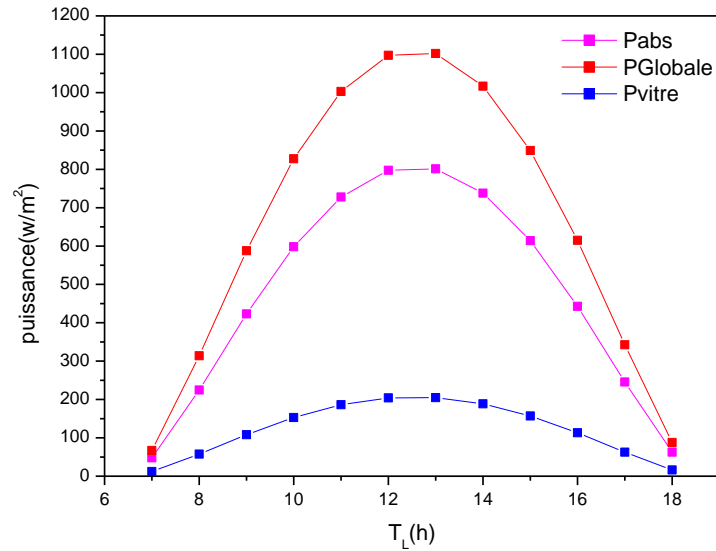


Figure (V.6) Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 30°
(date: 22 Avril NJ=112)

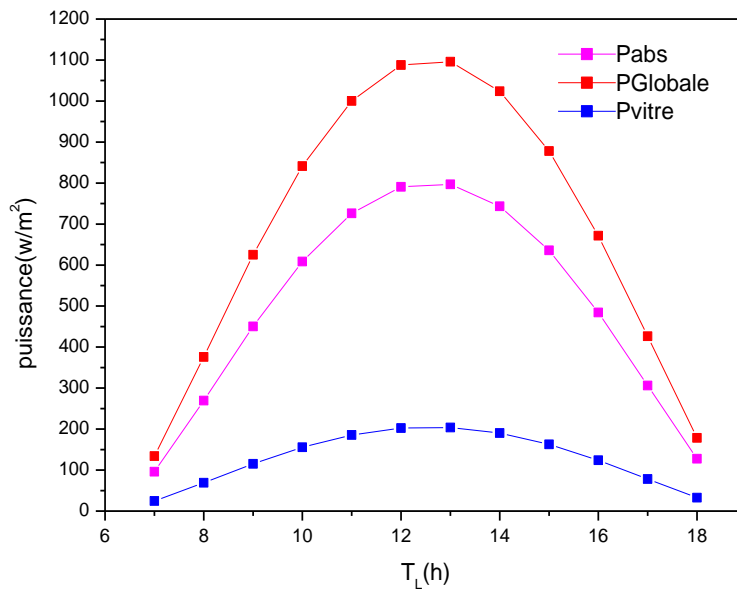


Figure (V.7) Evolution temporelle des puissances a angle d'inclinaison 20°
(date: 21 Juin NJ=172)

V.6. variation temporelles de la température des différents composants du capteur

Pour un débit d'eau de 40 litre/h , les figures (V.8 - V.10) représentent la variation temporelles de la température des différents composants du capteur .On remarque que la température de l'absorbeur dans tous les saisons est la plus élevé par rapport aux différents

températures (vitrage et de l'eau) et la valeur maximale de chaque température est remarquable à 13 h ou le soleil est au zénith.

On observe aussi que l'écart de température de l'eau chaude et de l'ambient est de l'ordre de 20 C° à 13 h, et de 15 C° durant la saison de l'hiver .

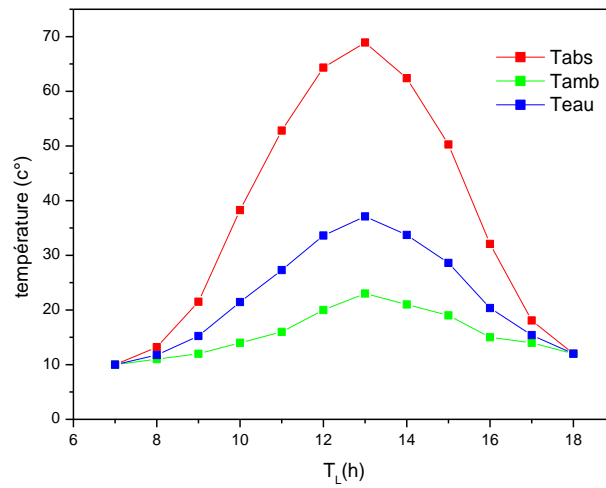


Figure (V.8) Evolution temporelle des températures (date: 20 Janvier)

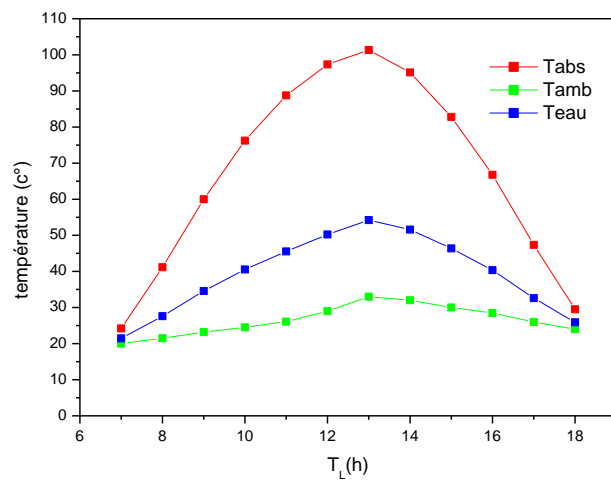


Figure (V.9) Evolution temporelle des températures (date: 22 Avril NJ=112)

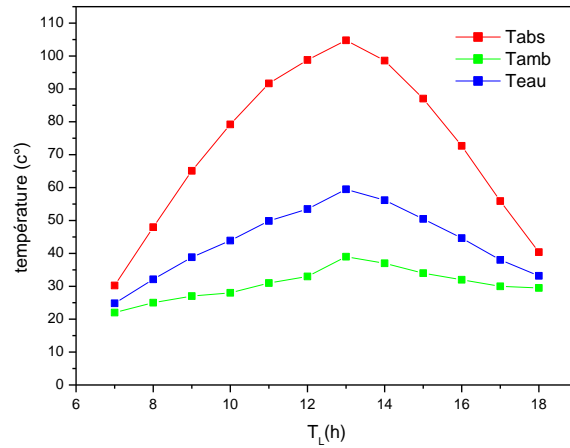
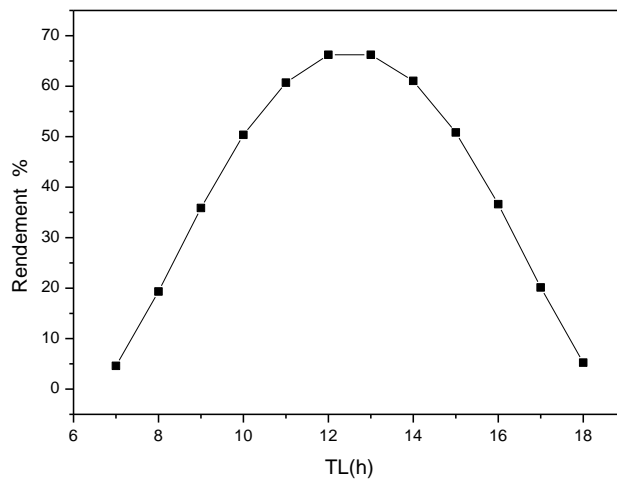


Figure (V.10) Evolution temporelle des températures (date: 21 Juin NJ=172)

V.7. Le rendement thermique horaire :

La figure (V.11) représente la variation temporelle de rendement thermique de capteur .On remarque que le rendement augmente avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire jusqu'à atteindre la valeur maximale 66% entre 12h et 14h puis commence à diminuer jusqu'à atteindre la valeur 10% vers 18h .



Figures (V.11) : rendement thermique horaire du capteur



***Conclusion
générale***

CONCLUSION GENERALE

Dans le cadre de ce travail, nous avons présenté une étude numérique d'un capteur solaire plan à chauffe-eau dans la région de Boussaâda.

On a fait des recherches bibliographiques sur les capteurs solaires, les différents types de transfert thermique on permet de mettre en évidence la nature des échanges de chaleur qui interviennent dans la présente étude. Cette étude permet de suivre l'évolution de la température des différents constituants du capteur soumis à l'ensoleillement journalier.

Concernant la partie théorique, nous établissons un rappel théorique sur les différentes équations qui caractérisent les chauffe-eau solaires et la modélisation en régime variable pour l'évaluation des températures des différents constituants du capteur. La complexité des équations du système nous impose d'adopter une résolution numérique. Pour cela, nous avons élaboré un code de calcul écrit en langage fortran, ce modèle numérique permet de calculer l'évolution des composants du rayonnement solaire et de la température des différents éléments du système.

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

Les résultats numériques obtenu montrent que :

- L'angles d'inclinaison optimale du capteur par rapport à l'horizontale varie d'une saison à l'autre pour capter une puissance globale maximale ;
- Durant le mois d'Avril, l'angle d'inclinaison optimale du capteur doit être fixé à latitude du lieu pour obtenir un meilleur rendement ;
- La puissance solaire globale, la température de l'absorbeur et la températures de sortie de l'eau passent par un maximum vers 13h (temps locale) dans tous les jours et dans toutes les saisons;
- En fin, et pour être ce modèle appliqué dans l'utilisation domestique , il doit être avoir une grande dimension et l'absorbeur a une bonne conductivité thermique comme le cuivre pour assurer l'absorption d'une grande quantité d'énergie solaire.

REFERENCE

- [1] Chr. Perrin De Brichambaut. «Estimation des ressources solaires en France ». Suppl. Cahiers Afedes n°1, Paris, 1975.
- [2] [https://www.dictionnaire environnement.com/energie_solaire_thermique_ID1376.html(3).
- [3] André Joffre. " Energie solaire thermique dans le bâtiment chauffe-eau solaires ".revue techniques de l'ingénieur BE 9164 .
- [4] Benamrane Karima " utilisation des capteurs solaires sous vide pour le fonctionnement du système de climatisation (région de Ouargla) ". Thèse de magistère en Physique Energétique université de Ouargla 2004(9)
- [5] Thirry Cabirol ,Albert Pelissou, Daniel Roux. "Le Chauffage de l'eau solaire", VEdisud.cop,1980
- [6] Manuel du chauffe eau solaire collectif, TECSOL ,formation Tunis 2002,WWW.tecsol.fr
- [7] J. Bernard. "Energie solaire calculs et optimisation", Ellipse Edition Marketing. (2004).
- [8] Y. Maigne, J-P. Causse, M. Claverie, B. Equer. "les perspectives de l'énergie solaire en FRANCE". Commission « Energie et changement climatique » Groupe de travail « Energie solaire » Juillet 2008
- [9] K. Salima. "Etude théorique et numérique des systèmes couples : distillateur plan capteur et distillateur hot box-capteur". Thèse de magister (2009) 03-15.
- [10] S. Souad. "Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan". Thèse de magister (2010) 05-19.(6)
- [11] A. Dalila. "Optimisation Du Rendement D'un Capteur Solaire Par Minimisation Des Pertes Convectives". Thèse de magister (2010) 17-39.
- [12] M. Amjahdi, J. Lemale " Adopter le solaire –thermique et photovoltaïque". DUNOD Paris 2011.
- [13] D, K,Edwards. "capteur solaire " ,Edition SCM ,paris.(1979).

REFERENCE

- [14] C, Fröhlich. 1978: World radiometric reference. World Meteorological Organization, Commission for instruments and methods of observation, report WMO 490, p 108-112.
- [15] Charles Chauviagnet: "L'énergie solaire dans le bâtiment", Editions Eyrolle 1981
P22, 32 et p147-148.
- [16] Yves Jannot. "Thermique solaire". Paris (2007).
- [17] Michel Daguenet: "les séchoirs solaires : théorie et pratique", Unisco, paris ; 1985.
- [18] Pierre Henri Communay;" Héliothermiques; "Le gisement solaire Méthodes et calculs" Groupe de Recherche et d'Édition-2002.
- [19] R .Bernard, G.Merguy, M. Schwartz, "Le rayonnement solaire: conversion thermique et application". Technique et documentation, deuxième Edition-1980.
- [20] M, Capderou. "Atlas solaire de l'Algérie", O.P.U, Alger. (1985).
- [21] A, Mefti; M, Y, bouroubi; H, Mimouni. Evaluation du potentiel énergétique solaire,Bulletin des Energies Renouvelables, N°2, p 12, décembre. (2002).
- [22] S. BEKKOUCHE. "Modélisation du Comportement Thermique de Quelques Dispositifs". Solaires. Option « Electronique et Modélisation » . Thèse doctorat. l'université Abou-bakrBelkaid – Tlemcen. (2008).
- [23] M, E, A, Bekkouche. "Modélisation 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] A, Sfeir ; G, Guarracino. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [26] Y. Jannot: « Thermique Solaire », Cours et Exercices. Octobre 2003. Chapitre: l'Energie Solaire.
- [27] J.M. Chasseriaux: " Convection Thermique et Rayonnement Solaire ", E.d. Dunod 1984.

REFERENCE

[28] M. Si Abdallah, " Etude d'un distillateur solaire a effet de cascade avec stockage de chaleur dans un ballon d'eau "; Thèse de Magister en physique énergétique ,Université de Constantine(1994).

Résumé

Dans ce travail, nous avons présenté une étude numérique d'un capteur solaire plan pour le chauffage de l'eau en utilisant un code de calcul écrit en langage FORTRAN. Cet manuscrite englobe l'étude du trajet du soleil en fonction de l'angle d'incidence des rayonnements solaires sur la surface du capteur et les caractéristique optiques de la vitre et l'absorbeur ainsi que les transferts de chaleur par convection par rayonnement et par conduction des différents composants du capteur. Les résultats obtenus montrent que la température de sortie de l'eau chaude dépend des plusieurs variables, parmi celles , l'angle d'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale.

Mots clé: capteur solaire, gisement solaire, convection thermique, méthodes itératives

ملخص

يهتم هذا البحث بدراسة لوح شمسي مستوي لاقط للأشعة الشمسية لتسخين الماء وذلك بالطريقة العددية باستعمال برنامج بلغة فورتران. يضم هذا البحث في محتوياته على دراسة مسار الشمس بدلالة زاوية الورود للأشعة الشمسية على اللوح و الخواص الفيزيائية للغطاء الزجاجي لهذا واللوح الماصة لأشعة الشمس اللوح الشمسي إلى التبادلات الحرارية بالحمل بالتوصيل و بالإشعاع بين مختلف أجزاء هذا اللوح. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن درجة حرارة الماء الساخن الخارج من اللوح تعتمد على عدة متغيرات ، من بينها ، زاوية ميل اللوح بالنسبة للأفق .

مفتاح الكلمات : المجمع الشمسي الحراري ، الإشعاع الشمسي ، الحمل الحراري ، الطرق التكرارية العددية

Abstract

In this present work, we presented a numerical study of a flat solar panel for heating water using a computation code written in Fortran language. This manuscript includes the study of the solar path as a function of the incidence angle of solar radiation on the surface of the panel and the optical characteristics of the glass and the absorber as well as the heat transfer by radiation conduction and convection of the various components of the panel. The results obtained show that the outlet temperature of the hot water depends on several variables, among those, the angle inclination of the panel relative to the horizontal.

Key words: solar collector, solar radiation, thermal convection, iterative methods.