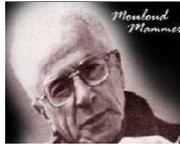


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme du Master en Génie Mécanique
Option : Froid, Chauffage et Climatisation

Thème :

Etude comparative de la performance d'un capteur solaire cylindro-parabolique à stockage d'énergie avec et sans vitrage.

Promoteur :

M^r. MAKHLOUF Said

Réalisé par :

M^{lle} HOUCHE Mezhoura

M^{lle} KAOUDJT Hayat

Devant le membre du jury constitué de :

M^r: BOUTOUDJ Mouhand said

M^r: MEDJKAN Ghanem

PROMOTION 2018/2019

Remerciement

Ce modeste travail et le résultat de plusieurs années de travail et d'étude pour cela nous remercions :

Dieu tout puissant de nous avoir donné cette opportunité et de nous avoir aidé à arriver jusqu'au bout.

On remercie cordialement nos parents pour leur soutien moral, matériel et physique pendant nos études.

On adresse nos reconnaissances et nos remerciements à tous les enseignants qui nous ont guidés le long de notre formation en particulier :

Notre promoteur Mr MAKHLOUF pour son suivi et ces remarques

Les membres de jury qui nous feront l'honneur de juger ce travail.

Le personnel de l'laboratoire MCI.

Nos sincères gratitude vont vers tous ce qui ont participé de près ou de loin à ce travail.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à :

Mon très cher père, ma très chère mère.

Mes frères AMAR et KOUCIELA

Mes cousins et cousines

Mon binôme et sa famille.

Ainsi qu'à toutes les personnes qui me sont chères, que ce soit mes copines, les étudiants de ma promotion ou d'ailleurs : Billy, Lydia, Souhila, Cylia, Yasmine,

Dyhia, Dyhia-L- Sabrina, Soraya, Souad.

Et tous les autres.

Hayat

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leurs amours, leurs tendresses, leurs soutiens et leurs prières tout au long de mes études.

A mon cher frère Amar pour son soutien tout au long de mon parcours d'études.

A mes chères sœurs Dihia et surtout ma zahou pour leurs soutiens moral.

A mes chers frères, Mouhend et Hmimi.

A mon cher fiancé pour son appui et son encouragement et que ce travail soit le fruit de son soutien infailible.

A ma cher belle-mère et mes chers belles-sœurs Racha et Rana et mon beau-frère Rami.

A ma cher binôme Hayet et toute sa famille.

A mes chers amis kamis, Lila, Nadjjet, Tiziri, Nedjema, Ouiza, Souhila, Dyhia, Yasmine, Souad, Billy, Fougou, Dyhia.

A vous ce mémoire.

Merci d'être toujours là pour moi.

MEZHOURA

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : Le gisement solaire	
INTRODUCTION	2
I.1. Le soleil.....	2
I.1.1. Les caractéristiques du soleil	2
I.1.2. La constitution du soleil	2
I.1.3. Le mouvement de la terre	3
I.2. La sphère céleste	4
I.3. Les coordonnées célestes	4
I.3.1. Les coordonnées géographiques	4
I.3.2. Les coordonnées équatoriales	5
I.3.3. Les coordonnées horizontales	6
I.4. Paramètre du temps	8
I.4.1. Le temps solaire vrai (TSV)	8
I.4.2. Le temps solaire moyen (TSM)	8
I.4.3. L'équation du temps (ET)	8
I.4.4. Le temps universel (TU)	9
I.4.5. Le temps légal (TL)	10
I.4.6. Le temps civil	10
I.5. Diagramme solaire	10
I.6. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère	10
I.6.1. La composition de l'atmosphère	10
I.6.2. La masse d'air	11
I.6.3. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	12
I.7. Les différents types de rayonnement solaire.....	12
I.7.1. La constante solaire.....	13
I.7.2. Le rayonnement solaire direct.....	13
I.7.3. Le rayonnement solaire diffus.....	14
I.7.4. Le rayonnement solaire global	15
I.8. Le gisement solaire en Algérie	15
CONCLUSION	18

CHAPITRE II : Etude bibliographique

INTRODUCTION.....	19
II.1. Principes des capteurs solaires thermiques.....	19
II.2. Les différents capteurs solaires thermiques.....	20
II.2.1. Les capteurs à eau.....	20
II.2.1.a. Les capteurs non vitrés.....	20
II.2.1.b. Les capteurs à tube sous vide.....	20
• Les capteurs à tube sous vide à circulation directe	
• Les capteurs à tube sous vide à caloduc	
• Les capteurs à tube sous vide à effet de thermos	
• Les capteurs à tube sous vide Schott	
• Les capteurs CPC	
II.2.1.c. Les capteurs plans vitrés.....	22
II.2.2. Les capteurs à air.....	23
II.3. Eléments de construction des capteurs solaires plans thermiques.....	23
II.3.1. Le boîtier.....	23
II.3.2. L'isolant.....	24
II.3.3. La plaque absorbante.....	24
• Partie avant de l'absorbeur.....	24
• Partie arrière et latérale.....	24
II.3.4. Le circuit hydraulique.....	25
II.3.5. Le fluide caloporteur.....	25
II.3.6. La couverture transparente.....	25
II.4. Les capteur à concentration.....	26
II.4.1. Les capteurs cylindro paraboliques.....	26
• Dimensionnement d'un capteur cylindro-parabolique.....	26
II.4.2. Les capteurs paraboliques.....	27
II.4.3. Les centrales à tour.....	28
II.4.4. Les cuiseurs solaires.....	28
II.5. Principe de l'effet de serre.....	28
II.5.1. Les mécanismes de l'effet de serre.....	29
II.6. L'orientation du capteur.....	30
II.6.1. Les capteurs fixes.....	30
II.6.2. Les capteurs poursuit.....	30
II.6.2.1. Le choix de l'orientation.....	31
II.6.2.2. Effet de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente.....	31
II.7. Principe de captation du rayonnement solaire.....	31

II.7.1. L'inclinaison optimale d'un capteur solaire	32
II.8. Application des capteurs solaires	32
II.8.1. Chauffage des locaux.....	32
II.8.2. Le séchage.....	33
II.8.3. Distillation solaire.....	34
II.9. Installation des capteurs solaires	35
II.9.1. Au sol.....	35
II.9.2. En façade.....	35
II.9.3. Sur le toit.....	36
II.10. Association des capteurs solaires	36
CONCLUSION	38

CHAPITRE III: Etude théorique

INTRODUCTION.....	39
III.1. Les différents modes de transfert thermique dans un capteur solaire	39
III.1.1. La conduction.....	39
III.1.2. La convection	40
III.1.2.a. La convection forcée	41
III.1.2.b. La convection naturelle	41
III.1.3. Le rayonnement.....	41
III.2. Les différents modes de transfert thermique dans un capteur cylindro-parabolique	42
III.2.1. Entre l'Absorbeur et le Fluide Caloporteur.....	42
III.2.2. Entre l'Absorbeur et l'Environnement du Verre.....	42
III.2.3. Entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement	43
III.3. Bilan énergétique.....	44
III.3.1. Facteurs Optiques	44
III.4. Bilan thermique	44
III.4.1. Bilan thermique (vitre paroi extérieure)	45
III.4.2. Bilan thermique (vitre paroi intérieure)	45
III.4.3. Bilan thermique (tube absorbeur)	46
III.4.4. Bilan thermique (fluide caloporteur)	46
III.5. Les pertes thermiques.....	46
III.5.1. Les Pertes par Conduction	46
III.5.2. Pertes par Convection	47
III.5.3. Pertes par rayonnement	47
III.6. Calcul des puissances	48
III.6.1. Puissance reçue à l'ouverture du collecteur	48
III.6.2. Puissance absorbée par la vitre	49
III.6.3. Puissance absorbée par le récepteur	49
III.6.4. Puissance utile	49

III.7. Le rendement du capteur solaire	49
III.7.1. Le rendement optique	49
III.7.2. Le rendement thermique.....	50
CONCLUSION	51

CHAPITRE IV: Etude expérimentale

INTRODUCTION.....	52
IV.1. Les matériaux à changement de phase (MCP)	52
IV.2. La préparation du composite.....	55
IV.3. La préparation des plaques pour la mesure de la conductivité thermique	57
IV.4. Le CT mètre	58
IV.5. La réalisation de l'échangeur	60
IV.6. Mesure de la température des éléments de l'échangeur.....	69
CONCLUSION	72

CHAPITRE V: Résultats et discussion

V.1. Méthode de calcul	73
V.2. Résultats et discussions	73
V.3. Calcul du rayonnement.....	81
V.4. Rayonnement global par mètre carré du capteur.....	82
V.5. Rayonnement reçu par la surface étudiée.....	82
V.5.1. Le rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les canettes.....	83
V.5.2. Le rayonnement issu du réflecteur	83
V.5.3. Le rayonnement issu du soleil et reçu par les canettes.....	84
V.5.4. Le rayonnement total reçu par la surface étudiée.....	84
V.6. La quantité d'énergie reçue par l'eau	84
V.7. L'efficacité de l'échangeur.....	84
CONCLUSION	86

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1. Structure du soleil	03
Figure I.2. Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	04
Figure I.3. La sphère céleste.....	04
Figure I.4. Les coordonnées géographiques	05
Figure I.5. La déclinaison solaire en fonction du jour.....	06
Figure I.6. Coordonnées équatoriales (horaires)	06
Figure I.7. Les coordonnées horizontales.....	07
Figure I.8. Azimut du soleil	07
Figure I.9. Graphe des variations annuelles de l'équation du temps.....	08
Figure I.10. Graphe des variations annuelles de l'équation du temps.....	09
Figure I.11. L'organigramme permettant la construction de diagramme solaire	10
Figure I.12. La structure de l'atmosphère	11
Figure I.13. Le rayonnement solaire et le nombre de masse d'air	12
Figure I.14. Variation mensuelle de la constante solaire	13
Figure I.15. Composantes de l'éclairement global d'une surface horizontale	14
Figure I.16. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	16
Figure I.17. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à l'altitude du lieu	17

CHAPITRE II

Figure II.1. Principe de fonctionnement d'un capteur solaire.....	19
Figure II.2. Capteur thermique sans vitrage	20
Figure II.3. Un capteur solaire sous vide	20

Figure II.4.Capteur à tube sous vide à circulation directe.....	21
Figure II.5.Le capteur à tube sous vide à " Caloduc"	21
Figure II.6.Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"	22
Figure II.7.Le capteur CPC	22
Figure II.8.Les différents composants d'un capteur plan	23
Figure II.9.Capteur à air	23
Figure II.10.Principales technologies de concentration solaire.....	26
Figure II.11.Schéma d'un capteur cylindro-parabolique	26
Figure II.12.Schéma d'un capteur parabolique	27
Figure II.13.Centrale a tour	28
Figure II.14.Cuiseur solaire.....	28
Figure II.15.Le mécanisme de l'effet de serre	30
Figure II.16.L'orientation et l'inclinaison	31
Figure II.17.Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire.....	32
Figure II.18.Installation d'un capteur solaire	32
Figure II.19.Local chauffé.....	33
Figure II.20.Séchoir solaire	34
Figure II.21.Distillation solaire	35
Figure II.22.Installation des capteurs solaires au sol	35
Figure II.23.Installation des capteurs solaires en façade.....	36
Figure II.24.Installation des capteurs solaires sur le toit.....	36
Figure II.25.Les capteurs en série et les capteurs en parallèle	37

CHAPITRE III

Figure III.1.Les différents échanges thermiques dans un capteur plan	39
Figure III.2.La conduction	40

Figure III.3.La convection.....	40
Figure III.4.Le rayonnement	42

CHAPITRE IV

Figure IV.1.Les matériaux utilisés pour la préparation du composite	53
Figure IV.2.Poudre de granite	53
Figure. IV.3.Etuve	54
Figure IV.4.Structure du graphite	54
Figure IV.5.Pesée des différents éléments	55
Figure IV.6.Emplacement du récipient dans le bain-marie.....	56
Figure IV.7.Fabrication des pastilles.....	56
Figure IV.8.La pastille après La compression.....	57
Figure IV.9.Le mélange dans le bain marie	57
Figure IV.10.Le moule fabriqué.	58
Figure IV.11.La plaque de dimension (300*300*9 mm3)	58
Figure IV.12.Image globale de l'unité de mesure de la conductivité thermique	59
Figure IV.13.Support cylindro-parabolique	61
Figure IV.14.Cadre de la structure de basse.....	61
Figure IV.15.Les supports pour fixer les tubes au foyer	61
Figure IV.16.Préparation de la tôle	62
Figure IV.17.Montage de la tôle	62
Figure IV.18.Canette avec et sans le couvercle (vue de dessus	63
Figure IV.19.Canette avant et après perçage. (Vue de dessous)	63
Figure IV.20.Coulage des cannettes avec le mastic de silicone.....	65
Figure IV.21.Peindre les canettes en noir matte.....	65
Figure IV.22.Les tubes et les coudes en cuivre de diamètre d=12mm.....	66

Figure IV.23.Les ailettes à basse des feuilles de cuivre	66
Figure IV.24.L'assemblage des deux tubes	67
Figure IV.25.Montage fini de capteur	67
Figure IV.26.Le capteur avec et sans vitrage	68
Figure IV.27.Le réservoir de stockage	68
Figure IV.28.La pompe	69
Figure VI.29.Thermocouple couple de type K.....	70
Figure IV.30.Pico Technology Enregistreur de données, Température	70
Figure IV.31.Schéma d'acquisition de donnée avec thermocouple	71

CHAPITRE V

Figure V.1.Les température et le flux de chaleur avec vitrage (1 ^{er} test)	74
Figure V.2.Les température et le flux de chaleur sans vitrage (1 ^{er} test)	74
Figure V.3.Les température et le flux de chaleur avec vitrage (2 ^{eme} test)	75
Figure V.4.Les température et le flux de chaleur sans vitrage (2 ^{eme} test)	76
Figure V.5.Les température et le flux de chaleur avec vitrage (3 ^{eme} test)	77
Figure V.6.Les température et le flux de chaleur sans vitrage (3 ^{eme} test)	77
Figure V.7.Les température et le flux de chaleur avec vitrage (4 ^{eme} test)	78
Figure V.8.Les température et le flux de chaleur avec vitrage (4 ^{eme} test)	79
Figure V.9.Evolution des températures des composants du capteur (5 ^{eme} test)	80

Liste des tableaux

CHAPITRE I

Tableau. I.1. Caractéristiques principales du soleil.....	02
Tableau I.2. Coefficient de trouble du ciel.....	13
Tableau I.3.Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....	16

CHAPITRE III

Tableau III.1. Les nombre a dimensionnelle.....	41
Tableau III.2.Les nombre a dimensionnelle.....	45

CHAPITRE IV

Tableau IV.1 Les proportions en masse des différents constituants	55
---	----

CHAPITRE V

Tableau V.1.Les températures obtenue au 1 ^{er} test.....	73
Tableau V.2.Les températures obtenue au 2 ^{eme} test.....	75
Tableau V.3.Les températures obtenue au 3 ^{eme} test	76
Tableau V.4. Les températures obtenues au 4 ^{eme} test.....	78
Tableau V.5. Les températures obtenues au 5 ^{eme} test.....	79
Tableau V.6. Rayonnement global sur un plan fixe	81

NOMENCLATURE

Lettres	Désignation	Unités
L	longitude	km
Z	altitude	km
N	numéro du jour dans l'année	-
TSV	Temps Solaire Vrai	Heures
H	hauteur angulaire	Degré
A	azimut	-
TSM	Temps Solaire Moyen	Heures
ET	Equation du temps	-
TU	Temps universel	Heures
TL	Temps Légal	Heures
ΔH	décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré	-
TC	Temps Civil	Heures
M	masse air	kg
P	Pression atmosphérique	Atm
R	rayon moyen de la particule diffusante	m
C*	Constante solaire	-
C	Correction de la distance terre-soleil	-
H	la hauteur du soleil	-
e et F	coefficients de trouble du ciel	-
Alb	l'albédo	-
D	l'éclairement diffus	W/m ²
S	Rayonnement direct	W/m ²
S ₁	Rayonnement direct sur un plan incliné	W/m ²
e _i	Epaisseur d'isolant	m
e _{iarr}	Epaisseur d'isolant arrière	m
Q	flux de chaleur	W
K	coefficient d'échange surfacique	W/m ² °C
A	Surface d'échange	m ²
Hc	coefficient de convection	W/m ² °C
Tp	Température de la paroi	°C
Tf	Température du fluide	°C
Q	densité de flux de chaleur	W/m ²
T	température absolue	°C
Nu	Nombre de Nusselt	-
Pr	Nombre de Prandtl	-
Re	Nombre de Reynolds	-
D _{e abs}	Diamètre extérieur du tube absorbeur	m
D _{iv}	Diamètre intérieur de l'enveloppe du verre	m
K _{eff}	La conductivité thermique effectuée de l'air	W/m°C
V _{vent}	Vitesse du vent	m/s
Tamb	Température ambiante	°C
Tabs	Température de l'absorbeur	°C

m_i	Masse d'un corps d'indice i	kg
C_{p_i}	Chaleur massique	kJ/kg°C
q^*	Energie absorbée par le capteur	W
Q_u	Puissance utile	W
Q_a	Energie perdue vers l'environnement	W
q_t	Puissance provenant du réchauffement du capteur	W
M_v	Masse de la vitre	kg
M_{ab}	Masse de l'absorbeur	kg
M_f	Masse de fluide	kg
Q_{pert}	Pertes	W
Q_{cond}	Pertes par conduction	W
Q_{conv}	Pertes par convection	W
Q_{ray}	Pertes par rayonnement	W
T_{ciel}	Température du ciel	°C
A_e	La surface active	m^2
A_i	La Surface inactive	m^2
A_b	surface soumise à l'ombre	m^2
S^*	Composante normale directe du rayonnement solaire	W / m^2

Caractères grecques

symboles	Désignation	Unités
Φ	Latitude	Degré (°)
δ	déclinaison	Degré (°)
ω	L'angle horaire	Radians
λ	diffusion	-
θ	Angle d'incidence du rayonnement solaire	Degré (°)
β_1	L'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontal	Degré (°)
β_2	L'angle formé par la projection de la normal	Degré (°)
α_{ab}	Absorptivité d'absorbeur	-
ϵ_{abs}	Emissivité d'absorbeur	-
ϵ	Emissivité thermique du matériau	-
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/ ($m^2 K^4$)
μ_f	Viscosité du fluide caloporteur	Pa.s
ρ	La densité de l'air	W/ m^2
φ	L'angle d'ouverture	Degré (°)
γ	Facteur optique	-

Abréviations et indices

Symboles	Désignation
Pa	Paraffine
Gr	Graphite
MCP	Matériaux à Changement de Phase
HFM	Mesure de Flux de Chaleur
f	Final
i	Initial

Introduction générale

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.

Compte tenu de l'épuisement des de ces dernières 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 d'utiliser cette énergie pour être exploitée dans plusieurs domaines tels que, la distillation de l'eau de mer, le chauffage des locaux, la production de l'électricité, la production de l'eau chaude, le chauffage des piscines ...etc.

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en l'étude thermique d'un concentrateur cylindro-parabolique et la réalisation des essais expérimentaux sur les températures de l'eau obtenues.

Ce mémoire comprend cinq chapitres :

Dans le premier chapitre, on traite des généralités sur le gisement solaire.

Dans le second chapitre, on traite des généralités sur les capteurs solaires.

Ensuite, une étude théorique simplifiée est abordée dans le troisième chapitre qui permettra d'analyser et d'expliquer les modes de transfert de chaleur ainsi que les nombres adimensionnels utilisés.

Le quatrième chapitre est consacré aux méthodes et matériels utilisés.

Le cinquième et dernier chapitre est consacré aux résultats obtenus suivis de discussions.

Enfin, une conclusion générale qui permettra de clôturer notre mémoire.

CHAPITRE I

Le gisement solaire

Introduction

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé dans des domaines aussi variés que l'agriculture, la météorologie, les applications énergétiques et la sécurité publique. Dans le système d'exploitations de l'énergie solaire, le besoin de donnée d'insolation est d'une importance capitale aussi bien la conception et le développement de ces systèmes que dans l'évaluation de leurs performances. L'existence d'une solide et fiable base de données est une nécessité pour au moins la survie économique des installations de collection et de conversion de l'énergie solaire.

Ce premier chapitre est consacré pour aux rappels sur l'énergie solaire et les différents paramètres qui influent sur l'intensité du flux solaire reçu au niveau du sol.

Le soleil et la terre

I.1. Le soleil

Le soleil est l'étoile la plus proche de la terre, c'est l'origine principale de toute forme d'énergie. Il est de forme sphérique de $1391 \cdot 10^9$ km de diamètre, sa masse est de $1989 \cdot 10^{30}$ kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et de 1% de mélange de plus de 100 éléments, sa distance de la terre est de 150 millions de km, sa luminosité totale est de $4 \cdot 10^{26}$ W [1, 3].

I.1.1. Les caractéristiques du soleil

Les caractéristiques du soleil sont données dans le tableau suivant :

CARACTERISTIQUES	VALEURS
Masse (kg)	1989×10^{30}
Diamètre (km)	1392×10^9
Masse volumique (kg/m ³)	1410
Surface (km ²)	6.09×10^{12}
Volume (km ³)	1.41×10^{18}
Puissance rayonnée (W)	3.83×10^{26}
Température superficielle (K)	5770

Tableau. I.1 : Caractéristiques principales du soleil.

I.1.2. Les Constitutions du soleil [5, 6]

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

- **Le noyau :** contient 40% de la masse du soleil, tout le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches supérieures

- ✓ Epaisseur de $25 \cdot 10^4$ km.
- ✓ Température de $15 \cdot 10^6$ K.
- ✓ Densité de 1015 kg/m^3 .
- ✓ Pression de 109 atm.
- **La zone radiative** : la chaleur produite se propage par une diffusion radiative
 - ✓ épaisseur de 244160 km.
 - ✓ température variant de $10 \cdot 10^6$ °C à $50 \cdot 10^4$ °C.
- **La zone de convection** : la chaleur produite se propage par une convection turbulente
 - ✓ température comprise entre $50 \cdot 10^4$ °C à 6400 °C.
 - ✓ épaisseur de 199758 km.
- **La photosphère** : est une couche opaque, les gaz qui la constituent sont capables d'absorber et d'émettre un spectre continu de radiations, elle émet 99% du rayonnement total principalement dans le visible. [6]
 - ✓ température de surface décroît de 6400 °C à 4500 °C une épaisseur de 500 km
 - ✓ Une épaisseur de 500 km.
 - ✓ Une pression de 1/100 atm.
- **La chromosphère** : constitue avec la couronne d'atmosphère du soleil
 - ✓ épaisseur 2000 km
 - ✓ une température augmentant de 4000 °C à 100000 °C
- **La couronne** : est la dernière couche du soleil. Elle est sans limite précise
 - ✓ température augmente de 10^6 °C à $2 \cdot 10^6$ °C. [5]

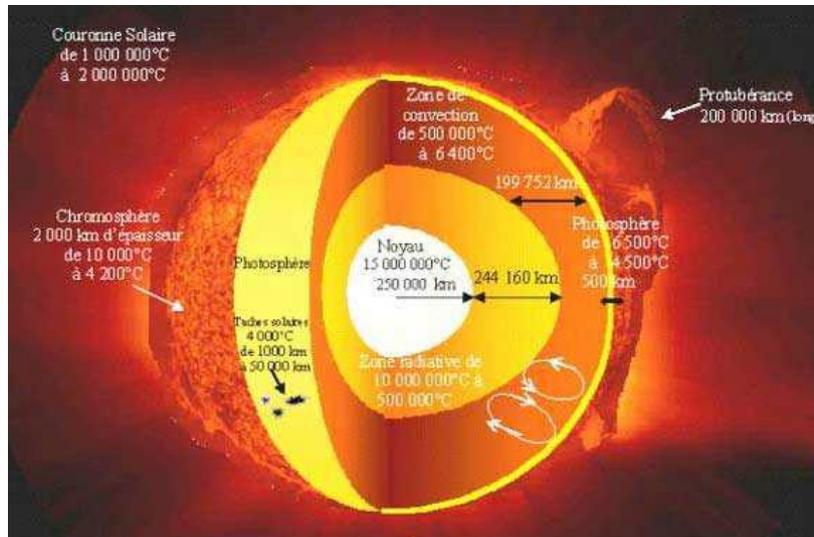


Figure I.1 : Structure du soleil.

I.1.3. Mouvements de la terre [7]

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, l'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/ Soleil ne varie que de ± 1.7 % par rapport à la distance moyenne qui est de 150 millions km. 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 $23^{\circ}27'$.

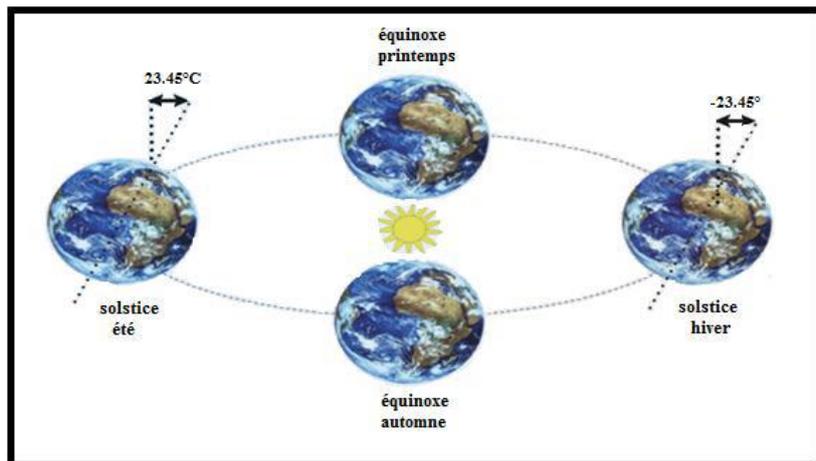


Figure I.2 : Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil.

I.2. La sphère céleste

La sphère céleste est une sphère imaginaire d'un diamètre immense ($1,496 \cdot 10^8$ km, distance terre-soleil), avec la terre au centre. 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 cela est représenté sur la figure I.3.

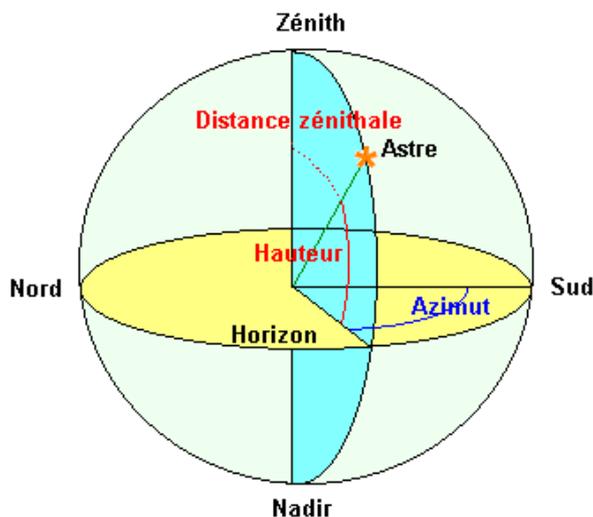


Figure I.3 : La sphère céleste

I.3. Les coordonnées célestes

I.3.1. Les coordonnées géographiques [7, 9]

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre.

- ✓ **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 (Z)** : 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.

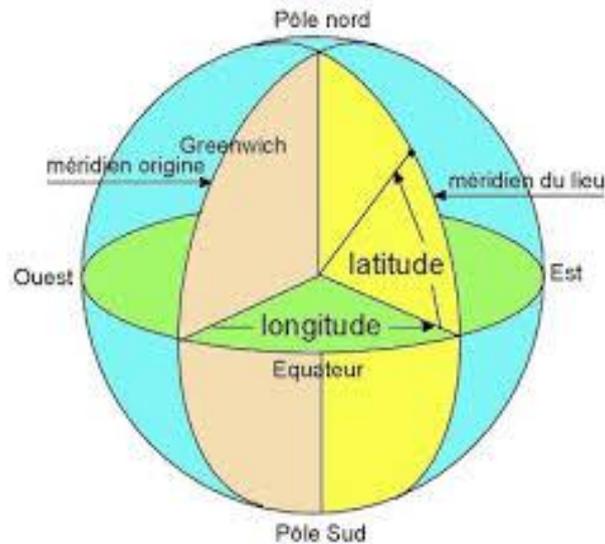


Figure I.4: Les coordonnées géographiques.

I.3.2. Les coordonnées équatoriales

Elles sont indépendantes de la position de l'observateur sur la terre, mais elles sont liées à l'heure de l'observation. La position du soleil est exprimée par deux angles qui sont les suivants :

- ✓ **La déclinaison (δ)** : C'est l'angle formé par la direction du terre-soleil et le plan équatorial terrestre, il est dû à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Cet angle varie au cours de l'année de $+23^\circ 27'$ à $-23^\circ 27'$. Il s'obtient à partir de la formule suivante :

$$\delta = 23.45 \sin[(284.n)/365 \times 360] \quad (\text{I.1})$$

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

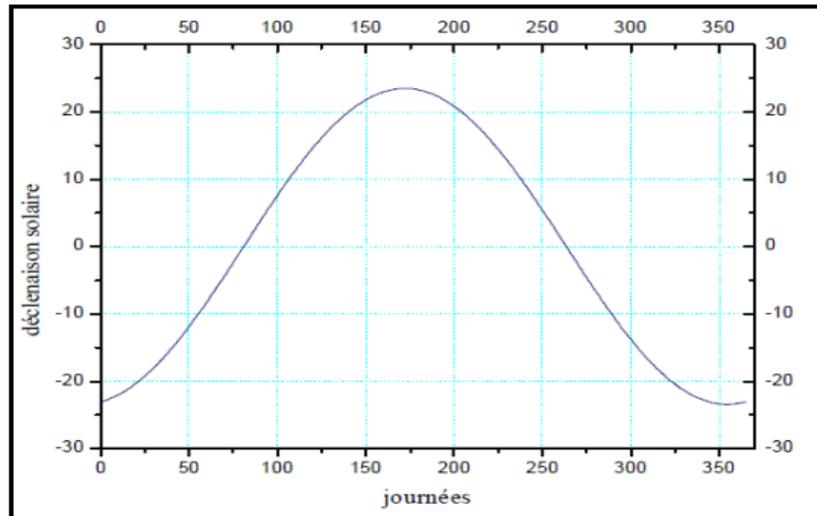


Figure I.5 : La déclinaison solaire en fonction du jour.

- ✓ **L'angle horaire (ω)** : c'est l'angle formé par le méridien céleste et la projection de la direction terre / soleil sur le plan de l'équateur céleste, ou encore le déplacement angulaire du soleil autour de l'axe polaire dans sa course d'est en ouest par rapport au méridien local. Il est nul à midi solaire, négatif le matin et positif l'après-midi. Il est donné par :

$$\omega = \frac{\pi}{12} (TSV - 12) \quad (I.2)$$

ω : en radians.

TSV : temps solaire vrai en heures.

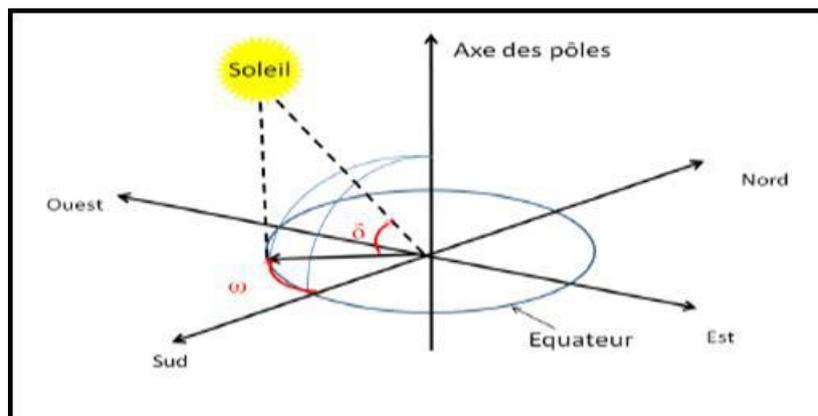


Figure I.6 : Coordonnées équatoriales (horaires).

I.3.3. Les coordonnées horizontales [6. 7]

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste. Ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et c'est pour

cela qu'elles sont appelées aussi coordonnées locales. Le plan de référence est l'horizon astronomique.

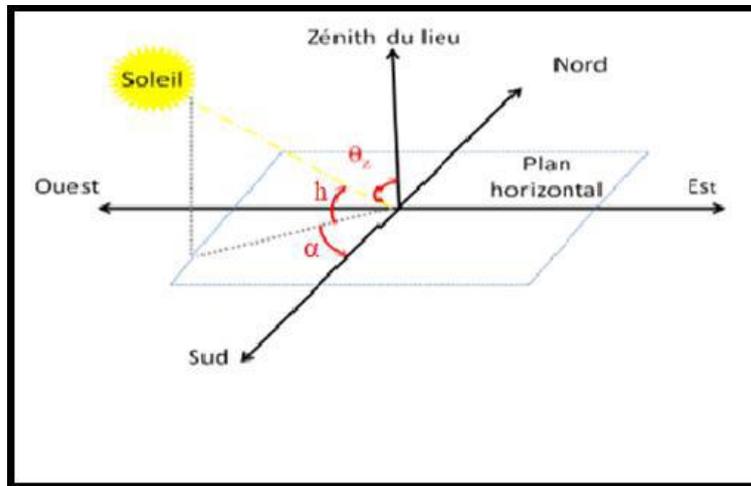


Figure I.7: Les coordonnées horizontales.

- ✓ **Hauteur angulaire (h) :** c'est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal, il est compté positivement de 0 à -90° vers le nadir.
 - **$h > 0$ le jour**
 - **$h < 0$ nuit**
 - **$h = 0$ aux lever et coucher**
- ✓ **L'azimut (a) :** c'est l'angle entre la direction de soleil et la direction de Sud .on peut le compter positivement de 0° à $+180^\circ$ vers l'Ouest est négativement 0° à -180° vers l'Est.

$$\sin az = \frac{\cos \delta \cos \omega \sin \varphi - \sin \delta \cos \varphi}{\cos \gamma} \quad (I.3)$$

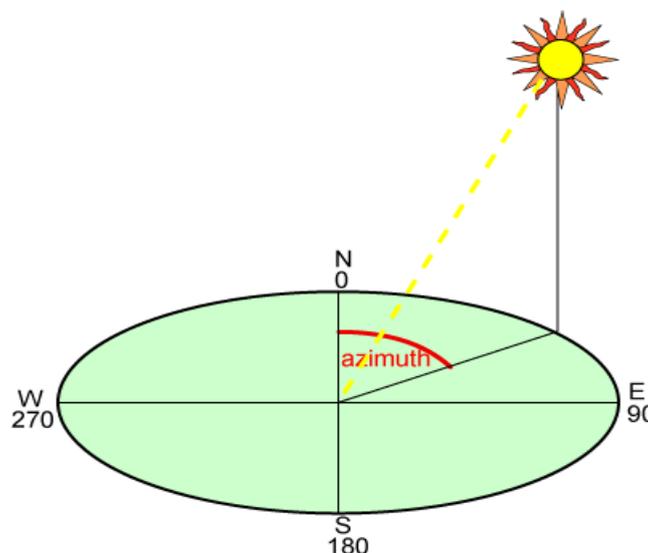


Figure I.8 : Azimut du soleil.

- ✓ $a > 0$ vers l'Ouest.
- ✓ $a < 0$ vers l'Est.
- ✓ $a = 0$ direction vers le Sud.

I.4. Paramètre du temps

I.4.1. Le temps solaire vrai [8]

La position de soleil dans le ciel nous renseigne sur le temps solaire vrai. C'est le temps donné par les cadrans solaires. Il traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre sur elle même et son mouvement autour de soleil. Il est donné par la relation suivante :

$$\text{TSV} = \text{TSM} + \text{ET} \quad (\text{I.4})$$

TSM : temps solaire moyen.

ET : équation du temps.

Il existe une relation entre l'heure solaire TSV et l'angle horaire w :

$$\text{TSV} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{I.5})$$

I.4.2. Le temps solaire moyen

On définit le temps solaire moyen en supposant un mouvement uniforme de la terre autour de son axe, et donc le jour solaire moyen dure 24heures.

Le temps solaire moyen est appelé aussi **temps local**.

$$\text{TSM} = \text{TSV} - \text{ET} \quad (\text{I.6})$$

I.4.3. L'équation du temps

C'est l'écart entre le temps solaire moyen TSM et le temps solaire vrai TSV selon le jour de l'année considéré :

$$\text{ET} = 9.87 \sin \left[2 \times \frac{360}{365} (n - 81) \right] - 7.53 \cos \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] - 1.5 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (\text{I.7})$$

n : est le numéro du jour dans l'année.

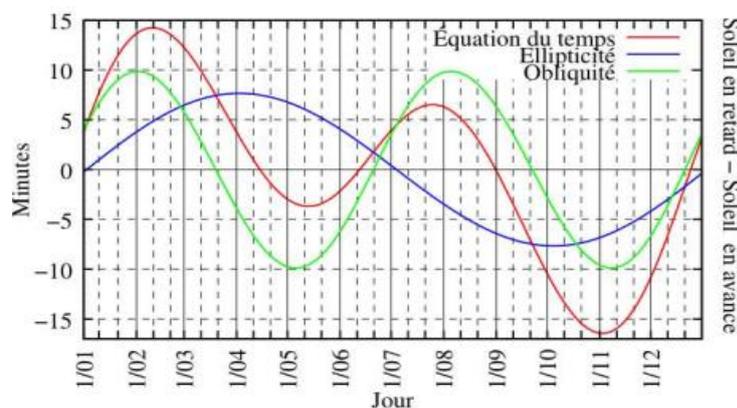


Figure I.9 : Graphe des variations annuelles de l'équation du temps.

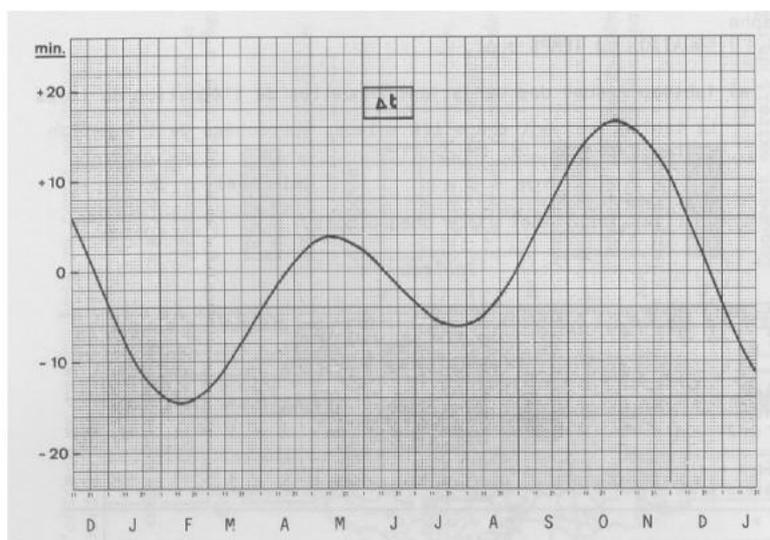


Figure I.10 : Graphe des variations annuelles de l'équation du temps.

I.4.4. Le temps universel

Le temps universel est défini par l'heure de passage du soleil au méridien (origine) Greenwich, appelé encore GMT (Greenwich Mean Time).est donné par la relation suivante :

$$\text{TU} = \text{TSM} - \frac{L}{15} \quad (\text{I.8})$$

Avec L la longitude exprimée en degré et le temps en heures.

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

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

$L = 0$: pour les sites situés au méridien de Greenwich.

I.4.5. Le temps légal

Le temps légal est une heure liée au TU par une différence fixe exprimée en un nombre entier d'heures qui dépend de longitude et des coutumes de chaque pays. Elle est donnée par la relation suivante :

$$\text{TL} = \text{TU} + \Delta\text{H} \quad (\text{I.9})$$

Où ΔH : est le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré. Il est positif à l'est de Greenwich et négatif à l'ouest.

I.4.6. Le temps civil

C'est le temps civil et le temps moyen avec l'origine à minuit.

I.5. Diagramme solaire[7]

Il est toujours intéressant de connaître rapidement les coordonnées horizontales de l'astre en fonction de la journée choisie et de l'heure désirée. Pour cela on trace un diagramme circulaire appelé diagramme solaire, sur lequel sont représentés l'azimut α par des rayons issus du centre et la hauteur angulaire h par des cercles concentriques. Un réseau de courbes

représente la trajectoire du soleil pour différentes journées. Ce réseau est limité par les courbes relatives aux solstices d'hiver et d'été. L'organigramme simplifié ci-dessous permet de suivre la construction d'un tel diagramme :

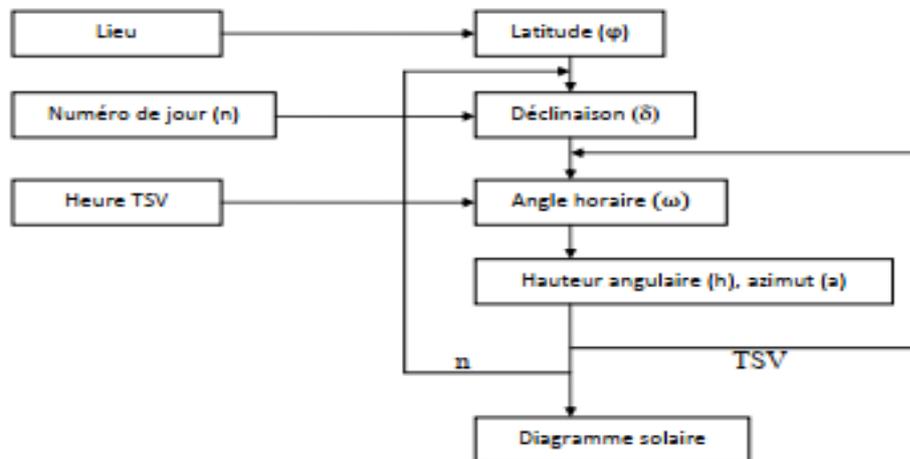


Figure I.11 : L'organigramme permettant la construction du diagramme solaire.

I.6. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère

I.6.1. La composition de l'atmosphère

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches : 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0,9 % d'argon, 0,03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante. La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes /m²; elle équivaut à 7,8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: T= 0°C; P = 1 013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6,2 km d'Azote, 1,7 km d'Oxygène, 74 m d'argon, 30 m de vapeur d'eau, 24 m de CO₂, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'Ozone.

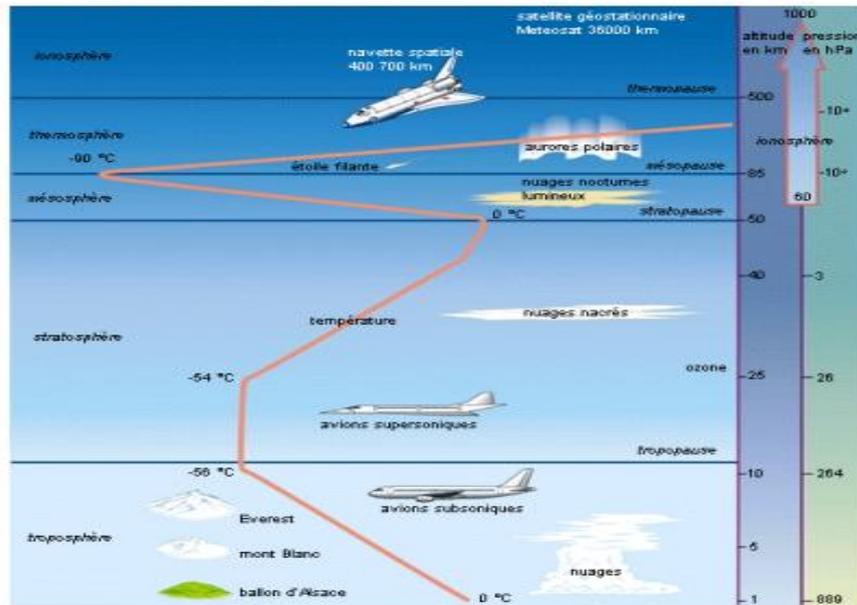


Figure I.12 : La structure de l'atmosphère.

- **La troposphère** : qui s'étend jusqu'à 10 à 12 km d'altitude et où la température décroît de 6.5 °C par km, pour atteindre - 56 °C à la base de la couche suivante.
- **La stratosphère** : de 12 à 55 km où la température croît de -56 °C à 0 °C jusqu'à la stratopause. C'est elle qui contient une mince couche d'ozone.
- **La mésosphère** : de 50 à 85 km où la température décroît à nouveau de 0 °C à -90 °C.
- **L'ionosphère** : (confondue avec la thermosphère) et où la température croît régulièrement pour atteindre 1500 °C. C'est elle qui contient les couches réfléchissantes pour les ondes radio (couches d'Heaviside); elle s'étend jusqu'à 700 km d'altitude.
- **L'exosphère** : au delà de 700 km qui s'ouvre sans frontière sur l'espace intersidéral.

I.6.2. La masse d'air[7]

Prenant pour référence unité, l'épaisseur verticale de l'atmosphère moyenne réduite à 7.8 km (conditions dites normales), supposant cette couche plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale sera donnée par la formule suivante :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{I.10})$$

A une pression p différente de 1013 mbar et à une altitude z (km), on désignera par masse atmosphérique ou nombre d'air masse le nombre:

$$m = \frac{P}{1013 \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7.8}\right) \quad (\text{I.11})$$

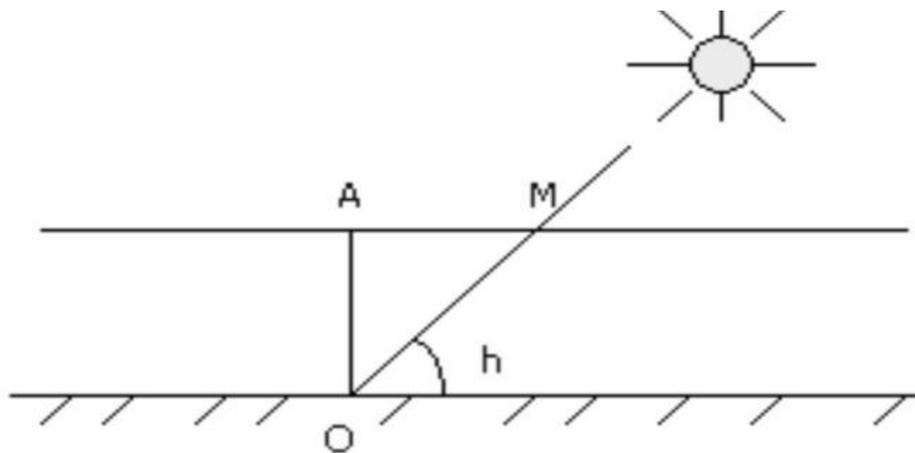


Figure I.13 : Le rayonnement solaire et le nombre de masse d'air.

I.6.3. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

L'irradiation solaire perd son intensité en traversant l'atmosphère terrestre. Deux phénomènes atténuent ce rayonnement, il s'agit de l'absorption et de la diffusion.

➤ **Absorption** : Elle est sélective et dépend principalement de : L'ozone qui forme un écran qui arrête les UV ($\lambda < 0,28 \mu\text{m}$). L'oxygène qui absorbe des bandes étroites du spectre visible (vers $0,69$ et $0,76 \mu\text{m}$). Le gaz carbonique qui absorbe une partie de l'IR lointain ($\lambda > 2 \mu\text{m}$). La vapeur d'eau qui entraîne des bandes d'absorption multiples surtout dans l'IR. On ne la rencontre pratiquement qu'au niveau du sol[8].

➤ Diffusion [8]

En plus de l'absorption sélective liée aux gaz atmosphériques, le rayonnement solaire est soumis à la diffusion lors de sa traversée de l'atmosphère, il s'agit d'une redistribution spectrale du rayonnement par des particules matérielles. On distingue trois types de diffusion atmosphériques :

- Si $\lambda \gg r$: diffusion moléculaire (diffusion Rayleigh).
- Si $\lambda = r$: diffusion par les aérosols (diffusion Mie).
- Si $\lambda \ll r$: diffusion par gouttelettes d'eau et cristaux de nuage.

Avec :

r = le rayon moyen de la particule diffusante.

I.7. Les différents types de rayonnement solaire

Le rayonnement solaire arrivant au sol se compose de rayonnement direct et du rayonnement diffus et dont l'ensemble donne le rayonnement global.

I.7.1. La constante solaire : c'est le flux énergétique reçu par une surface unitaire, sa valeur a été retenue de 1367 W/m^2

On introduit une correction due à la variation de la distance terre soleil :

$$E = E_0 [1 + 0.033 \cos(0.984J)] \quad (\text{I.12})$$

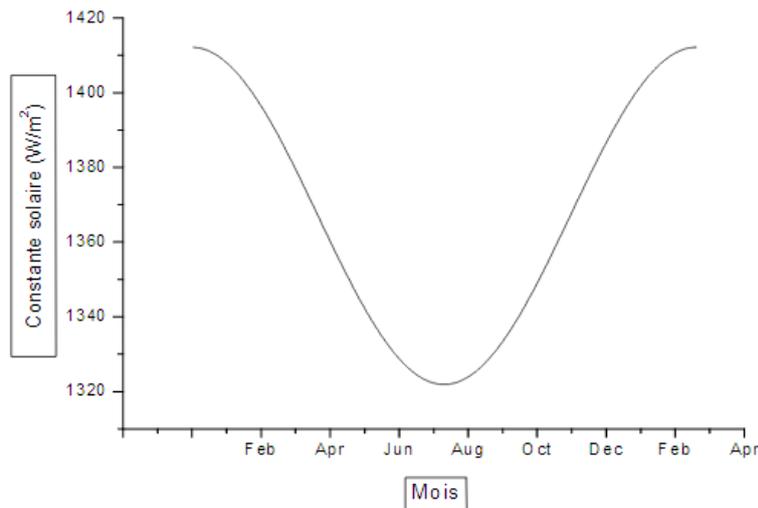


Figure I.14 : Variation mensuelle de la constante solaire.

I.7.2 Le rayonnement solaire direct

Ce type de rayonnement est mesuré sur un plan perpendiculaire à sa direction, il est donné par la formule suivante :

$$S = C^* \cdot C \cdot e \cdot \exp \left[-\frac{F}{\sin h} \right] \tag{I.13}$$

C^* : Constante solaire.

C : Correction de la distance terre-soleil.

$$C = 1 + 0.034 \cos \left[\frac{360}{365} (n - 3) \right] \tag{I.14}$$

h : la hauteur du soleil.

E et F : les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont donnés dans le tableau suivant :

	Ciel dégagé très pur	Conditions normales	Zone industrielle
e	0.87	0.88	0.91
F	0.17	0.26	0.43

Tableau I.2. Coefficient de trouble du ciel.

- **Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal**

Ce rayonnement dans ce plan est donné par la formule suivante :

$$S_1 = S \times \sin h \tag{I.15}$$

- **Rayonnement solaire direct sur un plan incliné**

Pour un plan quelconque, le rayonnement solaire direct est donné par :

- $S_1 = S \times \cos \theta \tag{I.16}$

θ : C'est l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Pour l'évaluer on utilise la formule suivante :

$$\cos \theta = \cos \beta_1 \times \sin h + \sin \beta_1 \times \cos h \times \cos(a - \beta_2) \quad (\text{I.17})$$

β_1 : C'est l'inclinaison du capteur par rapport à l'horizontale.

β_2 : C'est l'angle formé par la projection de la normale au plan du capteur et la direction Sud.

a : C'est l'azimut du soleil.

I.7.3. Le rayonnement solaire diffus

Ce type de rayonnement représente 15% du rayonnement direct reçu sur un plan horizontal, il est la somme de deux composantes :

- ✓ Le rayonnement diffus provenant de la voûte céleste.
- ✓ Le rayonnement diffus du sol.

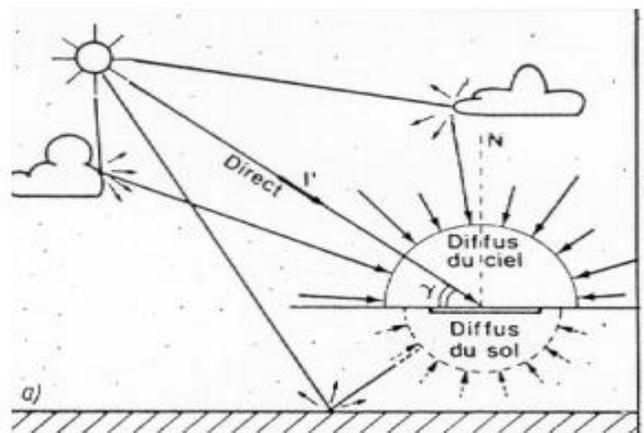


Figure I.15 : Composantes de l'éclairement global d'une surface horizontale.

- **Le rayonnement diffus provenant de la voûte céleste**

L'éclairement diffus provient de l'ensemble de la voûte céleste, reçu sur un plan horizontal :

$$D_{1h} = C^* \times C \times \sin h \left[0.271 - 0.2939 \times e \times \exp\left(\frac{-F}{\sin h}\right) \right] \quad (\text{I.18})$$

Pour un plan quelconque, l'éclairement diffus est :

$$D_1 = D_{1h} \left[\frac{1 + \cos \beta_1}{2} \right] \quad (\text{I.19})$$

Avec :

β_1 : C'est l'inclinaison du plan.

$\left[\frac{1+\cos \beta_1}{2}\right]$: C' est le facteur de forme entre le plan et la voûte céleste.

- **Le rayonnement diffus par les sols**

Pour un plan horizontal, cette composante de rayonnement diffus est donnée par la formule suivante :

$$D_{2h} = \text{alb}(S_1 + D_{1h}) \quad (\text{I.20})$$

Avec :

alb est l'albédo du sol.

Pour un plan quelconque, cette composante est :

$$D_2 = D_{2h} \left[\frac{1 - \cos \beta_1}{2}\right] \quad (\text{I.21})$$

Avec :

$\left[\frac{1 - \cos \beta_1}{2}\right]$ qui est le facteur de forme entre le plan et le sol.

Enfin, le rayonnement diffus global est :

$$D = D_1 + D_2 \quad (\text{I.22})$$

I.7.4. Rayonnement global

Le rayonnement global sur un plan quelconque est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, soit :

$$G = S + D \quad (\text{I.23})$$

Avec :

S : l'éclairement direct.

D : l'éclairement diffus.

I.8. 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 pour faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire.

De part sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure suivante :

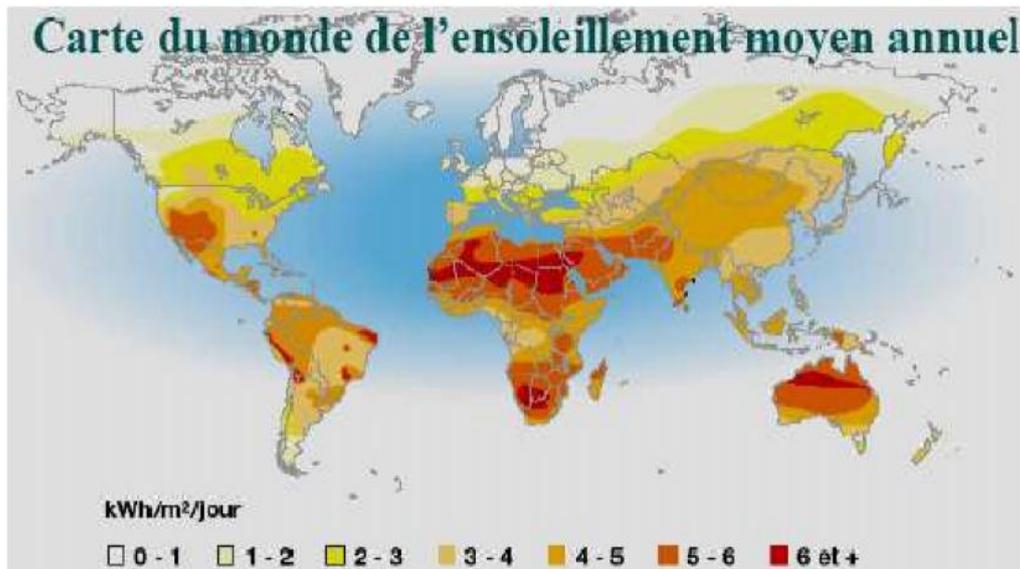


Figure I.16. Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 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.

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.3. Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie.

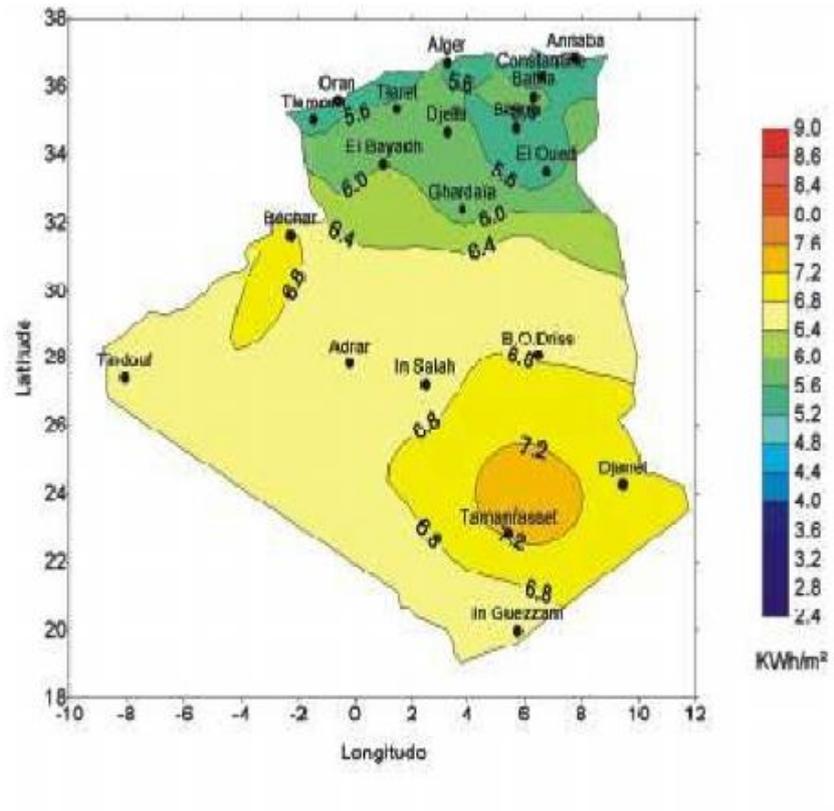


Figure I.17. Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné à l'altitude du lieu.

Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les caractéristiques essentielles (données géométriques et énergétiques) du gisement solaire ainsi que les règles de calcul des différentes composantes de rayonnement solaire afin d'avoir une orientation optimale des capteurs solaires, de fait un rendement élevé.

CHAPTRE II

Etude bibliographique

Introduction

Pour un éclairage solaire important, les températures atteindre 70°C , pour cela ces systèmes sont appeler système à basse température.

Dans ce deuxième chapitre on va faire une étude approfondie sur les capteurs solaire thermique et on va avoir un aperçu général de leur domaine d'utilisation dans notre vie quotidienne.

Les capteurs solaires thermiques[13]

Les capteurs solaires thermiques sont des systèmes fondamentaux de transformation d'énergies solaires (éclairage) en énergie calorifique (chaleur), ces systèmes sont utilisés principalement pour le chauffage d'eau sanitaire, les piscines ou bien pour le chauffage des habitats.

II.1.Principe des capteurs solaires thermiques[8]

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. La plupart des capteurs sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur. C'est le principe de « l'effet de serre ». Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

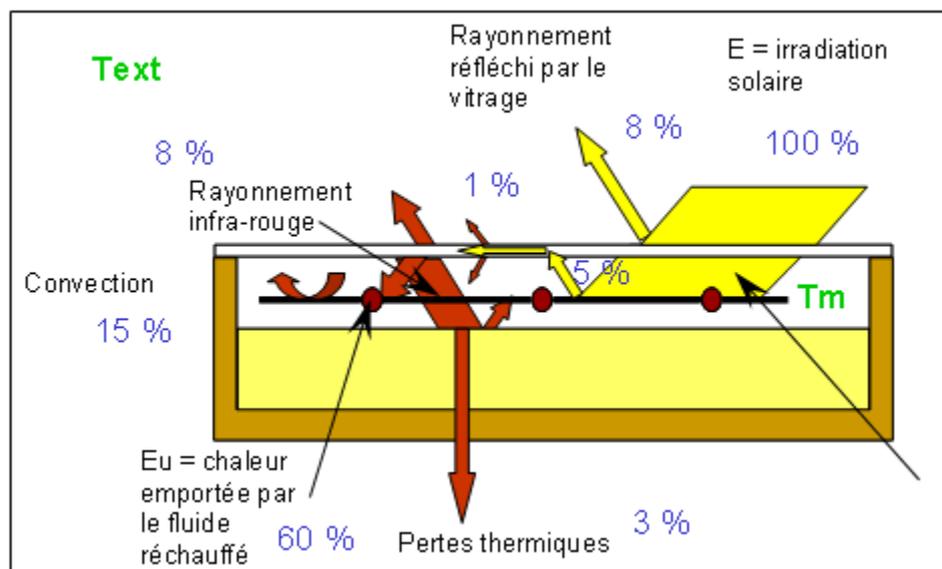


Figure II.1 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire.

II.2. Les différents capteurs solaires thermiques [8]

Les panneaux solaires thermiques sont composés de capteurs qui absorbent la chaleur des rayons du soleil pour chauffer l'eau. Il existe plusieurs types de capteurs solaires thermiques :

II.2.1. Les capteurs à eau : La chaleur est absorbée par un liquide caloporteur, qui circule dans les tubes. Il existe plusieurs types de capteurs à eau :

II.2.1.a. Les capteurs non vitrés :

Simple et peu onéreux, ils sont bien adaptés pour le chauffage de l'eau d'une piscine.

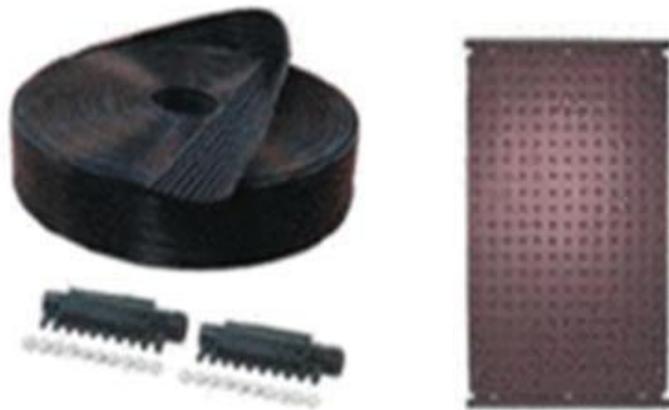


Figure II.2 : Capteur thermique sans vitrage.

II.2.1.b. Les capteurs à tube sous vide :

Plus performants mais plus onéreux, particulièrement adaptés pour une utilisation en région froide ou qui bénéficie d'un ensoleillement moins important.

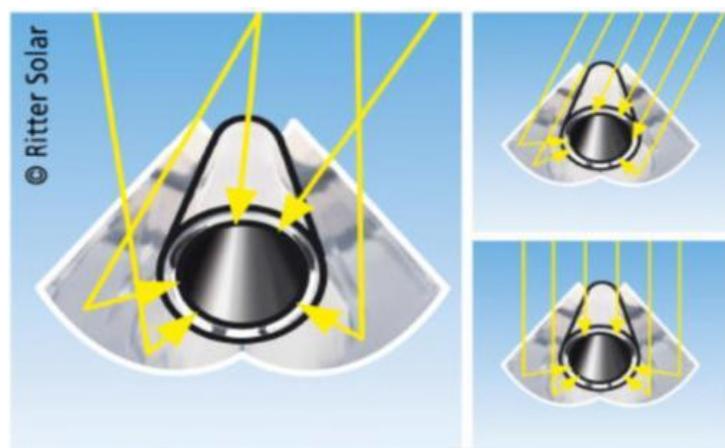


Figure II.3 : Un capteur solaire sous vide.

On distingue 5 types de capteurs à tube sous vide :

- ❖ **Les capteurs à tube sous vide à circulation directe** : La conception de l'absorbeur et des tuyaux de circulation du fluide caloporteur sont similaires à celle d'un capteur plan, sauf que l'ensemble est suffisamment étroit afin d'être glissé à l'intérieur d'un tube en verre. L'air est évacué pour faire le vide, le tube est fermé hermétiquement.



Figure II.4: Capteur à tube sous vide à circulation directe.

- ❖ **Les capteurs à tube sous vide à Caloduc** : Dans ce type de capteur, l'échange de chaleur a lieu suivant un mécanisme naturel d'évaporation et de condensation d'un fluide. La liaison verre-métal entre le tube sous vide et le caloduc est à sec. Le tube sous vide doit être incliné pour faciliter le phénomène



Figure II.5: Le capteur à tube sous vide à " Caloduc".

- ❖ **Les capteurs à tube sous vide à effet thermos** : C'est le principe d'enveloppe sous vide utilisé pour garder les boissons chaudes dans une bouteille thermos. Le tube intérieur sert d'absorbeur (la surface est traitée pour être absorbante)



Figure II.6: Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos".

- ❖ **Les capteurs à tube sous vide Schott** : Cette technique utilise le principe thermos. Une partie de la paroi intérieure du tube extérieur est un réflecteur cylindrique, le tube intérieur sert d'une part d'absorbeur et d'autre part en tant qu'échangeur de chaleur avec le fluide caloporteur.
- ❖ **Les capteurs CPC** : Les capteurs sous vide à concentration combinent l'effet de concentration des miroirs paraboliques (CPC = Concentrateur Parabolique Composé) avec des capteurs sous vide. Ils capturent les rayons du soleil quel que soit l'angle d'incidence et l'orientation grâce aux concentrateurs paraboliques positionnés sous chacun des tubes, ce qui permet l'obtention de hautes températures avec des surfaces de captage réduites.

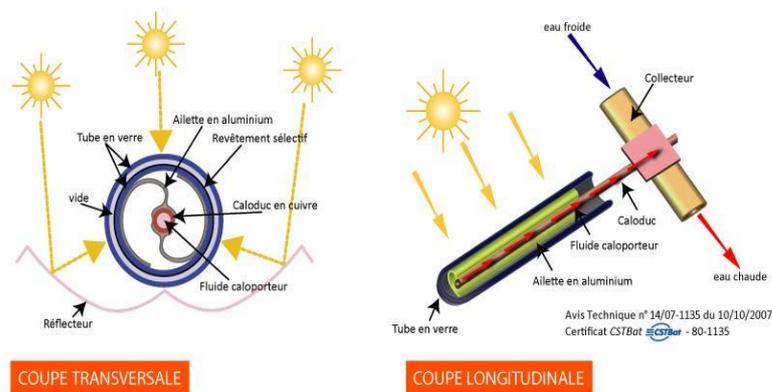


Figure II.7: Le capteur CPC.

II.2.1.c. Les capteurs plans vitrés

Les capteurs vitrés sont équipés d'une couverture transparente qui permet de créer l'effet de serre pour optimiser leur rendement.

Le phénomène de convection qui a été créé à cause de la lame de verre, pénalise la performance de ces capteurs.

Ils sont constitués aussi par des tubes de cuivre servant d'absorbeurs de l'énergie solaire. Ces capteurs sont isolés sur les autres faces dans le but de réduire au minimum les déperditions.

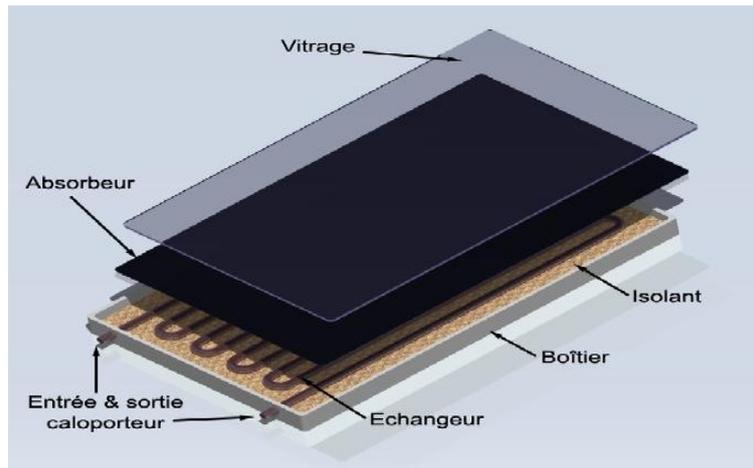


Figure II.8 : Les différents composants d'un capteur plan.

II.2.2. Les capteurs 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.

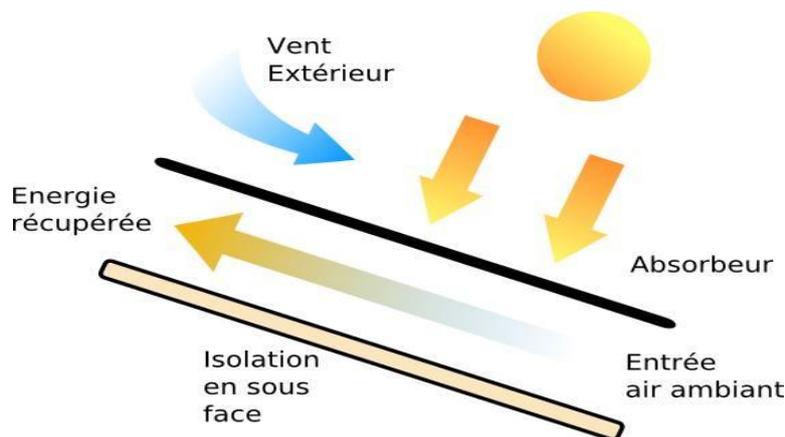


Figure II.9 : Capteur à air.

II.3. Eléments de construction des capteurs solaires plans thermiques [13]

Les capteurs solaires thermiques sont constitués d'un boîtier en acier galvanisé, à l'intérieur se trouve une plaque absorbante en acier peint en noir mate pour capter le maximum d'énergie solaire et un échangeur de chaleur entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur.

II.3.1. Le boîtier

C'est l'ensemble qui supporte les différentes composantes du capteur, il constitue l'enveloppe du capteur.

Il est généralement en acier inoxydable ou bien en aluminium pour augmenter sa durée de vie.

Le boîtier doit être rigide pour supporter le poids de tous les éléments du système.

II.3.2. L'isolant

L'isolant sert à réduire les pertes par convection et par conduction à travers la surface du boîtier, sa matière doit satisfaire les conditions suivantes :

- ✚ Ne doit pas être toxique ni explosif.
- ✚ Il doit résister à la gamme de température utilisée.
- ✚ Il doit résister à l'humidité présente dans le capteur.

L'épaisseur de l'isolant doit se situer dans la gamme indiquée ci-dessous :

$$\text{Latérale : } 0.035 < e_i < 0.075 \text{ m}$$

$$\text{Arrière : } 0.03 < e_{iarr} < 0.05 \text{ m}$$

II.3.3. La plaque absorbante

Son rôle est de transformer l'éclairement solaire incident sur le capteur en chaleur, puis transmettre cette dernière au fluide caloporteur.

Le choix de la plaque absorbante est basé sur les facteurs suivants :

- ✚ Conductivité élevée.
- ✚ La durabilité.
- ✚ Absorptivité élevée.
- ✚ Emissivité relativement faible.

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

- **Partie 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.

La sélectivité de la plaque absorbante : On appelle sélectivité d'une plaque le rapport de coefficient d'absorption α sur le coefficient d'émission d'infrarouge ϵ .

On appelle couche sélective de la plaque absorbante une couche de peinture noir mate (pour éliminer les réflexions), cette couche doit être mince et doit supporter des températures de 70 °C à 100 °C.

Dans des applications de chauffage d'eau, on cherche toujours à augmenter la sélectivité de la plaque pour augmenter la partie absorbée du rayonnement solaire incident et diminuer la partie réfléchi, pour cette raison le revêtement de la plaque absorbante (couche sélective) est très important.

II.3.4. Le circuit hydraulique

Le rôle du circuit hydraulique est de récupérer la chaleur obtenue par l'absorbeur et la transmettre au fluide caloporteur circulant dans ce dernier. Pour cela, on doit assurer un meilleur contact entre la plaque absorbante et notre circuit hydraulique pour éviter toute résistance thermique supplémentaire.

Il existe différentes configurations pour la réalisation du circuit hydraulique :

- Tubes parallèles.
- Tubes en serpentin (horizontale).
- Tubes en serpentin (verticale).

II.3.5. Le fluide caloporteur

Son rôle est de transporter la chaleur récupérée de la plaque absorbante au stockage ou de l'utiliser suivant le type de circuit utilisé.

On utilise généralement de l'eau contenant un antigel pour éviter le gel en hiver et la corrosion dans les canalisations.

II.3.6. La couverture transparente

La couverture transparente est facultative mais elle peut permettre d'accroître sensiblement le rendement du capteur par la création de l'effet de serre.

L'application d'une couverture transparente peut avoir deux intérêts :

- La protection contre les impuretés et les conditions désagréables de la météo.
- Le second rôle est très important, c'est la création de l'effet de serre en laissant traverser les rayons solaires à courte longueur d'onde et empêcher les rayons à grande longueur d'onde (rayon infrarouge) de sortir. Cet effet est appelé effet de serre qui permet l'augmentation du rendement du capteur solaire.

La nature de la couverture peut être en plastique ou en verre, ce dernier présente un grand rendement et une durée de vie très importante par rapport au plastique.

II.4. Les concentrateurs solaire

Ce sont des capteurs solaires comportant un système optique (réflecteur, lentilles, ...) destinés à concentrer sur l'absorbeur le rayonnement solaire incident. On distingue trois types représentés à la figure ci-dessous.

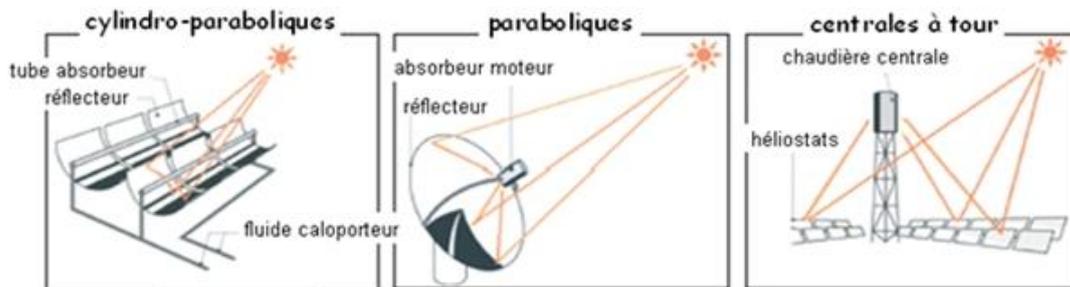


Figure II.10 : Principales technologies de concentration solaire.

II.4.1. Les capteur cylindro-parabolique

C'est un capteur à concentration à foyer linéaire utilisant un réflecteur cylindrique de section parabolique. Le rayonnement solaire est concentré environ 100 fois sur des tubes linéaires, de couleur noire (absorbeurs) pour capter un maximum de rayonnement, contenant un fluide caloporteur, installés le long de la ligne focale des miroirs.

Les capteurs cylindro-paraboliques peuvent fournir aujourd'hui l'énergie thermique utile jusqu'à 398 °C.

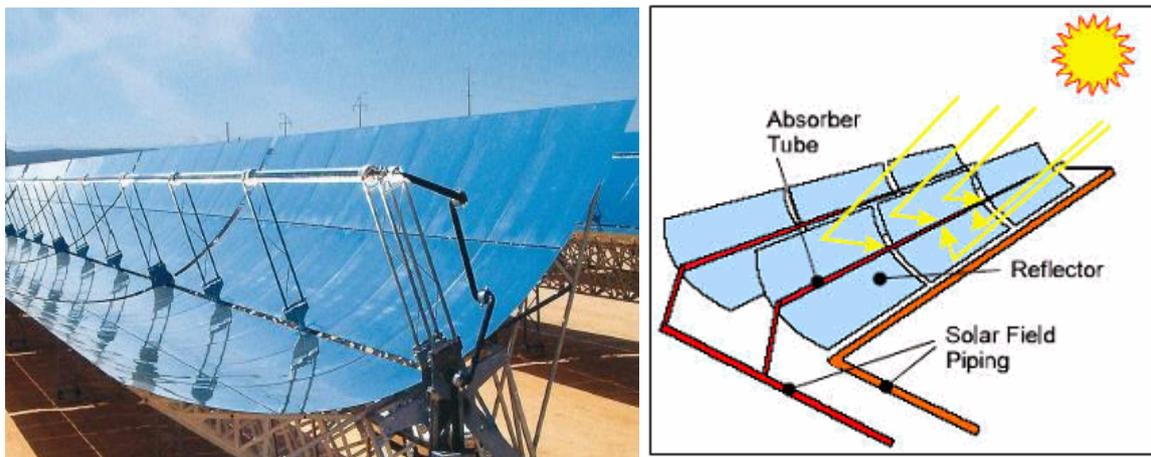


Figure II.11 : Schéma d'un capteur cylindro-parabolique.

❖ Dimensionnement d'un capteur cylindro-parabolique

a. Le Verre

Dans ce type de collecteur, le tube en verre est en pyrex avec une épaisseur de 3 mm, et un coefficient de transmission de 0,90. Le verre pyrex est un verre en borosilicate, formé de très nombreux microcristaux de borate de sodium très fins dans une matrice de silice pure, son coefficient de dilatation est pratiquement nul.

b. Le réflecteur

Une tôle réfléchissante en Aluminium polie, collée sur une surface en tôle galvanisée de 2 mm d'épaisseur par une colle forte, dont le coefficient de réflexion est de l'ordre de 0.76 à 0,80 est utilisée.

Pour le miroir réfléchissant, le matériau le mieux recommandé est l'Aluminium pur qui possède un pouvoir réflecteur plus élevé que celui de l'argent, et à un coût moindre.

c. L'absorbeur

Généralement c'est un tube en cuivre recouvert d'une couche mince de peinture noire matte dont l'absorptivité α_{ab} est comprise entre 0.92 et 0.95 et l'émissivité ε_{ab} est égale à 0.12 dans l'infrarouge. Afin d'augmenter la température du fluide caloporteur, il faut utiliser des capteurs isolés avec vitrage.

d. Le fluide caloporteur

Chaque fluide caloporteur est choisi en fonction de ses propriétés physico-chimiques, telles que la viscosité, la capacité thermique volumique, la chaleur latente de vaporisation (ou de liquéfaction), en cas de changement de phase, la conductivité thermique, les propriétés anticorrosives, et de son coût. Ce choix dépend de l'application du niveau de température voulue. Il tiendra compte également des problèmes dus au changement de phase.

II.4.2. Les capteur parabolique

Les capteurs paraboliques sont basés sur la propriété optique bien connue du paraboloïde. En effet, tout rayon incident orthogonal au plan directeur se réfléchit sur le paraboloïde en direction du point focal, qui peut ainsi collecter tout le flux de chaleur récolté par le paraboloïde (à nouveau, au rendement de réflexion près). Le facteur de concentration est donc bien supérieur à celui d'un CCP (il peut atteindre 230 °C).

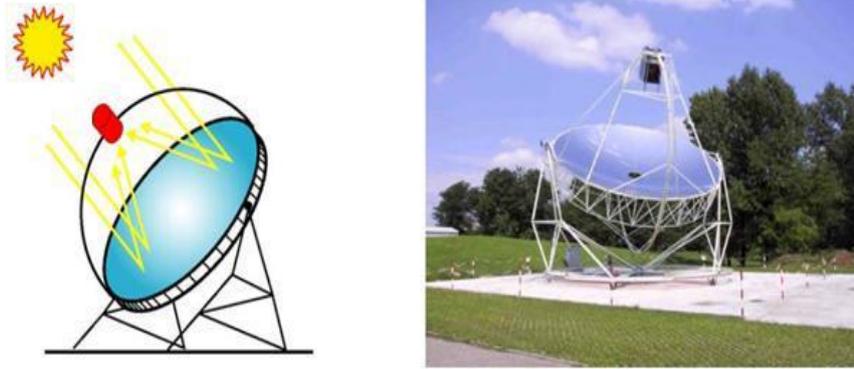


Figure II.12 : Schéma d'un capteur parabolique.

II.4.3. Les centrales à tour [14]

Les centrales à tour (CT) sont constituées de nombreux miroirs ou héliostats concentrant les rayons solaires vers une chaudière située au sommet d'une tour. Le facteur de concentration optique d'une installation (CT) varie de 200 à 1000 et le fluide caloporteur peut atteindre des températures comprises entre 250 et 1000 °C selon le type de récepteur et de caloporteur, ce qui permet de mettre en œuvre un cycle de Rankine, ou un cycle à gaz (Baryton) ou même un cycle combiné (vapeur-gaz). Elle a une capacité de production entre 10 et 200 MWe.



Figure II.13: Centrale à tour.

II.4.4. Cuiseur solaire

Une plaque de carton recouverte d'une feuille d'aluminium et découpée de façon à former une coquille permet déjà d'obtenir l'échauffement d'une marmite (de préférence noire) placée dans un sac en plastique transparent limitant les pertes en chaleur et en vapeur d'eau.



Figure II.14 : Cuiseur solaire.

II.5. Principe de l'effet de serre [12]

Un matériau recevant le rayonnement de soleil, réémet des rayons infrarouges invisibles, calorifiques. L'effet de serre est obtenu en intercalant entre le soleil et l'absorbeur un matériau transparent aux rayons de soleil et arrêtant les rayons infra rouges réémis. Le verre et certains plastiques ont cette particularité, l'énergie ainsi réémise par le corps noir est absorbée par le verre, qui s'échauffe.

A l'équilibre le verre retransmet cette énergie pour moitié vers le corps noir, l'autre moitié vers la voûte céleste, pour récupérer à nouveau la moitié des émissions extérieures de la vitre, on peut réutiliser l'effet de serre en plaçant une seconde vitre.

II.5.1. Les mécanismes de l'effet de serre [12]

Le soleil réchauffe la terre de ses rayons, le globe terrestre reçoit un flux permanent d'énergie solaire et devrait donc voir sa température croître indéfiniment s'il n'existait pas un mécanisme compensateur. En vertu d'une loi bien établie de la physique, si la terre présente une température absolue non nulle, elle doit à son tour émettre de l'énergie sous forme de rayonnements ; c'est le principe du « corps noir » qui dit que tout corps porté à une température donnée, non nulle, rayonne une énergie proportionnelle à la quatrième puissance de cette température. Ainsi donc, la terre réchauffée par le soleil, dissipe-t-elle à son tour, par rayonnement, une énergie strictement égale à l'énergie reçue, ce qui conditionne la stabilité de sa température. Cet équilibre est décrit par une équation simple, qui s'écrit comme suit :

Energie reçue du soleil par la terre = Energie réémise par la terre

Il est possible de dresser un bilan assez précis des flux d'énergie qui aboutissent à cet équilibre. L'énergie du soleil est importée sous forme de lumière visible et d'infrarouge sous un flux de 1368 W/m^2 à l'entrée de l'atmosphère. Ce qui correspond à une énergie phénoménale. En effet, l'hémisphère éclairé de la terre reçoit un flux lumineux d'une puissance de $178\,1015 \text{ W}$. Une partie de ce rayonnement (lumière visible et IR) est réfléchi directement vers l'espace et constitue ce que l'on appelle « albédo » de la terre. Le solde du rayonnement, soit 69 %, est absorbé par l'atmosphère et par le sol, ce qui a pour conséquence

d'échauffer la terre et de maintenir sa température moyenne à 15 °C, température qui détermine, à la fois l'intensité de la réémission de rayonnement vers l'espace. Cet équilibre entre l'influx et l'efflux d'énergie garantit la stabilité de la température de la terre. Mais, avant d'être réémise vers l'espace, cette énergie lumineuse se sera transformée à raison de 67 % en chaleur et en lumière ; à raison de 33 %, elle aura dynamisé le cycle de l'eau sur terre ; une fraction de 0,33 % aura développée les courants aériens et marins et, enfin, 0,11 % de cette puissance aura alimenté en énergie la synthèse chlorophyllienne. Remarquons d'emblée la différence qualitative entre le rayonnement incident et le rayonnement réémis par la terre : les gaz atmosphériques sont relativement transparents à la lumière du soleil qui parvient presque intacte à la surface du globe, mise à part la fraction réfléchiée par les nuages et absorbée par les aérosols. En revanche, il en va tout autrement pour le rayonnement infrarouge lointain émis par la terre. Pour ce rayonnement, certains gaz présents en traces dans l'air constituent une barrière qui absorbe partiellement les infrarouges. L'atmosphère s'échauffe ainsi quelque peu pour se stabiliser à la température que nous lui connaissons, température supérieure de 33 degrés à celle qui règnerait sans la présence de ces gaz. Cet obstacle dressé par les gaz à l'état de traces devant les rayons IR a été comparé au vitrage d'une serre qui bloque la chaleur, retient les calories et permet d'atteindre, sous la verrière, des températures supérieures à celles qui règnent à l'extérieur. Les quinze degrés centigrades de température moyenne à la surface du globe sont donc le résultat de l'échauffement direct par le soleil et de l'échauffement par effet de serre naturel : sans cet effet, la vie sur terre serait impossible ou, à tout le moins, serait-elle limitée à une étroite bande de part et d'autre de l'équateur.

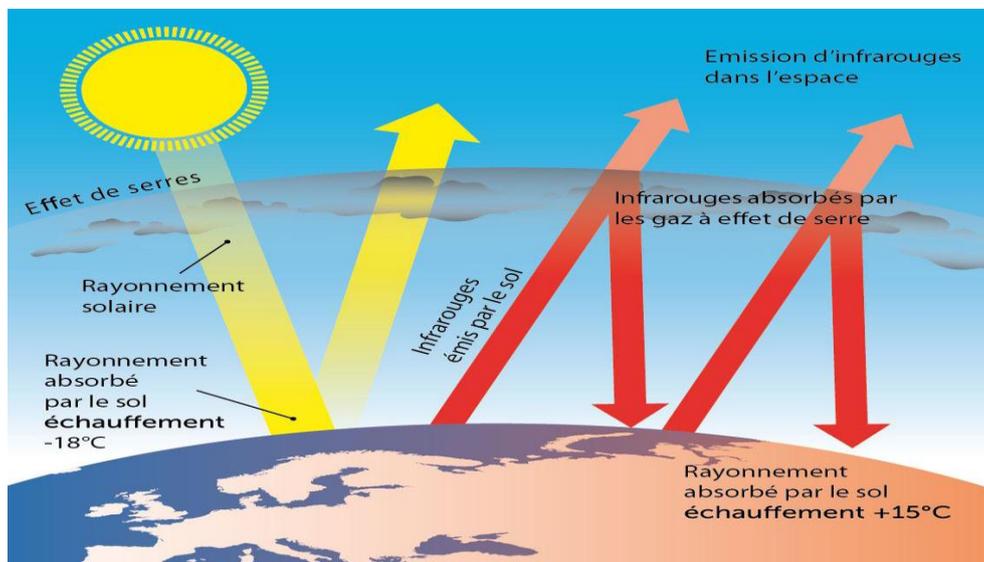


Figure. II.15 : Le mécanisme de l'effet de serre.

II.6.L'orientation du capteur [10]

Le capteur est orienté plein sud avec une inclinaison de 45° par rapport à l'horizontal. Ce positionnement permet une bonne réception des rayons du soleil et assure un rendement optimal. On trouve des capteurs fixes et des capteurs à poursuit.

II.6.1.Les 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.

II.6.2.Les capteurs a poursuit

L'installation de ces concentrateurs ne se fera pas d'une façon aléatoire. Pour mieux exploiter le rayonnement solaire le choix de l'orientation, l'inclinaison et l'équipement du système d'un mécanisme de poursuite demeure nécessaire.

II.6.2.1.Le choix de l'orientation

Le champ nord-sud collecte beaucoup plus d'énergie en été qu'en hiver, à l'opposé de l'orientation est-ouest qui collecte plus d'énergie en hiver que le nord-sud et moins en été.

L'orientation nord-sud horizontale collecte, légèrement plus d'énergie que l'orientation est-ouest horizontale. Aussi le choix de l'orientation dépendra de l'application et des besoins selon la période.

II.6.2.2.Effet de l'inclinaison d'une surface sur l'énergie incidente

Selon la méthode de calcul de Liu et Jordan, on remarque que l'énergie incidente est favorable pour tous les mois de l'année lorsque l'inclinaison égale la latitude du lieu, mais son exploitation sera meilleure avec un système de poursuite solaire.

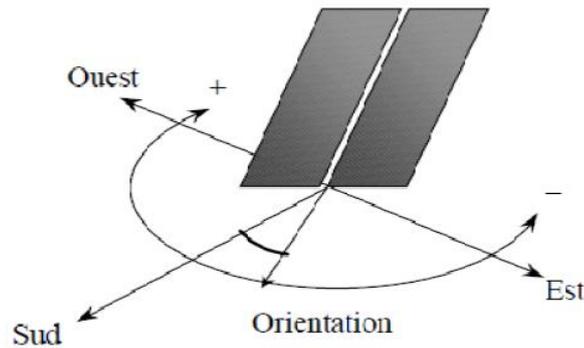


Figure II.16 : L'orientation et l'inclinaison.

II.7. Principe de captation du rayonnement solaire [11]

Le capteur plan est considéré comme un simple absorbeur des rayons solaires qui les transforment en chaleur, en absorbant les rayons solaires provenant de toutes les directions. Le rayonnement solaire est non seulement absorbé par le ciel mais aussi de tout l'environnement. Un capteur plan est relativement insensible aux conditions du ciel, dont la réalisation ne demande pas une conception compliquée. Cependant, la conception d'un collecteur avec effet de concentration, fait appel à des techniques plus au moins complexes dont le principe consiste à focaliser le rayonnement incident sur un absorbeur de surface réduite que la surface d'ouverture du collecteur, afin d'augmenter la concentration du rayonnement aux niveaux de l'absorbeur. Les capteurs plans utilisent le rayonnement diffus provenant du ciel et du sol, par contre les concentrateurs n'utilisent que le rayonnement direct.

La figure suivante montre le principe de captation par les deux types de conversion thermique de l'énergie solaire.

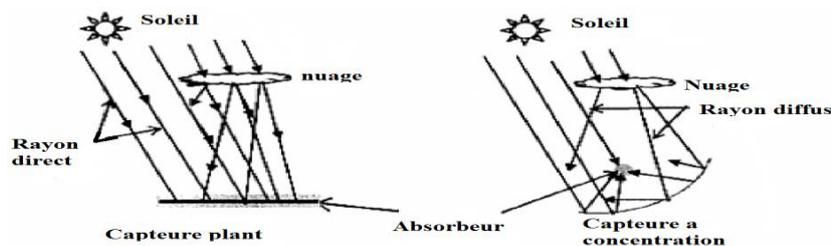


Figure II.17 : Schématisation de principe de captation du rayonnement solaire.

II.7.1. Inclinaison optimale d'un capteur solaire

Les capteurs solaires peuvent être installés au sol, contre le côté d'un édifice ou sur la toiture. Idéalement, ils devraient être orientés vers le sud, à l'écart des zones ombragées, et devraient présenter un angle d'inclinaison qui permet que la surface du capteur soit perpendiculaire aux rayons solaires et d'être exposés au maximum à la lumière solaire. Le

calcul de l'angle d'inclinaison se fait en soustrayant la déclinaison du soleil de la latitude géographique de l'emplacement du capteur. En général, il s'agit de la latitude de l'emplacement plus ou moins 10 à 15 degrés. En hiver (position hivernale), lorsque la trajectoire du soleil est basse dans le ciel, il faut employer un angle d'inclinaison plus élevé (à la latitude plus 10 à 15 degrés). Par contre, il est recommandé d'employer un angle d'inclinaison moins élevé (à la latitude moins 10 à 15 degrés) durant les mois d'été lorsque le soleil est plus haut dans le ciel (position estivale).

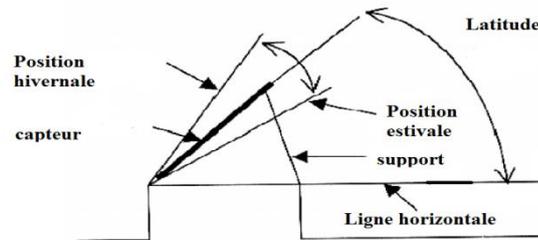


Figure. II.18 : Installation d'un capteur solaire.

II.8.Applications des capteurs solaires : [4] Parmi ces applications on trouve :

II.8.1.Chauffage des locaux

Le principe de fonctionnement est simple ; il consiste à faire circuler le fluide caloporteur (air) à l'aide d'un ventilateur pour le ramener au point de l'utilisation voulue (les pièces du local), comme le montre la figure ci-contre :

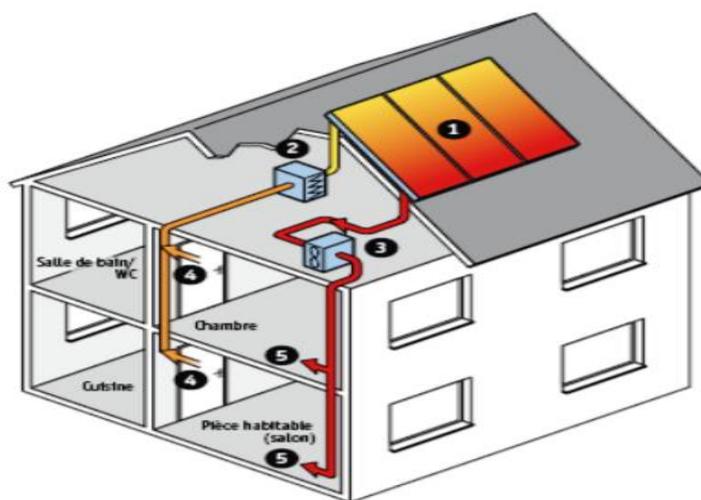


Figure II.19 : Local chauffé.

- 1- Capteur solaire plan à air
- 2- Filtre à air
- 3- Ventilateur
- 4- Entrée d'air
- 5- Sortie d'air

II.8.2.Le Séchage

Le collecteur convertit le rayonnement solaire en chaleur. L'air pénètre dans le collecteur, il est chauffé, sa température augmente. L'air chaud monte par convection jusqu'à la chambre de séchage, cet air est ensuite utilisé pour sécher les produits. La durée de séchage est très variable selon les conditions climatiques.

Le produit n'est pas exposé directement au soleil. Il présente l'avantage de mieux préserver les caractéristiques de l'aliment : sa couleur, son aspect, sa valeur nutritive.

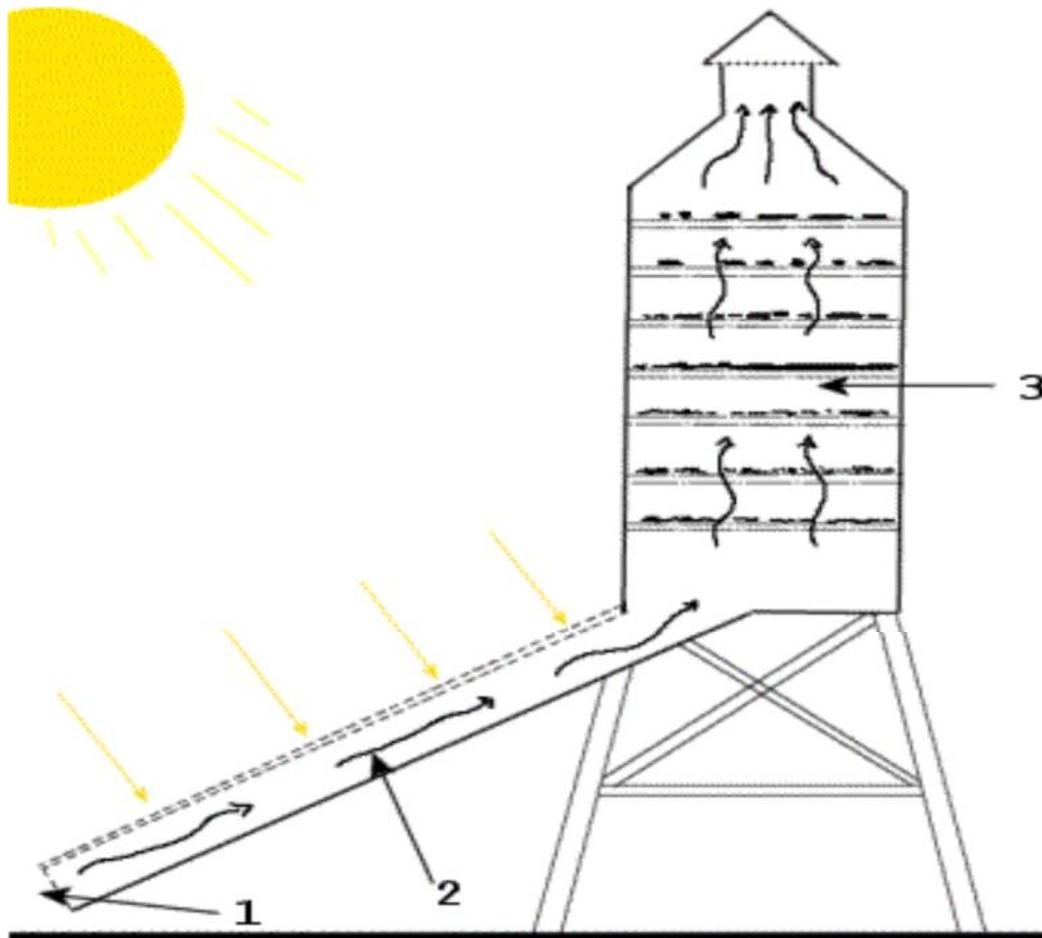


Figure. II.20 : Séchoir solaire.

- 1- Entrée d'air

- 2- L'air asséchant
- 3- Claie

II.8.3. Distillation solaire

Le principe de la distillation solaire repose sur l'effet de serre. Un rayonnement solaire chauffe la membrane noire du fond du bac. Celle-ci émet des infrarouges. L'augmentation de la température due à l'effet de serre fait réchauffer l'eau qui s'évapore. Cette capacité d'évaporation grandit au fur et à mesure que la température augmente jusqu'à ce que l'air atteigne sa saturation en vapeur d'eau. La vapeur d'eau que contient l'air chaud est refroidie par l'ambiance et se condense sur le vitrage. Il y a formation de gouttes d'eau qui s'écoulent à la partie inférieure du vitrage dans une gouttière. Il faut régulièrement nettoyer le bassin pour éliminer le sel.

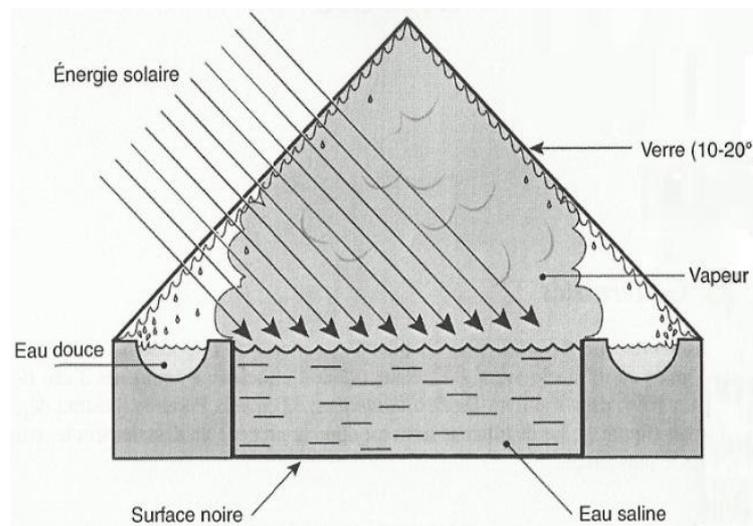


Figure. II.21 : Distillation solaire.

II.9. Installation des capteurs solaires

II.9.1 Au sol

Nécessite un emplacement disponible comme une terrasse ou une partie du jardin. L'inconvénient de cette installation c'est la distance entre les capteurs et le ballon qui multiplie les risques de déperdition de chaleur.



Figure. II.22 : Installation des capteurs solaires au sol

II.9.2. En façade

Peu esthétique, choix par défaut lorsque le toit ne peut accueillir les panneaux.



Figure. II.23 : Installation des capteurs solaires en façade.

II.9.3. Sur le toit : Solution plébiscitée car elle permet :

- ✚ d'installer des panneaux sur une grande superficie.
- ✚ de bénéficier de l'inclinaison « naturelle » du toit.
- ✚ de ne pas réduire l'espace habitable (du jardin ou de la terrasse par exemple).
- ✚ de rester discrète.

Les capteurs posés sur le toit peuvent être intégrés à la toiture ou superposés à la toiture. Des capteurs intégrés sont appréciables du point de vue esthétique mais coûtent un peu plus cher. Il faut également faire attention dans le cas de capteurs intégrés à la bonne étanchéité de l'installation, qui peut être une source importante de perte de chaleurs et rendre ainsi obsolète votre démarche pour économiser l'énergie.



Figure. II.24 : Installation des capteurs solaires sur le toit.

II.10. Association des capteurs solaires

Lorsque les capteurs sont montés en série, c'est la même eau qui traverse tous les capteurs les uns après les autres, et va s'échauffer de plus en plus dans chacun d'eux. Mais ce montage entraîne des pertes de charge plus importantes que dans le cas du montage en parallèle. Pour un circuit thermosiphon, le choix se portera sur le montage en parallèle. Dans les autres cas, le montage en série pourra être utilisé.

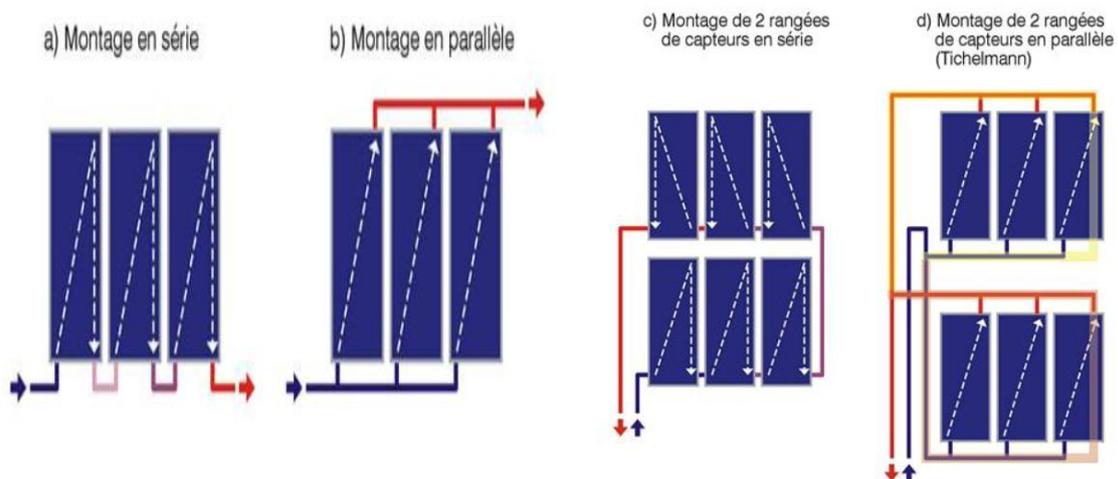


Figure. II.25 : les capteurs en série et les capteurs en parallèle.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a défini les différents capteurs solaires thermiques, ainsi que leurs principes de fonctionnement en déterminant leur élément de constructions, leur domaine d'applications et le procédé d'installations. On a vu aussi que malgré la différence de ces capteurs soit en structure ou bien en applications mais ils ont le même but de la conversion d'énergie solaire, et ils suivent aussi le même principe de la terre « effet de serre ».

CHAPITRE III

Etude théorique

Introduction

Ce chapitre sera consacré au calcul du bilan thermique des capteurs solaires et l'évolution de son rendement. Le bilan est établi par la quantité d'énergie reçue moins les différentes pertes dues au gradient de température existant entre le capteur et le milieu ambiant.

Transfert thermique

On appelle transfert thermique, les processus par lesquels l'énergie est échangée sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes T_1 et T_2 . La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs d'une maison, l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection et la terre reçoit sa chaleur du soleil en grande partie par rayonnement.

III.1. Les différents modes de transferts thermiques dans un capteur solaire [8]

Un capteur solaire met en jeu simultanément les trois modes de transfert thermique, la conduction, la convection et le rayonnement.

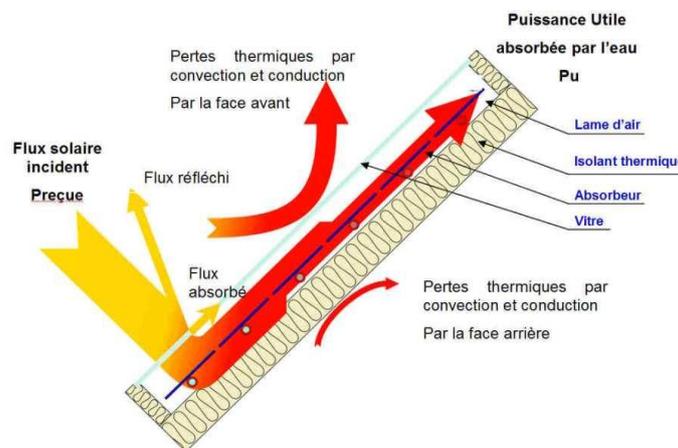


Figure III.1. Les différents échanges thermiques dans un capteur plan.

III.1.1. 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 suivante :

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot A \cdot \overrightarrow{\text{grad } T} \quad (\text{III.1})$$

$\vec{\phi}$: flux de chaleur.

λ : coefficient de conductivité thermique.

A : surface d'échange

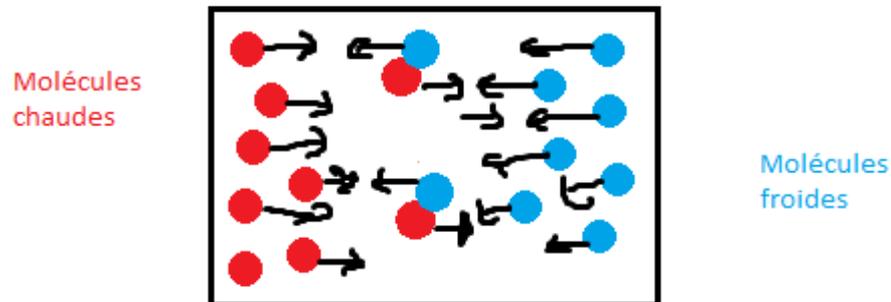


Figure III.2. La conduction.

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

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

III.1.2. La convection

Le transfert de chaleur par convection apparait lorsqu'il existe une différence de température entre un fluide et un solide. Le flux échangé est donné par la loi de NEWTON.

$$\phi = h \times S \times (T_p - T_f) \tag{III.2}$$

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.

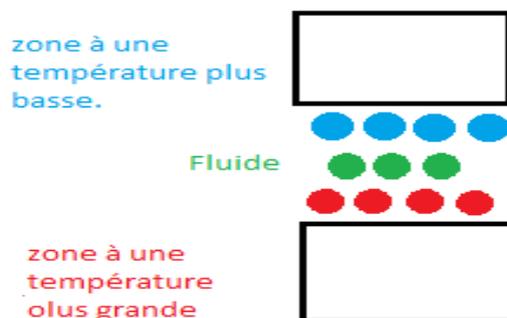


Figure III.3. La convection.

On distingue deux types de convection :

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

En convection naturelle, il apparait un autre groupement adimensionnel appelé le nombre de GROSOFF (Gr) [2].

Transfert thermique	Transfert de masse
$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times L^3}{\nu^2}$	$Gr_m = \frac{\alpha \times g \times \Delta \rho \times L^3}{\nu^2}$
$\beta = -\frac{1}{\rho} \times \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$	$\alpha = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial \rho_A} \right)_T$
Stanton : $St = \frac{h}{\rho \times c_p \times V}$	$St_m = \frac{g}{\rho \times V} = \frac{k}{V}$

Tableau III.1. Les nombres adimensionnels

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.1.3. Le rayonnement

Le rayonnement thermique est un transfert de chaleur par mode électromagnétique. Le flux est donné par la relation issue de la loi de Stefan BOLTEZMAN.

$$\phi = \epsilon \times \delta \times T^4 \tag{III.3}$$

ϕ : Densité de flux de chaleur émis par le corps.

ϵ : Émissivité thermique du matériau.

δ : Constante de Stefan-Boltzmann évaluée à $5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$.

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.

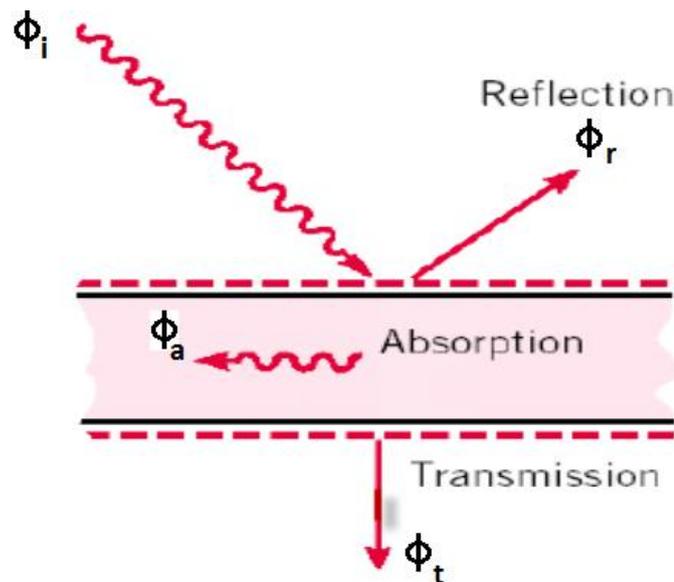


Figure III.4. Le rayonnement.

III.2. Les différents modes de transfert thermique dans un capteur cylindro-parabolique[15]

III.2.1. Entre l'absorbeur et le fluide caloporteur

Considérant la convection forcée du fluide caloporteur dans le tube absorbeur. Le nombre adimensionnel de Nusselt est calculé par l'équation de Dittus-Boelter pour l'écoulement totalement développé dans un tube circulaire lisse. Par conséquent, le nombre de Nusselt local est donné par :

$$Nu_1 = 0.023 Re_1^{4/5} \times Pr_1^4 \quad (\text{III.4})$$

Pr : est le nombre de Prandtl et Re est le nombre de Reynolds.

Le nombre de Reynolds Re_1 pour un flux dans un tube circulaire est donné par :

$$Re = \frac{4\rho_f}{\pi D_{abs} \mu_f} \quad (\text{III.5})$$

μ_f : Viscosité du fluide caloporteur.

Le nombre de Prandtl est donné par la relation suivante :

$$Pr = \frac{\mu_f c_f}{\lambda_f} \quad (\text{III.6})$$

Le coefficient d'échange convectif entre le fluide caloporteur et l'absorbeur Pr_1 est donné par l'équation suivante :

$$q_{gagnée} = h_1 \pi D L (T_{abs} - T_f) \quad (\text{III.7})$$

Les propriétés du fluide caloporteur λ_f , c_f , μ_f et ρ_f sont en fonction de la température T_{abs} .

III.2.2. Entre l'absorbeur et l'environnement du verre

Dans ce cas, nous avons deux modes de transfert de chaleur. La convection et le rayonnement entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre. $q_{int\acute{e}rieur}$ est calculée comme suit :

$$\Phi_{int\acute{e}rieur} = \Phi_{int\acute{e}rieur} \text{ convection} + \Phi_{int\acute{e}rieur} \text{ rayonnement}$$

La convection dans l'espace annulaire entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre est estimée par des relations de la convection naturelle entre deux cylindres horizontaux et concentriques, cependant l'enveloppe du verre est usuellement plus froid que le tube absorbeur ($T_{abs} > T_v$) :

$$\Phi_{interieur \text{ convection}} = \frac{2\pi K_{eff}}{\ln\left(\frac{D_{iv}}{D_{e \text{ abs}}}\right)} (T_{abs} - T_v) \tag{III.8}$$

$D_{e \text{ abs}}$: Diamètre extérieur du tube absorbeur.

D_{iv} : Diamètre intérieur de l'enveloppe du verre.

λ_{eff} : La conductivité thermique effectuée de l'air, elle représente la conductivité thermique que l'air stationnaire devrait avoir pour transférer la même quantité de chaleur que l'air mobile, elle est donnée par:

$$\frac{\lambda_{eff}}{\lambda_{air}} = 0.386 \left[\frac{Pr_{air}}{0.861 + Pr_{air}} \right]^{\frac{1}{4}} \tag{III.9}$$

Pr_{air} : Représente le nombre Prandtl de l'air dans l'espace annulaire entre l'absorbeur et l'enveloppe du verre.

λ_{air} : La conductivité thermique de l'air.

Le transfert thermique par rayonnement $\Phi_{int-Ray}$ entre deux cylindres concentriques et horizontaux entre le tube absorbeur et l'enveloppe du verre peut être exprimé par la relation suivante :

$$\Phi_{int\acute{e}rieure,rayonnement} = \frac{\tau\pi D_{abs}(T_{abs}^4 - T_v^4)}{\frac{1}{\epsilon_{abs}} + \frac{1 - \epsilon_g}{\epsilon_g} \left(\frac{D_{abs}}{D_{vi}}\right)} \tag{III.10}$$

ϵ_{abs} : L'émissivité de l'absorbeur et elle dépend de la température de l'absorbeur.

ϵ_g : L'émissivité de l'enveloppe du verre dans ce model ϵ_g prend la valeur 0 ; 9.

τ : La constante de Stefan Boltzmann.

III.2.3. Entre l'Enveloppe du Verre et l'Environnement

On suppose que le transfert thermique entre l'enveloppe du verre et l'environnement est dû à la convection et au rayonnement.

$$\Phi_{exterieur} = \Phi_{ext\acute{e}rieure,convection} + \Phi_{exterieur,rayonnement}$$

Le nombre de Nusselt dû à la convection est donné par la formule suivante :

$$Nu = 0.3 + \frac{0.62Re^{1/2}Pr^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0.4}{Pr}\right)^{2/3}\right]^{1/4}} + \left[1 + \left[\frac{Re}{282}\right]^{5/8}\right]^{4/5} \tag{III.11}$$

Pour l'enveloppe de verre, le nombre de Reynolds Re est défini par :

$$Re = \frac{\rho_{air,amb} \times V_{vent} \times D_{ve}}{\mu_{air,amb}} \tag{III.12}$$

V_{vent} : Vitesse du vent.

$\rho_{air\ amb}$ et $\mu_{air\ amb}$: Sont respectivement la densité et la viscosité de l'air.

D_{ve} : Diamètre extérieur de l'enveloppe du verre.

Le nombre de Prandtl Pr est toute les propriétés de l'air sont fonction de la température moyenne de l'air.

$$T_{amb} = 0,5 (T_{abs} + T_{amb}) \quad (III.13)$$

La densité de l'air dans ce cas est une fonction de la pression atmosphérique. Le transfert thermique à l'environnement dû à la convection est :

$$\Phi_{ext,conv} = h \times \pi \times D_{ve} L (T_v - T_{amb}) \quad (III.14)$$

Avec :

$$h = \frac{N_u \times K_{air,amb}}{D_{ve}}$$

Le transfert thermique à l'environnement dû au rayonnement peut s'exprimer par :

$$\Phi_{ext,ray} = \varepsilon \times \pi \times D_{ve} (T_{abs}^4 - T_{amb}^4) \quad (III.15)$$

III.3. Bilan énergétique

III.3.1. Facteurs Optiques [15]

Le facteur d'interception γ est le facteur optique le plus compliqué dans le calcul de la performance optique. Il représente le rapport entre l'énergie interceptée par l'absorbeur et celle réfléchiée par les surfaces réfléchissantes. Il traduit le fait que certains rayons solaire peuvent être renvoyés vers l'extérieur ou bien passer à côté de l'absorbeur lorsque les surfaces optiques présentent des défauts ou des irrégularités et lorsque l'absorbeur est mal positionné dans le plan focal. Si on utilise les paramètres d'erreurs universelles appliquées pour toutes les géométries du collecteur, le collecteur d'interception γ est donné par l'équation générale suivante:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1 + \cos \varphi}{2 \cos \varphi} \int_0^\varphi \operatorname{erf} \left[\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_1) (1 - 2d'x \sin \varphi_1) - \pi \beta' (1 + \cos \varphi_1)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right] \\ &- \operatorname{erf} \left[\frac{\sin \varphi (1 + \cos \varphi_i) (1 - 2d'x \sin \varphi_i) + \pi \beta' (1 + \cos \varphi_i)}{\sqrt{2\pi\sigma'(1 + \cos \varphi)}} \right] \frac{d\varphi_1}{(1 + \cos \varphi_1)} \end{aligned} \quad (III.16)$$

La fonction d'erreur erf est définie comme suit :

$$\operatorname{erf}(y) = \frac{2}{\pi} \int_0^y e^{-z^2} dz \quad (III.17)$$

φ : L'angle d'ouverture

III.4. Bilan thermique[11]

En pratique, Le flux solaire ainsi que toutes les variables climatiques sont en évolution permanente, aussi l'étude sera menée en régime transitoire. Avant de dresser le bilan

thermique au niveau de tous les composants du concentrateur cylindro-parabolique nous rappellerons que l'inertie thermique est le stockage d'énergie dans un volume. Elle correspond à l'augmentation de son énergie interne et a pour expression :

$$m_i \times C_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} \tag{III.18}$$

Cette énergie stockée est donnée par la relation :

$$m_i \times C_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} = \sum q_i + p_i \tag{III.19}$$

Avec q_i et p_i respectivement les différents échanges thermiques et le terme de source.

Le bilan thermique d'un collecteur a généralement pour expression :

$$q^* = q_u + q_a + q_t \tag{III.20}$$

Où :

q^* : Energie absorbée par le capteur.

q_u : Puissance utile qui permet de réchauffer le fluide caloporteur.

q_a : énergie perdue vers l'environnement.

q_t : énergie qui dépend de l'inertie thermique de l'installation

- En régime permanent

$$q_t = 0$$

- En régime transitoire

$$q_t = \sum m_i \times C_{p_i} \times \frac{dT_i}{dt} \dots\dots\dots \tag{III.21}$$

Avec :

q_t : Puissance provenant du réchauffement du capteur.

Toutes les solutions obtenues en transfert thermique peuvent être exploitées en transfert de masse [2]

Transfert thermique	Transfert de masse
Nusselt : $Nu = \frac{h \times L}{\lambda}$	Sherwood : $Sh = \frac{g \times L}{\rho \times D}$
Prandtl : $Pr = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu \times C_p}{\lambda}$	Schmidt : $Sc = \frac{\nu}{D}$
Peclet : $Pe = \frac{V \times L}{a}$	Peclet massique : $Pe_m = \frac{V \times L}{D}$
Reynolds : $Re = \frac{V \times L}{\nu}$	Reynolds : $Re = \frac{V \times L}{\nu}$

Tableau III.2. Les nombres a dimensionnelle.

III.4.1. Bilan thermique (vitre paroi extérieure)

La paroi extérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi intérieure par conduction
- L'environnement par convection

- Le ciel par rayonnement

Ces échanges ont pour expression :

$$M_v \times c_{p_v} \times \frac{dT_{ve}}{(2 \times dt)} = q_{cond.v} - q_{conv.v} - q_{ray.v-c} + \frac{P_v}{2} \quad (III.22)$$

III.4.2. Bilan thermique (vitre paroi intérieure)

La paroi intérieure de la vitre échange de la chaleur avec :

- La paroi extérieure par conduction
- L'absorbeur par convection et rayonnement

Ces échanges sont exprimés par :

$$M_v \times C_{p_v} \times \frac{dT_{vi}}{(2 \times dt)} = -q_{cond.v} + q_{conv.v-ab} + q_{ray.v-ab} + \frac{P_v}{2} \quad (III.23)$$

III.4.3. Bilan thermique (tube absorbeur)

L'absorbeur échange de la chaleur avec :

- La vitre paroi intérieure par convection et par rayonnement
- Le fluide caloporteur par convection

Ces échanges sont donnés par la relation :

$$M_{ab} \times C_{p_{ab}} \times \frac{dT_{ab}}{dt} = -q_{conv.ab-v} - q_{conv-ab-f} - q_{ray.ab-v} + P_{ab} \quad (III.24)$$

III.4.4. Bilan thermique (fluide caloporteur)

Le fluide caloporteur échange de la chaleur avec l'absorbeur par convection [19] :

$$m_f \times C_{p_f} \times (T_{fs} - T_{fe}) = q_{convab-f} \quad (III.25)$$

III.5. Les pertes thermiques[15]

Une fois que les rayons solaires ont fait leurs chemins vers le récepteur au-dessus de la température ambiante, ce qui produit un processus des pertes de chaleurs à partir du récepteur. Ces modes des pertes sont la convection, le rayonnement et la conduction, qui sont dépendants de la différence dans la température entre le récepteur et l'environnement et de la géométrie du récepteur et celle du concentrateur. La formule est donnée sous la forme suivante :

$$Q_{pert} = Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{ray} \quad (III.26)$$

III.5.1. Les Pertes Par Conduction

Les pertes par conduction sont habituellement petites comparées à celles par convection et par rayonnement. Elles sont souvent combinées avec le terme de perte de convection dans la plupart des analyses.

$$Q_{cond} = \lambda_{abs} A_{abs} (T_{abs} - T_{amb}) / \Delta Z \quad (III.27)$$

Avec :

Q_{cond} : Pertes par conduction.

λ_{abs} : Conductivité thermique de l'absorbeur.

T_{abs} : Température de l'absorbeur.

T_{amb} : Température ambiante.

III.5.2 Pertes par Convection

La mauvaise connaissance du phénomène de la convection est encore posée pour une plaque plane. Elle est dépendante de la vitesse du vent et sa direction par rapport au site. Ces pertes sont proportionnelles à la surface de l'absorbeur et la différence entre la température de surface captatrice et la température ambiante donnée par la formule suivante :

$$Q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}} A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) \quad (\text{III.28})$$

Q_{conv} : Pertes par Convection.

h_{conv} : Coefficient du transfert par convection.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection est donné par la formule suivante :

$$h_{\text{conv}} = \frac{\text{Nu} \lambda_{\text{air}}}{d} \quad (\text{III.29})$$

Avec :

d : Diamètre du récepteur.

λ_{air} : Conductivité thermique de l'air.

Le nombre de Nusselt Nu est donné par :

$$\text{Nu} = 0,664(\text{Re})^{1/2}(\text{Pr})^{1/3} \quad (\text{III.30})$$

Le calcul du nombre de Reynolds Re par la formule :

$$\text{Re} = \frac{v d}{\nu_{\text{air}}} \quad (\text{III.31})$$

III.5.3. Pertes par rayonnement

La perte de chaleur par rayonnement est importante pour des récepteurs fonctionnant seulement aux températures légèrement au-dessus de la température ambiante, et devient dominante pour des collecteurs fonctionnant à températures élevées. Le taux de perte de chaleur de rayonnement est proportionnel à l'émissance de la surface et à la différence dans la température à la puissance quatre. L'équation décrite sous la forme suivante :

$$Q_{\text{ray}} = \varepsilon_{\text{abs}} \sigma A_{\text{abs}} (T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (\text{III.32})$$

Avec :

Q_{ray} : Les pertes par rayonnement.

ε_{abs} : Facteur émissivité de l'absorbeur.

σ : Constante Stefan-Boltzmann.

A_{abs} : La surface d'absorbeur.

T_{ciel} : Température du ciel.

La température équivalente du rayonnement du ciel dépend de la densité de l'air et de son contenu d'humidité, quand l'humidité relative est haute où qu'on soit au niveau de la mer, on peut supposer que la température du ciel est identique à la température de l'air ambiant. Cependant pour les basses humidités relatives ou aux altitudes élevées, la température du rayonnement du ciel peut être inférieure de 6°C que la température ambiante, donnée par la formule de Whillier [15]

$$T_{\text{ciel}} = T_{\text{amb}} - 6 \quad (\text{III.33})$$

Et par la formule de Swinbank:

$$T_{\text{ciel}} = 0,0552 T_{\text{amb}}^{1,5} \quad (\text{III.34})$$

On obtient la forme suivante :

$$Q_{\text{ray}} = A_{\text{abs}} h_{\text{ray}} (T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}) \quad (\text{III.35})$$

$$h_{\text{ray}} = \varepsilon_{\text{abs}} \sigma \frac{T_{\text{abs}}^4 - T_{\text{ciel}}^4}{T_{\text{abs}} - T_{\text{amb}}} \quad (\text{III.36})$$

III.6. Calcul des puissances [11]

III.6.1. Puissance reçue à l'ouverture du collecteur

Les rayons incidents sur l'ouverture sont reflétés vers le foyer. En réalité une partie du collecteur reste inactive résultant des effets d'extrémités et/ou du fait de l'ombre.

La puissance reçue à l'ouverture du collecteur est donnée par :

$$p_e = S^* \times A_e \quad (\text{III.36})$$

A_e : étant la surface active donnée par :

$$A_e = A_c - (A_i + A_b)$$

Où :

$$A_c = D \times L$$

Avec A_i : Surface inactive des extrémités du collecteur.

$$A_i = 4 \times f \times D \times \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{3}\right)$$

A_b : surface soumise à l'ombre.

$$A_b = 2 \times f \times D \times \operatorname{tg}\left(\frac{\theta}{3}\right)$$

D : l'ouverture du collecteur

S^* : Composante normale directe du rayonnement solaire.

$$S^* = S \times \operatorname{Cos}(\theta)$$

III.6.2 Puissance absorbée par la vitre

La puissance reçue au niveau de l'ouverture du collecteur est exprimée par :

$$P_v = \alpha_v \times \rho_c \times p_c \quad (\text{III.37})$$

Où :

α_v : Coefficient d'absorption de la vitre.

ρ_c : Coefficient de réflexion du collecteur.

III.6.3. Puissance absorbée par le récepteur

La puissance reçue à l'ouverture du récepteur est réduite par les pertes thermiques. La puissance totale nette absorbée est donnée par :

$$P_{ab} = \alpha_{ab} \times \rho_c \times \tau_v \times P_c \times A_a \quad (\text{III.38})$$

Où :

α_{ab} : Coefficient d'absorption du récepteur.

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre.

A_a : L'air du récepteur.

III.6.4. La puissance utile

C'est la quantité de chaleur gagnée par le fluide caloporteur. En général elle est exprimée par la formule suivante :

$$q_u = \dot{m}_f \times C_{p_f} \times (T_{fs} - T_{fe}) \quad (\text{III.39})$$

Où :

\dot{m}_f : Débit du fluide caloporteur.

C_{p_f} : Chaleur spécifique du fluide caloporteur.

T_{fs} : Température de sortie du fluide caloporteur.

T_{fe} : Température d'entrée du fluide caloporteur.

III.7. Le rendement de capteur solaire

III.7.1. Le rendement optique[11]

Le rendement optique est défini comme le ratio de l'énergie absorbée par le récepteur à l'énergie incidente sur la surface d'ouverture du collecteur. Il dépend des propriétés optiques des matériaux, de la géométrie du collecteur, et peut s'écrire :

$$\dot{m}_0 = \alpha_{ab} \times \rho_c \times \tau_v \times \gamma \times [(1 - A_f \times \tan(\theta)) \times \cos(\theta)]$$

Où :

A_f : Coefficient géométrique.

$$A_f = \left(\frac{2}{3}\right) \times D \times h_p + f \times D \times \left[\left(\frac{1+D_2}{(48 \times f_2)}\right)\right] \quad (\text{III.40})$$

Ce terme est en fonction des propriétés optiques des composants du système. En général le rendement optique prend la forme suivante :

$$\dot{m}_0 = \alpha_{ab} \times \rho_c \times \tau_v \quad (\text{III.41})$$

III.7.2. Le rendement thermique[11]

C'est le rapport entre l'énergie thermique gagnée par le fluide caloporteur et l'énergie solaire reçue par le capteur. Le rendement varie en fonction de la température de fonctionnement, il diminue au fur et à mesure que cette température augmente. Les pertes thermiques sont d'autant plus importantes que la température est élevée.

Le rendement thermique est donné par la relation :

$$\eta = \frac{q_u}{(S^* \times A_c) \times \gamma} \quad (\text{III.42})$$

Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a vu les différents modes de transferts thermiques dans les capteurs solaires plans, et on a présenté le bilan thermique ainsi que la performance et le rendement comme on a étudié les estimations des puissances, ce qui permet de faire des approximations des flux absorbés et les pertes de chaleur.

Introduction

Dans ce chapitre nous allons faire une étude expérimentale sur notre capteur solaire cylindro-parabolique où nous entamerons deux essais, un essai avec un capteur sans vitrage et l'autre avec vitrage. Le réflecteur du capteur est dimensionné de façon à concentrer les rayons solaires vers sa ligne focale où l'absorbeur est placé, le réflecteur étant en acier inoxydable. Les erreurs du dimensionnement se traduisent par la diminution du rendement de ce dernier, de plus le matériau utilisé doit avoir un bon coefficient de réflectivité pour les rayonnements solaires.

Description du capteur solaire cylindro-parabolique

Le capteur a été réalisé au niveau du département de génie mécanique à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Caractéristiques du site de Tizi-Ouzou :

Latitude : 36.71°

Longitude: 4.05°

Altitude : 229 m

- ✚ Le capteur réalisé est un capteur solaire thermique cylindro-parabolique à circulation de liquide dans une tuyauterie en cuivre sous forme de serpent.
- ✚ Le liquide utilisé pour notre expérience est de l'eau naturelle puisée du robinet.
- ✚ Le capteur doit être incliné dans un angle variable de 0° à 45°.
- ✚ Le stockage se fait par l'intermédiaire d'un matériau dit à changement de phase (MCP).

IV.1. Les matériaux à changement de phase (MCP)

C'est les matériaux qui sont capable de changer d'état physique dans une plage de température. Ces MCP ont pour particularité de pouvoir stocker de l'énergie sous forme de chaleur latente, cette chaleur est absorbée lors de passage de l'état solide à l'état liquide et peut être perdue lors de passage de l'état liquide à l'état solide.

L'objectif de ce travail est l'étude comparative entre ces deux capteurs (avec vitrage et sans vitrage).



Paraffine



poudre de granite



le graphite

Figure IV.1 : les matériaux utilisés pour la préparation du composite.

a- La paraffine (MCP)

Le premier critère de choix à retenir pour un MCP concerne la température de transition solide-liquide puisqu'elle doit être conforme au procédé. Parmi tous les produits ayant une température de fusion acceptable, il est plus judicieux de choisir celui qui présentera la plus grande chaleur latente. La paraffine disponible sur le marché national et celle qu'on a utilisée qui est destinée à la fabrication de bougies, comportant des additifs chimiques convenables (présence entre autres de +20% de stéarine).

b- Poudre de granite

La poudre de granite est récupérée d'un atelier de construction, elle est disponible au marché national pour ses différentes utilisations comme le domaine de peinture et design, le granite est le résultat du refroidissement lent, en profondeur, de grandes masses de magma intrusif qui formeront le plus souvent des plutons, ces derniers affleurant finalement par le jeu de l'érosion qui décape les roches sus-jacente. Le granite est une roche acide (riche en silice) et dense (densité moyenne : 2,7), sa composition chimique moyenne est : 75,5 de SiO₂, 14% de Al₂O₃, 9,5% de (Na₂O, K₂O), 2% d'oxydes (Fe, Mn, Mg, Ca).



Figure IV.2 : poudre de granite.

❖ Préparation de la poudre de granite

En 1^{er} lieu, la poudre est tamisée plusieurs fois avec un tamis de 0.315mm de diamètre jusqu'à l'obtention d'une poudre fine qui est par la suite séchée dans une étuve à 100°C pendant 24h.



Figure. IV.3 : Etuve.

c- Graphite

Le graphite naturel est un minéral de carbone (C) élémentaire, de structure cristalline hexagonale. Sa couleur varie du noir à gris-noir. C'est un minéral tendre, flexible, d'éclat métallique et d'aspect gras et luisant caractérisé par :

- une densité faible qui varie de 2,1 à 2,3;
- un point de fusion très élevée (3 500 °C).

Dans notre étude, le carbone synthétique qui a été utilisé, est de même composition que le graphite naturel. Il est obtenu par la graphitisation (cuisson entre 2 600° et 3 000 °C) d'un mélange de coke de pétrole et de brai (bitume) précuit. Il est plus pur (environ 99 % de carbone) que le graphite naturel et offre une meilleure conductivité électrique ainsi qu'une plus grande résistance chimique.

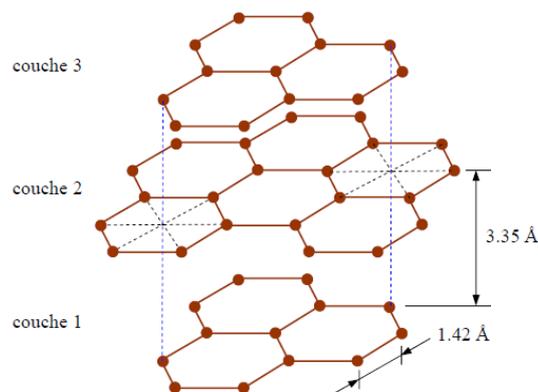


Figure IV.4 : Structure du graphite.

IV.2. préparation du composite

La préparation du MCP ce fait en plusieurs étapes :

- Pesées des différents MCP avec une balance électronique de précision. Pendant la préparation du composite la proportion en masse de paraffine a été réduite de 95% à 50% , afin d'éviter les pertes du MCP de lors de processus de chauffage.



Figure IV.5 : Pesée des différents éléments.

Numéro de l'échantillon	MCP paraffine (Pa) en %	Poudre de granite (PG) en%	Graphite (Gr) en %	Notation
1	80%	20%	/	80%Pa20%PG
2	80%	15%	5%	80%Pa15%Pr5%P
3	75%	25%	/	75%Pa25%Pr
4	75%	20%	5%	75%Pa20%PG5%G
5	70%	30%	/	70%Pa30%PG
6	70%	25%	5%	70%Pa25%PG5%G
7	65%	35%	/	65%Pa35%PG
8	65%	30%	5%	65%Pa30PG5%Gr
9	60%	40%	/	60%Pa40%PG

Tableau IV.1 Les proportions en masse des différents constituants.

- Rangement des éléments dans un récipient, placé dans un bain-marie à une température de 75°C, afin de faire fondre la paraffine. Après fusion les différents constituants sont bien mélangés pour assurer un mélange homogène.



Figure IV.6 : Emplacement du récipient dans le bain-marie.

- Ce mélange est ensuite versé dans un moule (pastilleuse) pour fabriquer des pastilles de $(40 \times 40 \times 4 \text{ mm}^3)$



Figure IV.7 : Fabrication des pastilles.

- Les pastilles obtenues sont soumises à une compression unidirectionnelle à 120 kN pendant une minute pour minimiser l'existence des bulles d'air qui peuvent se former lors de la cristallisation, et pour avoir une masse volumique plus élevée pour stocker plus d'énergie, ce qui nous donne des pastilles comprimées.





Figure IV.8 : La pastille après la compression.

- Après compression les pastilles sont mises dans l'étuve et soumises à une température de 65°C pendant trois heures pour voir le pourcentage le plus fiable qui retient bien la paraffine dans la structure (afin de ne pas s'écouler).

IV.3. Préparation des plaques pour mesurer la conductivité thermique

Un mélange de trois constituants du composite est préparé suivant les pourcentages : 55% paraffine, 30% poudre de granite, 15% de graphite.

Pour obtenir une plaque de dimension (300x300x9mm³), on suit les étapes suivantes :

- Les différents éléments utilisés sont placés dans un récipient après la pesée.
- Le mélange est par la suite placé dans un bain-marie réglé à 70°C.
- Le contenu du récipient est remué pour avoir un mélange homogène jusqu'à fusion totale de la paraffine.



Figure IV.9 : le mélange dans le bain marie.

- A la sortie du récipient du bain-marie, son contenu est rapidement versé dans le moule fabriqué à cet effet pour éviter la solidification du composite à l'intérieur du récipient.



Figure IV.10 : le moule fabriqué.

- Enfin, la partie supérieure du moule est placée sur sa partie femelle sur laquelle une force manuelle est exercée pour éviter la formation des bulles d'air entre le matériau et les parois du moule, et améliorer l'état de surface de la plaque.
- Afin de refroidir et permettre la cristallisation du composite, l'ensemble est placé à l'air libre.

Au démoulage, une plaque de dimensions ($300 \times 300 \times 9 \text{ mm}^3$) qui va nous servir à mesurer la conductivité thermique obtenue.



Figure IV.11 : La plaque de dimension ($300 \times 300 \times 9 \text{ mm}^3$).

IV.4. Le CT mètre

Le CT mètre est un appareil de contrôle thermique non destructif. Il a été élaboré dans le but d'évaluer avec précision, les paramètres thermiques d'un certain nombre de matériaux, et de contrôler la production des matériaux isotropes et homogènes par prélèvements.

Description de l'appareil

Une armoire à charnières en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble.

La section de base de l'armoire contient le débitmètre thermique et la plaque froide, installée

sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température constante de façon à ce que la plaque soit sensiblement iso-thermique.

Le débitmètre thermique donne une sortie en millivolt, proportionnellement à la différence de température sur les deux surfaces. Le couvercle de l'armoire abrite la plaque chaude chauffée électriquement. Elle est contrôlée d'une manière électronique à une température de consigne et l'entrée de la température par voyant rouge clignotant. La plaque est levée et abaissée par le mécanisme à poignée à vis situé en haut de l'armoire. Un indicateur à cadran dans la roue permet de déterminer le spécimen testé. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens de l'épaisseur jusqu'à 75mm. La plaque chaude est protégée par un interrupteur de haute température (70°C). Une isolation en mousse entoure l'ensemble de débitmètre thermique. Une isolation similaire se trouve sur le couvercle, ainsi qu'un espace d'air stagnant autour de l'ensemble de la plaque chaude, pour empêcher la perte de chaleur.



Figure IV.12 : Image globale de l'unité de mesure de la conductivité thermique.

Méthode d'essais

La taille des échantillons qui peuvent être utilisés avec la méthode de mesure de la conductivité pour un débitmètre thermique est de 300×300mm. Le spécimen testé doit avoir des dimensions minimum de 75 mm d'épaisseur.

La conductivité thermique est comprise entre 0,1 et 1,4 W/(m.K). En général, plus le matériau utilisé est isolant, plus le spécimen devrait être mince, sinon la durée du test sera longue.

Des feuilles de caoutchouc en silicone sont utilisées pour des résistances inconnues ou d'une faible résistance thermique et aussi pour éliminer l'espace d'air entre le spécimen, la plaque chaude et la plaque froide. Pour les spécimens granuleux, comme le sable et gravier une plinthe de bois est fournie pour y mettre le matériau. Il doit être placé dans la plinthe de 15 mm d'épaisseur pour lui donner une densité maximale, sinon le résultat ne sera pas précis à cause des espaces d'air entre les grains de sable.

Méthode de calcul

On dit que les conditions de régime permanent sont obtenues lorsque 5 lectures consécutives à cet intervalle donnent des valeurs de résistance thermique d'une stabilité de 1% sans changer à chaque fois dans le même sens. A chaque intervalle d'échantillonnage, on note les valeurs de T1 et T2 et de la sortie du débitmètre thermique. La température moyenne et la différence de température entre T1 et T2 sont calculées.

La conductivité thermique peut être déterminée par l'équation lambda suivante :

$$\lambda = \frac{I_s [(K_1 + (K_2 \times T)) + (K_3 + (K_4 \times T) \times HFM) + (K_5 + (K_6 \times T) \times HFM^2)]}{\Delta T}$$

Avec :

λ : conductivité thermique

I_s : épaisseur du spécimen en m

ΔT : différence de température (T1-T2) en °C

T : température moyenne en (T1+T2)/2 en °C

HFM : sortie du débitmètre (HeatFollowmeter Reading) en mV.

T1 : température de la plaque chaude.

T2 : température de la plaque froide.

Les constantes d'étalonnage avec ou sans silicone :

K1 = 88.1389

K2 = -2.7829

K3 = -21.3064

K4 = 0.8037

K5 = 0.7954

K6 = -0.0189

IV.5. Réalisation de l'échangeur

- **Réalisation du boîtier**

Deux plaques en bois de dimension 1,4m×65cm×2,5cm ont été utilisées pour la réalisation de boîtier, deux autres de 1,25m×65cm×2,5cm ont servies de cadres.

A partir de trois autres plaques de bois de 1,25m×65cm×2,5cm, on a coupé quatre formes cylindro-parabolique qui servent de support.



Figure IV.13: support cylindro-parabolique.



Figure IV.14: cadre de la structure de basse.



Figure IV.15 : les supports pour fixer les tubes au foyer.

- **Fabrication des structures cylindro-parabolique**

Dans cette étape, on a utilisé une tôle de fer d'une épaisseur de 3/10mm pour faciliter la flexion de la paroi. Cette tôle est coupée en quatre rectangles pour la placer sur les structures cylindro-parabolique.



Figure IV.16 : préparation de la tôle.



Figure IV.17 : montage de la tôle.

- **Préparation des canettes**

Les canettes doivent d'abord subir une modification de leur forme initiale où un des couvercles est totalement ouvert par un côté, et l'autre percé au milieu avec un diamètre de ($d = 12 \text{ mm}$) de l'autre côté pour éviter au maximum la fuite du MCP à l'état liquide tout autant laisser passer les tuyaux avec les ailettes soudées dessus.



Figure IV.18: Cannette avec et sans le couvercle (vue de dessus).



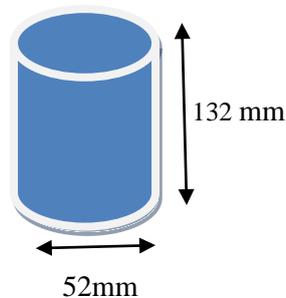
Figure IV.19 : Cannette avant et après perçage. (Vue de dessous).

Dans cette étape, quatre tubes sont formés par l'assemblage des cannettes.

❖ Les quantités du matériau utilisées

Les quantités de matériaux utilisées sont en fonction des dimensions de capteur et du nombre de cannettes qui constituent l'échangeur. Sachant que le volume d'une cannette est :

$$V = \pi \times r^2 \times L$$



V : volume de la cannette.
L : longueur de la cannette.
r : rayon de la cannette

Après calcul, on trouve

$$V_c = 2,8 \times 10^{-4}$$

Le nombre de cannettes à utiliser :

$N_c =$ la longueur des tubes \div par la longueur d'une seule cannette

$$N_c = (1200 \times 4) \div 132 = 36,36 \text{ cannettes}$$

$$N_c \approx 37 \text{ cannettes}$$

Donc

$$V_{T-c} = 1,02 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$$

Pour le volume des tubes cylindriques en cuivre, on utilise toujours la même équation mais pour un diamètre différent.

$$V_{\text{tube}} = 1,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3$$

Volume à remplir de composite :

$$V = V_{T-c} - V_{\text{tube}}$$

$$V = 0,01 \text{ m}^3$$

V_{T-c} = volume total des cannettes.

V_{tube} = volume total des tubes de cuivre.

Les matériaux qu'on a utilisés sont :

Paraffine $\rho_P = 900 \text{ kg/m}^3$

Graphite $\rho_G = 2160 \text{ kg/m}^3$

Poudre de granite $\rho_S = 2700 \text{ kg/m}^3$

Sachant que les pourcentages des matériaux sont comme suit :

55% Pr, 15% Gr, 30% PG.

La quantité théorique des matériaux utilisés est estimée à 16,29kg :

$$Pr = 0,55 \times 16,29 = 8,96 \text{ kg}$$

$$Gr = 0,15 \times 16,29 = 2,44 \text{ kg}$$

$$P\text{-Granite} = 0,30 \times 16,29 = 4,89 \text{ kg}$$

❖ La surface d'échange de la canette

La surface d'une canette (cylindrique) s'écrit :

$$S = 2\pi rL$$

Alors :

$$S_c = 2 \times 3,14 \times 2,6 \times 10^{-2} \times 13,2 \times 10^{-2}$$

$$S_c = 2,155 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

Donc la surface d'échange total des cannettes s'écrit

$$S = 2\pi rL \times \text{Nombres de cannettes}$$

$$S_{T-C} = 2,155 \times 10^{-2} \times 37$$

$$S_{T-C} = 0,7974 \text{ m}^2$$

Puisque on a une forme cylindro-parabolique au-dessus de tube donc on prend toute la surface comme une surface d'échange.

❖ Assemblage des cannetes

Une fois les cannetes sont prêtes, elles sont assemblées d'une manière à avoir quatre tubes symétriques, pour cela on a utilisé le mastic de silicone pour coller les cannetes l'une à l'autre pour éviter les fuites de l'MCP.



Figure IV.20 : collage des cannetes avec le mastic de silicone.

Une fois les tubes prêts, ils sont peints en noir pour améliorer l'absorption de rayonnement reçu.



Figure IV.21: peindre les cannetes en noir matte.

• Préparation des tubes centraux

On procure 4 tubes en cuivre de longueur $L=1,3\text{m}$ et de diamètre de $D = 12 \text{ mm}$, trois petits tubes de même diamètre et de longueur $L = 30 \text{ cm}$ qui alimentent entre les grand tubes à

l'aide des coudes en cuivre, pour former un serpentín qui passe par les quatre trous qui se trouvent sur les supports réalisés avant.

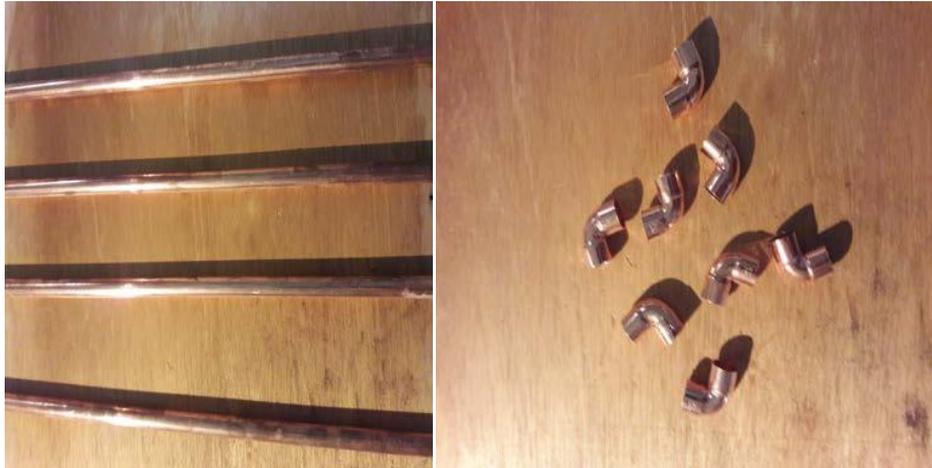


Figure IV.22: les tubes et les coudes en cuivre de diamètre $d=12\text{mm}$.

- **Préparation des ailettes de cuivre**

Pour avoir une meilleure diffusivité thermique et une plus grande surface d'échange, on soude des ailettes fabriquées à base des feuilles de cuivre, qui est un bon conducteur thermique, sur les tuyaux dans lesquels le fluide caloporteur circulera.



Figure IV.23: les ailettes à base des feuilles de cuivre.

- **Assemblage des tubes à ailettes avec les canettes**

Une fois les tubes en cuivre avec les ailettes sont prêts, ils sont disposés à l'intérieur des tubes fabriqués à base des canettes et assemblés avec des coudes pour former un serpentín.



Figure IV.24 : l'assemblage des deux tubes.

- **Remplissage des canettes**

Une fois l'assemblage des tubes fini, l'MCP est préparé avec le même pourcentage effectué lors de la préparation de la plaque (300×300×9mm), après la fusion du composite il est versé dans le tubes fabriqué à base des canettes après une bonne vérification de l'étanchéité des tubes pour ne pas avoir des fuites.

- **Assemblage général de capteur**

Après avoir fini avec la réalisation des différents éléments, nous sommes passés à l'assemblage.



Figure IV.25 : montage fini du capteur.

Nous avons effectué quelques modifications au niveau du capteur et ceci en vitrant une partie de ce dernier pour obtenir deux capteurs distincts, un avec vitrage et l'autre sans vitrage. Chacun est ensuite reliés à une pompe afin de comparer leur rendements.



Figure IV.26 : le capteur avec et sans vitrage.

Pour le test du capteur en circuit fermé nous avons ajouté un réservoir de stockage d'une capacité de 10litres.



Figure IV.27 : le réservoir de stockage.

- **La pompe**

Dans nos tests la circulation du fluide à l'intérieur du capteur doit être forcée à cause des pertes de charges dues au coude du circuit. Pour cela nous avons utilisé une pompe d'un débit maximal de 10L/min.



Figure IV.28 : la pompe.

- **Mesure du débit**

Pour mesurer le débit du fluide à la sortie du capteur nous avons suivi une méthode artisanale à l'aide d'un chronomètre.

La méthode est basée sur le calcul du temps nécessaire pour remplir un réservoir de 10 L.

IV.6. Mesure de la température des éléments de l'échangeur

Pour la mesure de température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur ainsi la température des plaques absorbantes, six thermocouples de type K sont utilisés à la disposition du capteur.

- ✓ Deux thermocouples à l'entrée et la sortie du capteur avec vitrage.
- ✓ Deux thermocouples à l'entrée et la sortie du capteur sans vitrage.
- ✓ Un thermocouple implanté sur la plaque absorbante avec vitrage.
- ✓ Un thermocouple implanté sur la plaque absorbante sans vitrage.

- **Les Thermocouples**

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouple sont généralement disponibles en fils.



Figure VI.29 : Thermocouple couple de type K.

Pour collecter les données fournies par les thermocouples, on a utilisé un instrument d'enregistrement de données basé sur PC. « Pico Technology Enregistreur de données, Température »

- **Pico Technology Enregistreur de données, Température USB TC-08**

Description de l'instrument

Cet enregistreur de données de température basé sur PC est facile à utiliser, et permet la collecte, l'analyse et l'affichage de 8 thermocouples maximum. L'enregistreur de données peut être utilisé avec tout un éventail de types de thermocouples, ce qui en fait un choix idéal pour la plupart des besoins. Il offre également une connectivité USB et des alarmes programmables nous permettant de fixer des limites pour chaque canal.



Figure IV.30: Pico Technology Enregistreur de données, Température.

Caractéristiques et avantages

Fonctionne avec les thermocouples de type B, E, J, K, N, R, S et T. Large plage de températures, avec résolution verticale 20 bits. Compensation de soudure froide intégrée. Aucune alimentation requise, puissance provenant du port USB. Affichage ou exportation des données au format graphique et numérique. Enregistrement et affichage des valeurs Min./Max./Moyenne ou filtrées. Limites d'alarme Max/Min réglables pour chaque canal.

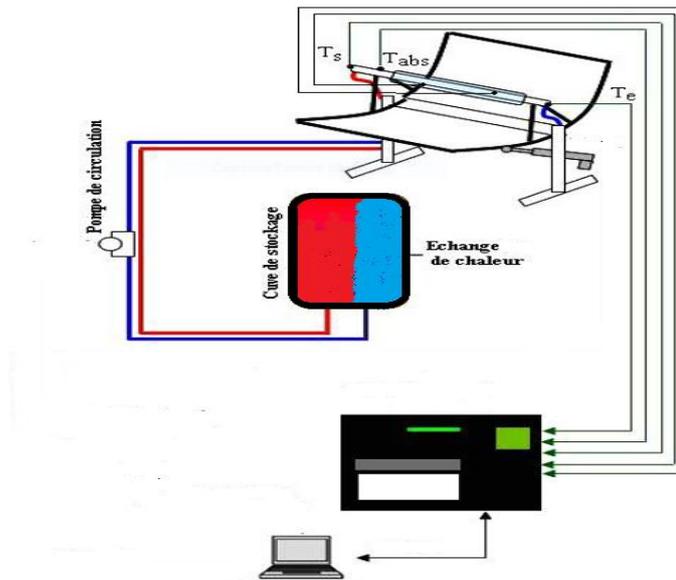


Figure IV.31 : schéma d'acquisition de données avec thermocouple.

❖ **Conditions à respecter avant d'entamer les tests**

Les étapes suivantes doivent être respectées avant de démarrer les tests du capteur

1. S'assurer qu'il n'existe aucune détérioration ou fuite au niveau du capteur.
2. La couverture du capteur (la vitre) doit être nettoyée.
3. Il faut s'assurer qu'il n'existe aucune forme de perturbation externe (source de chaleur supplémentaire, effet d'ombre par des arbres ou obstacle ...etc.)
4. Le capteur doit être orienté vers le sud pour capter le maximum d'énergie.
5. Le capteur doit être exposé aux conditions naturelles du ciel clair et température ambiante pour la détermination réelle des performances du capteur.

Conclusion

Dans ce quatrième chapitre, on a décrit les différents matériaux de base utilisés pour former le MCP de notre capteur, ainsi que les pièces de constructions de ce dernier qu'on a partagé en deux parties avec et sans vitrage, aussi on a représenté l'instrument de mesure de la température (le thermocouple) pour réaliser une étude comparative approfondie entre ces deux parties.

CHAPITRE V

Résultats et discussions

Introduction

Les résultats présentés dans ce chapitre sont relatifs aux caractéristiques du capteur cylindro-parabolique.

Plusieurs mesures ont été effectuées sur le système réalisé sur le site de Tizi-Ouzou. Parmi tous les tests réalisés, nous avons choisi les résultats pour certains jours.

Ces mesures ont été prises pour un pas de temps de 60 minutes, de 10h jusqu'à 15h de la journée.

V.1. Méthode de calcul

$$\dot{m} = \rho \cdot v \cdot s = \rho \cdot q_v$$

$$Cp_{eau} = 4180 \text{ kJ/kg}$$

$$q_v \text{ pompe avec vitrage} = 7,05 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$q_v \text{ pompe son vitrage} = 3,02 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = \dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta T$$

V.2. Résultats et Discussions

Les résultats sont présentés sous forme des tableaux pour chaque journée avec l'explication des paramètres prises en compte.

- **Test (1) le 15.10.2019** le Ciel est partiellement nuageux

$$V_{eau} = 10 \text{ l} = 0,01 \text{ m}^3$$

$$T_{amb} = 27 \text{ }^\circ\text{C}$$

Résultats obtenus :

Les résultats sont donnés par les graphes ci-dessous tracés à partir de logiciel Origin.

Temps	Avec vitrage			Sans vitrage		
	T_e (°C)	T_s (°C)	Q (W)	T_e (°C)	T_s (°C)	Q (W)
10h	26.5	29.7	943.008	26.5	27.5	126.236
11h	29.7	35.9	1825.078	27.5	35.6	1022.511
12h	35.9	40.8	1443.991	35.9	40	517.567
13h	40.8	42.7	559.911	40	42.1	265.95
14h	42.7	44.1	412.566	42.1	43.7	201.977
15h	44.1	45.3	353.62	43.7	44.8	138.859

Tableau V.1. Les températures obtenues au 1^{er} test.

Température avec vitrage

Le flux avec vitrage

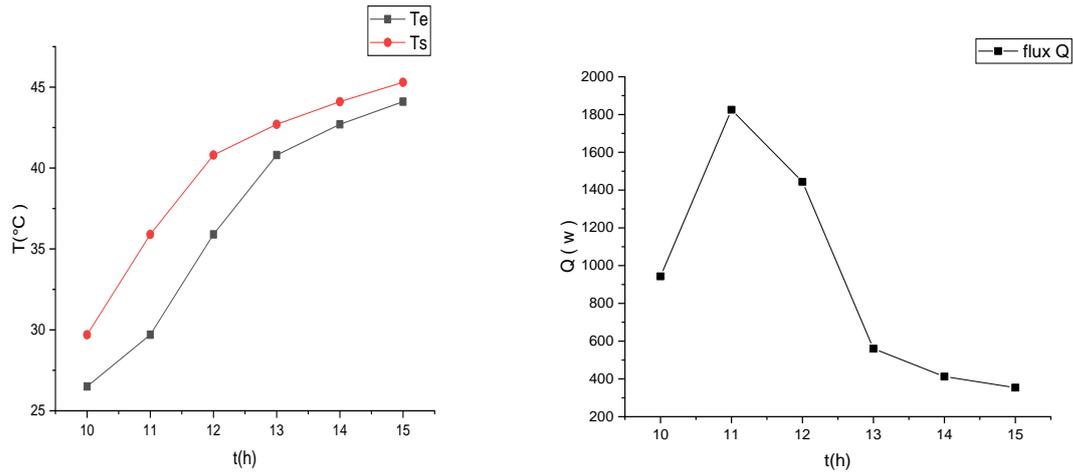


Figure V.1. Les températures et le flux de chaleur avec vitrage (1^{er} test).

Température sans vitrage

Le flux sans vitrage

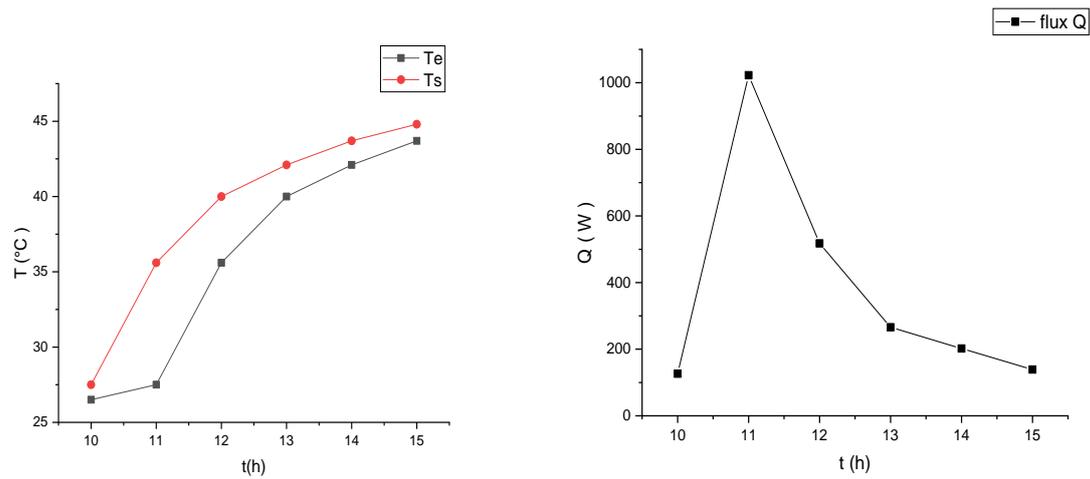


Figure V.2. Les températures et le flux de chaleur sans vitrage (1^{er} test).

Discussion

On constate que les températures augmentent au cours du temps dans les deux cas (avec vitrage et sans vitrage). Nous remarquons que les températures avec vitrage sont plus élevées par rapport à celles sans vitrage.

La différence de température dans chaque capteur nous a permis de calculer la valeur du flux de chaleur , une augmentation du flux a été remarquée au début, qui par la suite diminue en une heure de temps.

- Test (2) le 29.10.2019 : le ciel dégagée

$$V_{eau} = 10l = 0,01m^3$$

$$T_{amb} = 26,5^{\circ}C$$

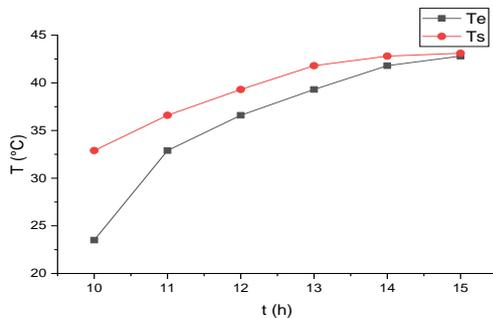
Résultats

On a choisit la journée type ciel dégagée. Le capteur est mis en marche à 10h jusqu'à 15h avec un pas de temps de 60 minutes.

Temps	Avec vitrage			Sans vitrage		
	T_e (°C)	T_s (°C)	Q(W)	T_e (°C)	T_s (°C)	Q(W)
10h	23.5	32.9	2770.08	23.5	30.6	896.27
11h	32.9	36.6	1090.353	30.6	33.4	353.46
12h	36.6	39.3	795.663	33.4	36.9	441.80
13h	39.3	41.8	736.725	36.9	39.7	353.44
14h	41.8	42.8	294.69	39.7	40.8	138.85
15h	42.8	43.1	88.40	40.8	41.5	88.36

Tableau V.2. Les températures obtenue au 2^{eme} test.

Température Avec vitrage



Flux avec vitrage

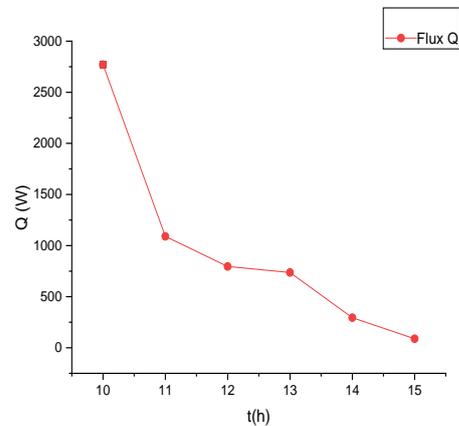
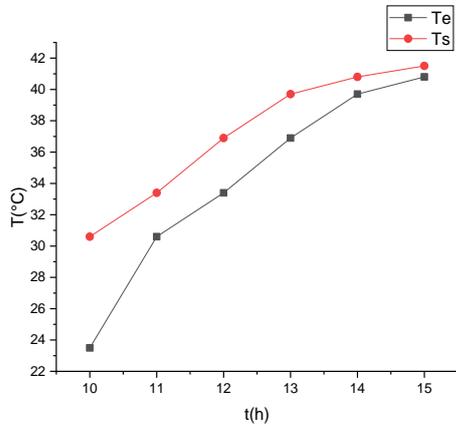


Figure V.3. Les températures et le flux de chaleur avec vitrage (2^{eme} test).

Température sans vitrage



Le flux sans vitrage

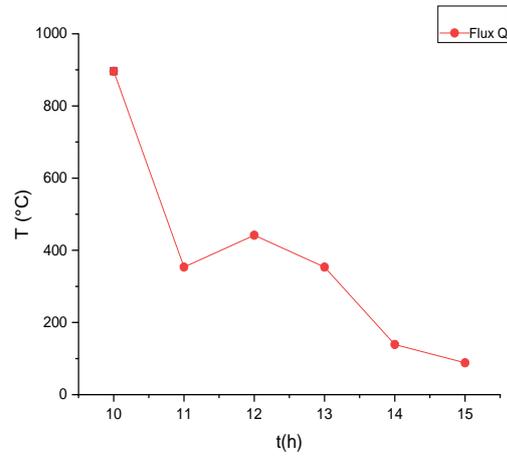


Figure V.4. Les températures et le flux de chaleur sans vitrage (2^{ème} test).

Discussion

On observe que les températures augmentent proportionnellement avec le temps.

Par contre on a aperçu la diminution du flux de chaleur.

- **Test (3) le 30.10.2019** le Ciel dégagé

$$V_{eau} = 10l = 0,01m^3$$

$$T_{amb} = 23,5°C$$

Résultats obtenus

Les résultats sont donnés par les graphes ci-dessous tracé à partir de logiciel Origin.

Temps	Avec vitrage			Sans vitrage		
	$T_e(°C)$	$T_s(°C)$	Q (W)	$T_e(°C)$	$T_s(°C)$	Q(W)
10h	22.3	33.1	3182.652	22.3	31.2	1123.500
11h	33.1	38.3	1532.388	31.2	34.1	366.084
12h	38.3	40.1	530.442	34.1	39.1	631.18
13h	40.1	41.1	294.69	39.1	39.6	63.118
14h	41.1	41.8	265.221	39.6	39.9	37.870
15h	41.8	42.1	88.407	39.9	40.1	25.247

Tableau V.3. Les températures obtenues au 3^{ème} test.

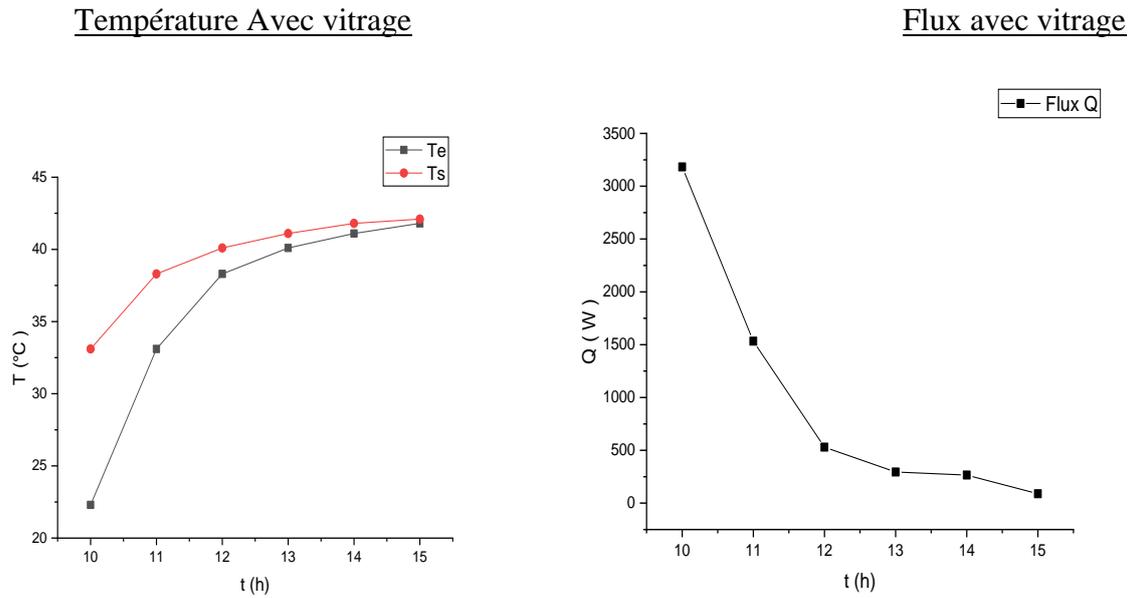


Figure V.5. Les températures et le flux de chaleur avec vitrage (3^{eme} test).

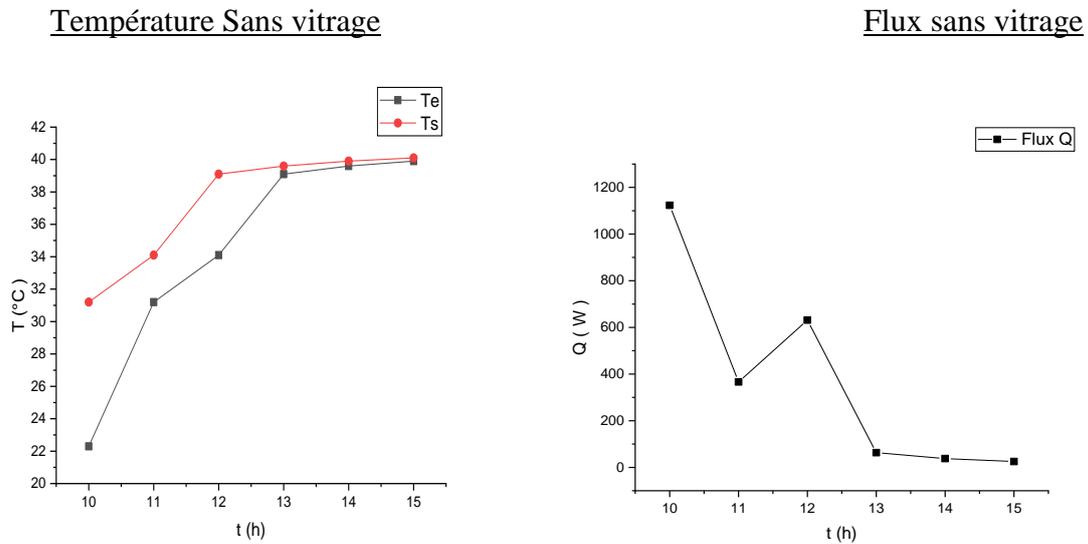


Figure V.6. Les températures et le flux de chaleur sans vitrage (3^{eme} test).

Discussion

Dans ce cas, on remarque que le flux de chaleur dans le capteur vitré diminue en exponentielle décroissante au cours du temps, tandis que sans vitrage un pic apparaît à 12h, et ceci est probablement dû à l'écart de température rapproché.

- Test (4) le 04.11.2019 le Ciel partiellement nuageux

$$V_{eau} = 10l = 0,01m^3$$

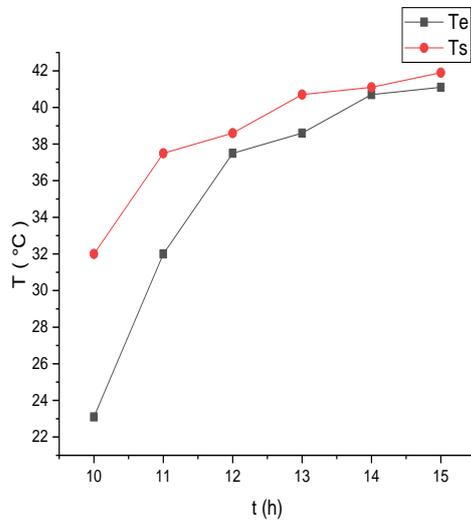
$$T_{amb} = 23,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Résultats obtenus

Temps	Avec vitrage			Sans vitrage		
	T_e (°C)	T_s (°C)	Q (W)	T_e (°C)	T_s (°C)	Q (W)
10h	23.1	32	2622.741	23.1	31.8	1098.253
11h	32	37.5	1620.795	31.8	36.5	593.392
12h	37.5	38.6	324.159	36.5	37.4	113.612
13h	38.6	40.7	618.849	37.4	39.7	290.342
14h	40.7	41.1	117.876	39.7	40.1	50.4944
15h	41.1	41.9	235.752	40.1	40.5	50.494

Tableau V.4. Les températures obtenues au 4^{eme} test.

Température avec vitrage



Flux avec vitrage

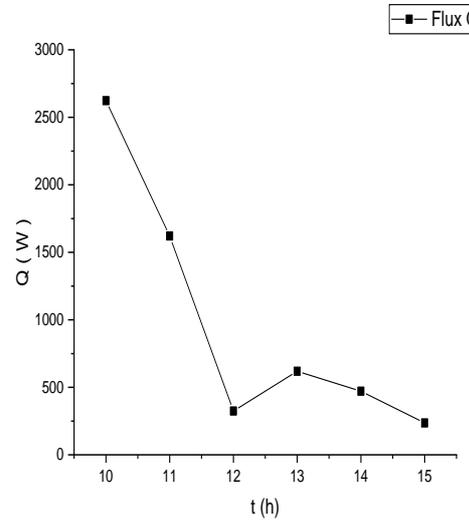
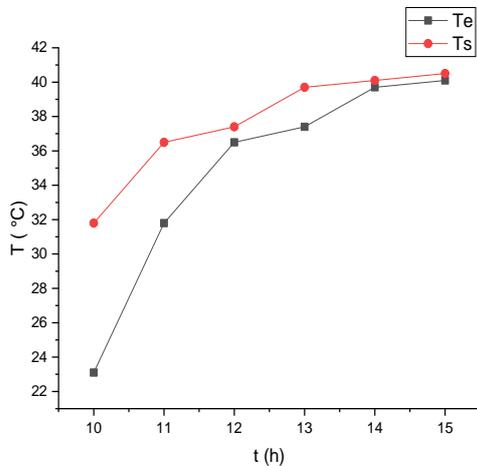


Figure V.7. Les températures et le flux de chaleur avec vitrage (4^{eme} test).

Température sans vitrage



Flux sans vitrage

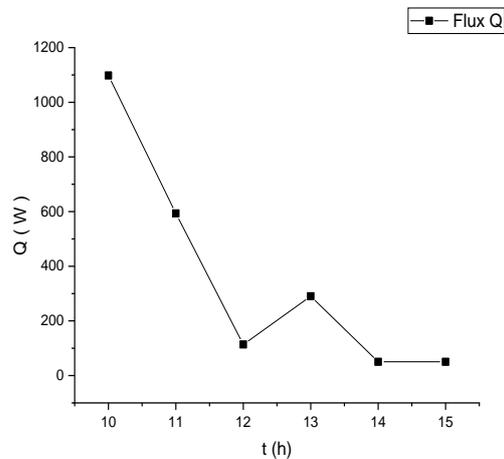


Figure V.8. Les températures et le flux de chaleur avec vitrage (4^{eme} test).

Discussion

On remarque une élévation de température dans les deux capteurs, mais dans le capteur vitré la température est plus importante, tandis que le flux de chaleur décroît dans les deux cas.

- **Test (5) le 31.10.2019** : le ciel est partiellement dégagé.

$$V_{eau} = 10l = 0,01m^3$$

$$T_{amb} = 27,3$$

Résultats obtenus

Les valeurs de ce tableau sont présentées a partir de logiciel PicoLog qui nous a permis de mesurer les températures de différents des éléments de ce capteur.

Temps (minute)	Avec vitrage			Sans vitrage		
	T _{abs} (°C)	T _e (°C)	T _s (°C)	T _{abs} (°C)	T _e (°C)	T _s (°C)
0	36.87	27.71	26.64	29.72	26.34	27.64
1	36.86	27.75	26.69	30.76	26.41	27.70
10	37.97	28.11	27.03	33.56	27.28	28.83
20	35.14	28.90	28.07	29.22	27.86	28.99
30	34.81	29.20	28.35	29.21	27.72	28.84
40	34.47	29.66	28.81	29.79	27.96	28.92
50	33.95	30.13	29.25	30.14	28.25	29.20
60	32.99	30.26	29.41	29.31	28.16	29.08

70	32.74	30.44	29.52	28.59	27.87	28.79
80	31.35	30.37	29.72	28.19	28.29	28.87
90	29.51	30.45	30.05	25.31	28.41	28.33
100	29.70	30.33	30.12	26.50	28.31	27.93
110	29.71	30.14	29.87	26.42	28.08	27.88
112	29.52	30.11	29.88	27.73	28.13	27.85
115	29.33	30.00	29.83	27.38	27.98	27.54

Tableau V.5. Les températures obtenues au 5^{ème} test.

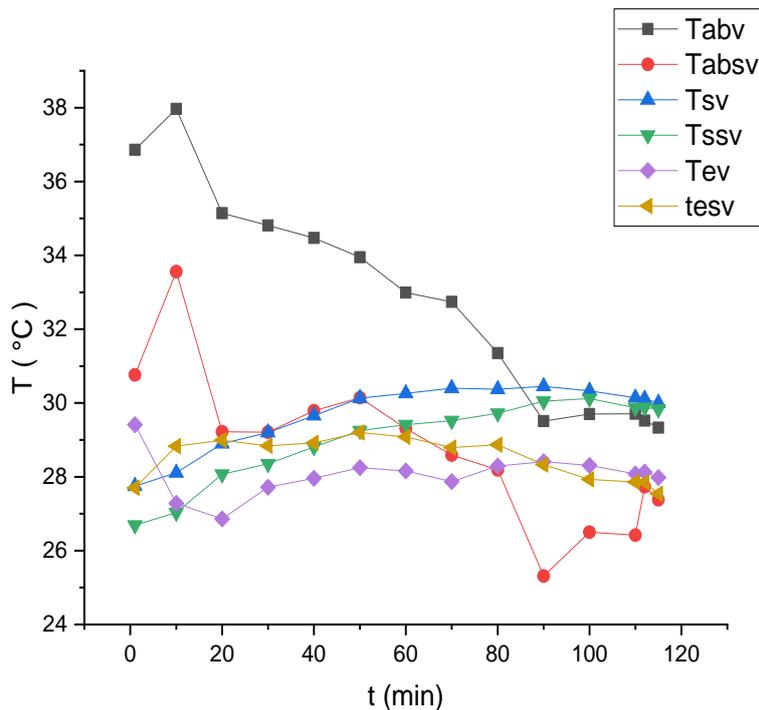


Figure V.9. Evolution des températures des composants du capteur.

Discussion

Les courbes de la figure V.9 présentent l'évolution des températures de chaque composant du capteur.

- **Absorbeur**

On remarque que la température de l'absorbeur augmente dans les deux cas, mais plus élevée dans le capteur avec vitrage ; ceci est dû au rayonnement solaire direct.

- **Température d'entrée**

La courbe tracée en violet représente la température d'entrée du capteur avec vitrage et celle en marron, la température d'entrée du capteur sans vitrage. On remarque que la température

d'entrée avec vitrage diminue au cours des 30 premières minutes puis se stabilise ; contrairement à la température d'entrée sans vitrage augmente puis se stabilise.

On explique cette remarque par le fait que le matériau à changement de phase dans le cas du sans vitrage a stocké une certaine chaleur. Et dans le cas avec vitrage, un stockage de chaleur à été aussi pris en considération ainsi que la couverture qui empêche le passage du rayonnement diffus.

- **La température de sortie**

On remarque dans la courbe précédente que la température de sortie avec vitrage est plus élevée que celle sans vitrage.

V.3.Calcul de rayonnement

Estimation des profils moyens journaliers.les résultats sont donnés dans le tableau ci-dessous pour le mois d'octobre.

L'inclinaison de capteur 45° , l'orientation vers le sud.

Temps(min)	Rayonnement global (W/m ²)
420	64,4
510	273,5
570	532,7
630	728,8
690	849,6
750	888,15
810	842,17
870	714,35
930	512,07
990	248,33
1050	50,94

Tableau V.6. Rayonnement global sur un plan fixe.

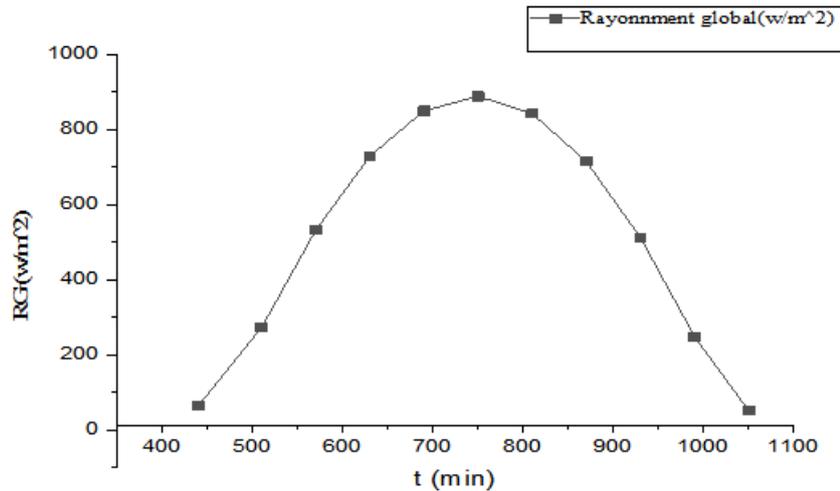


Figure V.10. Courbe de rayonnement global pour un ciel partiellement nuageux.

V.4. Rayonnement global par mètre carré de capteur

Sachant que l'expérience s'est déroulée entre 10h00 et 15h donc nous ne prendrons que les valeurs qui sont dans l'intervalle de ce temps.

$$E_{\text{ray}} = \Sigma(\text{intensités moyennes} \times 3600)$$

$$E_{\text{ray}} = (728.8+849.6+888.15+842.17+714.35) \times 3600$$

$$E_{\text{ray}} = 14483052 \text{ J/m}^2$$

V.5. Rayonnement reçu par la surface étudiée

- Surface des réflecteurs

$$S_{\text{cylind-parab}} = 2 \times \left[\frac{D}{2} \sqrt{\left[\frac{4P}{D} \right] + 1} + 2 \ln \left[\frac{4P}{D} + \sqrt{\left[\frac{4P}{D} \right]^2 + 1} \right] \right] \times 1200$$

$$S_{\text{cylind-parab}} = 2 \times 0.1707478011 \times 1200$$

$$S_{\text{cylind-parab}} = 409.79 \text{ mm}^2 = 0.41 \text{ m}^2$$

P : la profondeur de l'arc = 8.5 cm

D : le diamètre de l'arc = 29.5 cm

Nous avons deux capteurs solaires avec deux formes cylindro-parabolique (l'un avec vitrage et l'autre sans vitrage).

Pour le calcul de la surface de réflecteur on multiplie par deux la surface cylindro-parabolique ($S_{\text{cylind-parab}}$), et ce calcul est valable pour les deux formes.

$$S_{T \text{ cylind-parab}} = S_{\text{cylind-parab}} \times 2$$

$$S_{T \text{ cylind-parab}} = 409.79 \times 2$$

$$S_{T \text{ cylind-parab}} = 819.58 \text{ mm}^2 = 0.82 \text{ m}^2$$

▪ La surface des cannettes

La surface d'une cannette (cylindrique) s'écrit :

$$S = 2\pi rL$$

Avec

r : le rayon de la cannette qui est égale 2.6×10^{-2} m.

L : la longueur de la cannette qui est égale 13.2×10^{-2} m.

$$S_c = 2 \times 3.14 \times 2.6 \times 10^{-2} \times 13.2 \times 10^{-2}$$

$$S_c = 2.1552 \times 10^{-2} \text{ m}^2$$

On conclue que la surface d'échange total des cannettes s'écrit :

$$S_{Tc} = S_c \times \text{le nombre des cannettes}$$

$$S_{Tc} = 2.1552 \times 10^{-2} \times 37$$

$$S_{Tc} = 0.7974 \text{ m}^2$$

V.5.1. Rayonnement envoyé par les réflecteurs sur les cannettes

$$\text{Ray}_{\text{ref-soleil}} = \frac{E_{\text{Ray-soleil}} \times S_{\text{ref}}}{1 \text{ m}^2} \times \text{Cof}_{\text{reflexion}}$$

$$\text{Ray}_{\text{ref-soleil}} = \frac{14483052 \times 0.81958}{1} \times 0.9$$

$$\text{Ray}_{\text{ref-soleil}} = 10683017.78 \text{ J}$$

V.5.2. Le rayonnement issu du réflecteur

$$\text{Ray}_{\text{can-ref}} = \frac{S_{\text{cannettes}}}{2} \times \text{Ray}_{\text{réf}}$$

$$\text{Ray}_{\text{can-ref}} = \frac{0.7974}{2} \times 110683017.78$$

$$\text{Ray}_{\text{can-ref}} = 4\,259,3 \text{ kJ}$$

V.5.3. Le rayonnement issu du soleil et reçu par les cannettes

$$\text{Ray}_{\text{can-soleil}} = \frac{S_{\text{cannettes}}}{2} \times \text{Ray}_{\text{soleil}}$$

$$\text{Ray}_{\text{can-soleil}} = \frac{0.7974}{2} \times 14483052$$

$$\text{Ray}_{\text{can-soleil}} = 5\,774,4 \text{ kJ}$$

V.5.4. Le rayonnement total reçu par la surface étudié

$$\text{Ray}_{\text{total}} = \text{Ray}_{\text{can-soleil}} + \text{Ray}_{\text{can-ref}}$$

$$\text{Ray}_{\text{total}} = 5774392.83 + 4259319.19$$

$$\text{Ray}_{\text{total}} = 1\,003,4 \text{ kJ}$$

V.6. La quantité d'énergie reçue par l'eau

$$E_{\text{eau}} = m C_p \Delta T$$

$$E_{\text{eau}} = m C_p (T_f - T_i)$$

- Avec vitrage

$$E_{\text{eau}} = 10 \times 4180 \times (29.83 - 27.71)$$

$$E_{\text{eau}} = 88,6 \text{ kJ}$$

- Sans vitrage

$$E_{\text{eau}} = 10 \times 4180 \times (27.54 - 26.34)$$

$$E_{\text{eau}} = 50,2 \text{ kJ}$$

Avec

C_p : La capacité calorifique de l'eau.

T_f : La température finale.

T_i : La température initiale.

V.7. L'efficacité de l'échangeur

- Avec vitrage

$$\eta = \frac{E_{\text{eau}}}{A_0 \times \text{Ray}_{\text{total}} \times \gamma}$$

Avec

$$A_0 = \frac{\pi R^2}{2}$$

$$\eta = \frac{88616}{0.049 \times 10033712.02 \times 0.8} \times 100$$

$$\eta = 23.15\%$$

▪ **Sans vitrage**

$$\eta = \frac{50160}{0.049 \times 10033712.02 \times 0.8} \times 100$$

$$\eta = 13.57\%$$

Remarque

Dans le calcul du rendement on n'a pas pris en considération la puissance reçue par le MCP.

Discussion :

On explique ces faibles valeurs de l'efficacité dans chaque partie de capteur par :

- La négligence de la puissance reçue par le MCP.
- l'écart minime entre la température d'entrée et de sortie de l'eau qui est dû aux conditions climatiques durant l'essai (ciel nuageux).

Conclusion

Dans ce chapitre on a analysé les courbes obtenues à partir des résultats des essais précédents et on a exploité les différentes méthodes de calcul afin d'avoir une approche sur le rendement thermique.

Conclusion générale

L'utilisation des énergies renouvelables et la protection de l'environnement est culture mondiale. L'exploitation des matériaux abandonnés ou recyclés est une nécessité économique et environnementale. Il existe de nombreuses méthodes qui doivent être prises pour l'exploitation de l'énergie solaire par des projets basés sur les concentrateurs solaires facile à réaliser.

La technologie des concentrateurs solaires est une procédure facile et économique. On peut développer les simples concentrateurs pour arriver à des conceptions efficaces et modernes, comme les capteurs solaires cylindro-parabolique.

Dans ce même contexte, nous avons réalisé un travail composé de trois parties :

- Une étude théorique sur l'énergie solaire et les capteurs solaires.
- Une partie expérimentale contenant réalisation et évaluation de l'efficacité d'un capteur solaire cylindro-parabolique vitré et non vitré.
- Une partie discutant tout résultat obtenu.

Notre objectif était de comparer le rendement des deux capteurs à circulation de liquide (l'eau) et le tester suivant les conditions climatiques, les résultats obtenus nous ont permis de constater que le capteur vitré est plus efficace que celui sans vitre.

Après cinq tests, nous avons pus obtenir les résultats souhaités ainsi que des rendements acceptable.

Références bibliographiques

- [1] J.Bernard ; énergie solaire calculs et optimisation ellipse édition marketing (2004).
- [2] Cour transfert de masse master froid chauffage climatisation.
- [3] Z, sen, solar enrgy fundamentals and modelling thermique, spring (2008).
- [4] Jacques Bernard énergie solaire calculs et optimisation.
- [5] J.A.Duffie; W; A,Beckman solar enrgineering of thermal processes , john, waly and sons (1980).
- [6] Ch,perrin de Brichambaut,C,vauge le gisement solaire, Technique et documentation.
- [7] U.E₁ ker-solar technologies for buildings,john weby sons ,England (2001).
- [8] Mémoire de fin d'études faculté génie de la construction département de génie mécanique université Mouloud Mammeri Tizi-ouzo : Bilan thermique d'un chauffe-eau solaire réalisé par DRIF idir (2012/2013).
- [9] J.Bonal,P,Rossetti ;les énergie celternatives,omniscien (2007).
- [10] Thés de magistère en physique Faculté des sciences exactes département de physique université Mentouri Constantine : effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plant réalisé par Saadi Souad (2010)
- [11] Thés de magistère en physique Faculté des sciences exactes département de physique université Mentouri Constantine : Amélioration des performances d'un collecteur salaire, réalisé par : Boutghan cherifa (2012).
- [12]Mémoire de fin d'étude faculté génie de la construction département de génie mécanique université Mouloud Mammeri Tizi-ouzo : etude et realisation d'un capteur solaire thermique a air réalises par Djhour Ahmed et Boussadia Ahmed (2015).
- [13]Omar Ketfi Djamel lafri le capteur solaire plan thermique, France
- [14]Les centrales à tour : laboratoire énergie solaire économie d'énergie juin (2009) par YAMEGUEU NGUEW DANIEL.
- [15] Mémoire de fin d'étude faculté de technologie Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen :Etude expérimentale et conception d'un concentrateur cylindro-parabolique réalises Par : MEDJAOUI Fatima-Zohra (2018).