

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES
DÉPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Parcours : Master

Option: Energétique

THÈME

**DÉTERMINATION DU RENDEMENT INSTANTANÉ D'UN CAPTEUR
SOLAIRE PLAN À AIR**

Préparé par: DJILALI NAIMA

Soutenu publiquement devant

le jury composé de :

Nom et prénom	Grade	Qualité	Structures de rattachement
SAD Chemloul Nour Eddine	MCA	Président	Université de Tiaret
HAMOU Mahmoud	MAA	Examineur	Université de Tiaret
ABED Belkacem	MCA	Encadreur	Université de Tiaret

PROMOTION 2018 /2019

Remerciements

*Avant toute chose, je remercie DIEU, le tout puissant, pour m'avoir
Donné la santé, le courage et la patience*

*Je représente mes sincères remerciements à ceux qui m'ont aidé de
près ou de loin pour que je puisse réaliser ce modeste travail, spécialement
mon encadreur Mr Abed Belkacem, je le remercie pour sa patience
et sa disponibilité durant ma préparation de ce travail.*

*J'adresse mes remerciements à Mr Sad Chemloul Nour Eddine le
Président de jury et Mr Hamou Mahmoud Examineur de jury d'avoir
accepté de faire l'honneur de juger ce travail.*

*Je remercie M^{lle} Abed Asmaa et M^{lle} Labadi Fatima pour le courage
et la volonté, sans oublier M^{lle} Tamer Amina*

*Je remercie tous les enseignants du département du génie mécanique
surtout monsieur Guemour Mohamed Boutkhalil chef du département qui
m'a donné l'occasion pour terminer mes études.*

*D*édicaces

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A mon encadreur Mr Abed Belkacem

A mes meilleures amies qui m'ont toujours ouvert les portes de l'espoir

Halima et Amaria

A ma grande famille

A Tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science

Merci 

Naima

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
n	Nombre de jour de l'année	Jours
a	L'azimut	Degré
L	Longitude de lieu	Degré
φ	Latitude de lieu	Degré
δ	La déclinaison	Degré
hc	Coefficient d'échange par convection	$W/m^2 \cdot ^\circ c$
ddj	Durée du jour	Heur
a*	Albédo	-
K	Conductance thermique	$w/m^2 \cdot ^\circ c$
H	La hauteur du soleil	Degré
ΔH	Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré	Heur
I	L'angle incident	Degré
Ft	Le facteur de transfert thermique	-
P	Le pas entre les tuyaux	m
L	Longueur de l'absorbeur	m
F	Rendement d'irrigation	-
\dot{m}	Débit massique de fluide	Kg/s
\dot{Q}_u	Puissance utile	w/m^2
\dot{M}	Le débit massique par unité de surface	$Kg/s \cdot m^2$
χ	Le périmètre mouillé	-
Et	Equation de temps	Minute
C_h	L'irradiation journalière	$KW \cdot h/m^2 \cdot J$
TSV	Temps solaire vrai	Heures
TSM	Temps solaire moyen	Heures
TU	Temps universel	Heures
TL	Temps légal	Heures
Z	Altitude	m
C^*	Constante solaire	W /m^2
ddi	Durée d'insolation	Heur

S^*	Eclairement directe	W /m^2
D^*	Eclairement diffus	W /m^2
G^*	Eclairement global	W /m^2
I^*	Eclairement solaire	W /m^2
R_S	Rapport d'éclairement direct.	–
R_D	Rapport d'éclairement diffus	–
R_G	Rapport d'éclairement global	–
W	Vitesse de veut	m/s
E	Facteur de radiation	–
R	Résistance thermique	$^{\circ}C/(W /m^2)$

Lettres grecques	Désignation	Unité
α	Coefficient d'absorption	sans unité
β	Inclinaison du capteur	Degré
τ	Coefficient de transmission	Sans unité
η	Rendement instantané	Sans unité
ε	Coefficient d'émissivité	Sans unité
σ	Constante de Stefan Boltzmann	$W/m^2 \cdot K^{-4}$
ω	L'angle horaire	Degré
τ^*	Le coefficient de transmission	Sans unité

Indice	Désignation
a	Ambiant
c	Couverture
f	Fluide caloporteur
fe	Fluide à l'entrée du capteur
fs	Fluide à la sortie du capteur
P	Plaque absorbante
0	au coucher du soleil
m	midi solaire
h	Le capteur horizontal
v	Le capteur vertical
i	Isolant
ar	Arrière
av	Avant

Liste des figures

Figure I.1 : Energie solaire.....	5
Figure I.2 : Principe de l'énergie solaire thermique	7
Figure I.3 : schéma d'un système solaire photovoltaïque.....	7
Figure I.4 : Couches externes du soleil.....	9
Figure I. 5 : Les composantes du rayonnement solaire.....	10
Figure I. 6 : J.H. Lambert.....	12
Figure I.7 : Schéma descriptive de l'albédo.....	13
Figure II.1 : Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....	17
Figure II.2 : Les capteurs cylindro-paraboliques	18
Figure II.3 : Les capteurs paraboliques.....	19
Figure II.4 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel.....	19
Figure II.5 : Les centrales à tour	20
Figure II.6 : Les cheminés solaires	20
Figure III.1 : Schéma montrant les différentes coordonnées angulaires	23
Figure III. 2 : Les coordonnées horaires.....	24
Figure III.3 : les coordonnées horizontales	25
Figure III.4 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu donné	25
Figure III.5 : Le mouvement de la terre au tour du soleil.....	26
Figure III.6 : Rayonnement direct, diffus et global	29
Figure III.7 : Pyrhéliomètre	33
Figure III.8 : Héliographe	34
Figure III.9 : Pyranomètre	34
Figure IV.1: Différents éléments d'un capteur solaire plan à eau.....	38
Figure IV.2 : Capteur plan à air	39
Figure IV.3 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan.	40
Figure IV.4 : Capteurs non vitrés sur un toit de piscine	40
Figure IV.5 : Capteur solaire plan vitré	41
Figure IV.6: Les capteurs à tube sous vide	41
Figure IV.7: Schéma d'un capteur plan limité à la seule plaque absorbante.....	42
Figure IV.8: Schéma d'un capteur plan avec son système d'évacuation de la chaleur a) à eau, b) à air	44
Figure IV.9 : L'effet de serre dans un capteur solaire thermique	45

Figure IV.10: Différents nœuds et l'analogie électrique équivalent relative du capteur	48
Figure IV.11: Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a	48
Figure V.1 Evolution de l'éclairement global en fonction de l'albédo	54
Figure V.2 : Evolution de rendement instantané en fonction de l'albédo	55
Figure V.3: Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 0^\circ$	55
Figure V.4: Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 30^\circ$	56
Figure V.5 : Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 60^\circ$	56
Figure V.6 Evolution de l'éclairement global en fonction de la latitude	57
Figure V.7: Evolution de rendement instantané en fonction de la latitude	58
Figure V.8: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,15$	59
Figure V.9: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,37$	59
Figure V.10: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,8$	59.

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques du soleil.....	9
Tableau I.2: L'écarte relatif du flux solaire par rapport à la constante solaire	12
Tableau I.3: Albédo solaire de différentes surfaces.....	13
Tableau III.1: Valeurs des coefficients annuels moyens, a_1 , a_2	32
Tableau III.2: Expressions empiriques des éclairagements solaires en w/m^2 par ciel clair.....	32
Tableau IV.1: Caractéristiques thermo physiques des matériaux utilisés comme absorbeur	43
Tableau IV.2: Revêtements des surfaces d'absorbeur.	43
Tableau IV.3: Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant	46
Tableau V.1: Les données pour les calculs	53
Tableau V.2: Les résultats obtenus pour une valeur fixe de latitude	54
Tableau V.3: Les résultats obtenus pour une valeur fixe de l'albédo	57

Sommaires

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Nomenclature.....	iii
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	viii
Introduction générale.....	02

Partie I

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

I.1 Introduction.....	05
I.2 L'énergie solaire.....	05
I.2.1 Origine.....	05
I.2.2 Caractères particuliers.....	06
I.2.3 Captation de l'énergie solaire.....	06
I.2.4 Avantages et inconvénients de l'énergie solaire.....	08
I.3 Le soleil.....	08
I.3.1 Structures et aspects du soleil.....	09
I.3.2 Rayonnement solaire.....	10
I.3.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère.....	10
I.3.4 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	10
I.3.5 Constante solaire.....	11
I.3.6 Albédo.....	12
I.4 Domaine d'application.....	13

I.5 Conclusion.....	14
---------------------	----

Chapitre II : Centrales solaires

II.1 Introduction.....	16
II.2 Différentes centrales solaires.....	16
II.2.1 Centrale photovoltaïque.....	16
a. Principe de fonctionnement.....	16
b. Les avantages et les inconvénients.....	17
II.2.2 Les concentrateurs.....	17
II.2.3 Les Centrales thermodynamiques.....	18
a. Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques.....	18
b. Les centrales paraboliques.....	18
c. Les centrales à miroir Fresnel.....	19
d. Centrales à tour.....	20
e. Les centrales solaires à effet de cheminée.....	20
II.3 Avantage et inconvénient des concentrateurs.....	20
II.4 Conclusion.....	21

Partie II

Chapitre III : Paramètres solaires

III.1 Introduction.....	23
III.2 Calcul de la position du soleil.....	23
III.2.1 Repère de coordonnées équatoriales.....	23
III.2.2 Repère de coordonnées horizontales.....	24
III.3 Paramètre de la position.....	25
III.4 Mouvement de la terre.....	25

III.5 Paramètre du temps.....	26
III.5.1 Temps Solaire Vrai (T.S.V)	26
III.5.2 Temps Solaire Moyen (T.S.M)	26
III.5.3 Temps Universel (T.U)	27
III.5.4 Temps Légal (T.L)	27
III.5.6 Equation du Temps.....	27
III.5.7 Cas particuliers.....	27
III.6 Eclairage solaire.....	28
III.6.1 Rayonnement direct.....	28
III.6.2 Rayonnement diffus.....	29
III.6.3 Rayonnement global.....	29
III.6.4 Rapports d'éclairage.....	29
III.7 Irradiation hors atmosphère.....	30
III.7.1 Cas d'un ciel clair.....	31
III.7.2 Cas d'un ciel variable.....	31
III.7.2.1 Durée d'ensoleillement.....	31
III.8 Instrument de mesure.....	33
III.8.1 Pyrhéliomètre.....	33
III.8.2 Héliographe.....	33
III.8.3 Pyranomètre.....	34
III.9 Conclusion.....	35

Chapitre IV: les capteurs solaires plans

IV.1 Introduction.....	37
IV.2 les Capteurs solaires plans.....	37

IV.2.1 Classification des capteurs solaires thermiques.....	37
1) Le fluide de travail utilisé.....	37
2) L'orientation des capteurs.....	38
IV.2.2 Capteur plans à eau.....	38
IV.2.3 Capteur plans à air.....	39
IV.3 Principe de fonctionnement d'un capteur plan.....	39
IV.4 Différents types des capteurs solaires.....	40
IV.4.1 Capteur sans vitrage.....	40
IV.4.2 Capteur vitré.....	41
IV.4.3 Capteur sous vide.....	42
IV.5 Élément de construction.....	42
IV.5.1 Absorbeur.....	42
IV.5.2 Fluide caloporteur.....	43
IV.5.3 Vitrage ou couverture transparente.....	44
IV.5.4 Effet de serre.....	45
IV.5.5 Isolation thermique.....	45
IV.5.6 .Coffre ou la cadre.....	45
IV.6 Utilisation d'un capteur solaire plan à Air.....	46
IV.7 Avantages et inconvénients d'un capteur plan.....	46
IV.8 Rendement d'un capteur plan.....	47
IV.8.1 Bilan énergétique du capteur plan.....	47
IV.8.2 Influence de la température d'entrée de fluide caloporteur.....	50
IV.9 Conclusion.....	51

Chapitre V : Résultats et interprétations

V.1 Introduction.....	53
V.2 Problématique.....	53
V.3 Evolution du l'éclairement global en fonction de l'albédo.....	54
V.4 Evolution de rendement instantané en fonction de l'albédo.....	55
V.5 Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global (latitude fixe).....	55
V.6 Evolution du l'éclairement global en fonction du la latitude.....	57
V.7 Evolution de rendement instantané en fonction de latitude.....	58
V.8 Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global (albédo fixe).....	58
V.9 Conclusion.....	60
Conclusion générale.....	62
Références bibliographiques.....	64

Annexes

Résumé

Introduction générale

Introduction générale

Le récent développement dans l'industrie et l'apparition de nouvelles technologies nécessitent des systèmes énergétiques très complexes, où la connaissance de ces systèmes est considérée comme le premier pas dans le domaine d'énergie.[1]

Il existe plusieurs niveaux dans un système énergétique, où le niveau primaire est constitué de toutes les sources énergétiques non transformées disponibles dans la nature. Ces sources se subdivisent en énergies épuisables (le charbon, le pétrole brut, le gaz naturel, l'uranium naturel) et énergies renouvelables (l'hydraulique, le solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, la géothermie) [1].

L'énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le Soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [4].

Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau, du vent et de la photosynthèse du règne végétal. Le règne animal, y compris l'humanité, dépendent des végétaux sur lesquels sont fondées toutes les chaînes alimentaires. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes.

L'exploitation de l'énergie solaire nécessite des capteurs solaires tels que les capteurs solaires plans à air. Ces capteurs, qui ont l'air comme un fluide caloporteur, peuvent être utilisés dans beaucoup d'applications travaillant sur des températures basses et modérées, tant que l'air a des faibles caractéristiques de transfert de chaleur.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de faire une étude sur les capteurs solaires plans, afin de calculer le rendement instantané en variant plusieurs paramètres. Les résultats sont présentés graphiquement et interprétés dans le chapitre cinq.

Ce travail de fin d'étude est constitué de deux parties avec cinq chapitres.

- Le premier chapitre est consacré à un rappel sur l'énergie solaire, une description du soleil et les méthodes de captation de l'énergie solaire et le domaine d'utilisation.
- Le deuxième chapitre présente une description sur les différentes centrales solaires, les avantages et inconvénients de ces centrales, où le principe de fonctionnement de chaque centrale est bien défini.
- La réception de l'énergie solaire fait l'objet du troisième chapitre.
- Le quatrième chapitre est consacré aux capteurs solaires plans, les types de ces capteurs, leur principe de fonctionnement, et le calcul de rendement des capteurs plans.

Introduction générale

- Le dernier chapitre présente les résultats et interprétations concernant le calcul du rendement d'un capteur solaire plan à air.

Partie –I–

Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire

I.1 Introduction

Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants (fumées contenant du CO_2 et des NO_x par les centrales thermiques), pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires) [11].

Dans ce chapitre, nous présentons la définition de l'énergie solaire, l'origine de cette énergie et comment la capter, et en terminant par une définition du soleil.

I.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'énergie que dispense le soleil par son rayonnement, directement ou de manière diffuse à travers l'atmosphère. Sur Terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal, dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique via la photosynthèse. A l'exception de l'énergie nucléaire, de la géothermie et de l'énergie marémotrice, l'énergie solaire est à l'origine de toutes les énergies sur Terre.

Grâce à divers procédés, l'énergie solaire peut être transformée en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou la chaleur obtenue à partir de cette dernière. [4]



Figure I.1: Energie solaire.

I.2.1 Origine

L'énergie solaire provient de la fusion d'hydrogène en hélium au sein du noyau de notre étoile. Les conditions résidantes au cœur du soleil favorisent l'interaction des différents atomes d'hydrogène qui subissent une réaction de fusion thermo nucléaire. Le résultat de ce

processus, lorsqu'il se répète est la fusion de quatre noyaux d'hydrogène en un noyau d'hélium avec émission d'énergie sous forme de rayonnements gamma et X.

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3.7.10^{26}$ j/s. [5]

I.2.2 Caractères particuliers

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

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

I.2.3 Captation de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être captée et transformée en chaleur ou en électricité grâce à des capteurs adaptés par les différentes techniques suivantes :

- L'énergie solaire thermique

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air. [18]

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications :

- La production d'eau chaude.
- Le chauffage des maisons.
- Le chauffage de l'eau des piscines.
- La réfrigération par absorption pour les bâtiments.
- La production de très haute température.

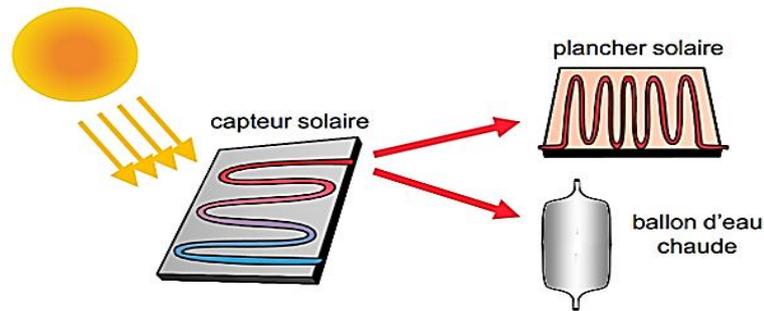


Figure I.2: Principe de l'énergie solaire thermique [12].

– L'énergie solaire thermodynamique

Le solaire à concentration thermodynamique est une technologie qui utilise des miroirs qui concentrent l'énergie solaire vers un tube contenant un fluide caloporteur qui peut être chauffé jusqu'à une température pouvant atteindre 500°C. La chaleur obtenue est transférée à un circuit d'eau, la vapeur alors produite actionne une turbine couplée à un alternateur qui produit de l'électricité.

L'un des grands avantages de cette technologie provient du fait que la chaleur peut être stockée, permettant ainsi aux centrales solaires de produire de l'électricité pendant la nuit [14].

– L'énergie solaire photovoltaïque

Le photovoltaïque est une énergie renouvelable issue du soleil. Il utilise directement le rayonnement solaire pour transformer la lumière en courant électrique grâce à l'effet photovoltaïque. L'électricité est produite à partir de la lumière du jour et pas seulement par l'exposition au soleil. [14]

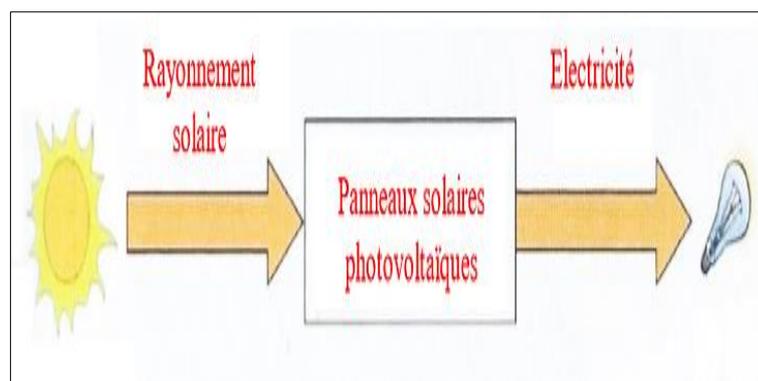


Figure I.3 : Schéma d'un système solaire photovoltaïque

I.2.4. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire

✓ Avantages

- L'énergie solaire est inépuisable et non polluante
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage.
- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes

✓ Inconvénients

- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé.
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.
- Un cycle de vie en question : la durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. Le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an. De plus, les panneaux solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre, chrome, silicium, cadmium et tellure.
- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 % (pour les meilleurs). L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.[12]

I.3 Le soleil

Le Soleil fait partie d'un système stellaire d'environ 340 milliards d'étoiles. La plupart sont concentrées dans une région en forme de disque délimitée par des bras qui se répartissent en spirale à partir d'un noyau central. Elle occupe une position périphérique à 28000 années-lumière du centre, autour duquel il tourne à une vitesse de 225 km/s. Il effectue une révolution en 300 millions années. Elle est l'étoile centrale de notre système planétaire, autour duquel tournent dans l'état actuel de nos connaissances 7 planètes, 5 planètes naines et des millions d'astéroïdes. Elle contient plus de 99.8% de la masse totale du Système Solaire.

Le Soleil est actuellement constitué de 75% d'hydrogène et 25% d'hélium en masse et 92,1% d'hydrogène et 7,8% d'hélium en nombre d'atomes. Tous les autres éléments ne représentent pas plus de 0,1%. Ces chiffres varient lentement au fur et à mesure que le Soleil convertit l'hydrogène en hélium par réaction de fusion nucléaire [4].

Diamètre (km)	Masse (kg)	Surface (km ²)	Volume (km ³)	Masse volumique moyenne (kg/m ³)	Vitesse (km/s)	Puissance rayonnée (kW)	Densité du soleil (kg/m ³)	Age de soleil (Année)
1392000	$1,989.10^{30}$	$6.09.10^{12}$	$1.41.10^{18}$	1410	217	$3,83.10^{23}$	1400	$4,7. 10^9$

Tableau I.1 : Caractéristiques du soleil

I.3.1 Structures et aspects du soleil

Le soleil est une sphère non homogène dans laquelle on peut distinguer plusieurs zones: l'intérieur, la photosphère, la chromosphère et la couronne solaire. [6]

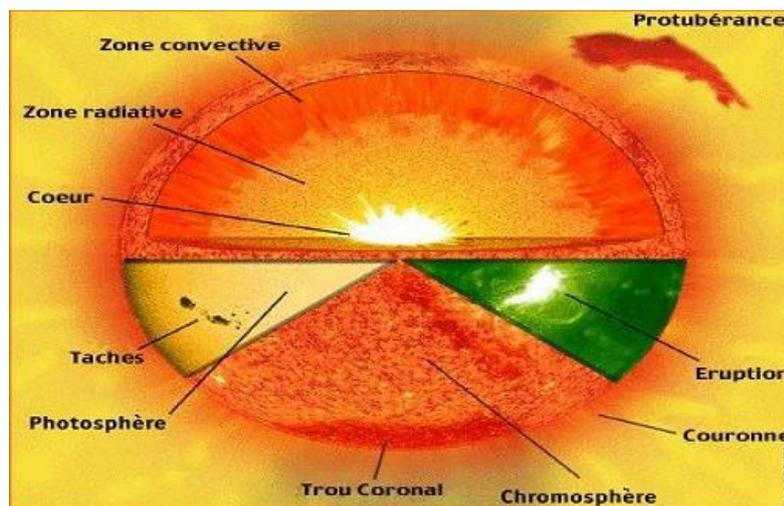


Figure I.4: Couches externes du soleil.

- **L'intérieur** : (noyau, zone de radiation et zone de convection)

L'intérieur est la source d'énergie du soleil, il est composé de (2/3) d'hydrogène et (1/3) d'hélium. La température atteint 16 MK.

- **La photosphère** : C'est la couche gazeuse qui enveloppe le soleil .elle est responsable de presque la totalité du rayonnement que la terre reçoit. Elle est mince d'environ 300km, et de pression de 10^{-6} atmosphère et une densité de 10^{-8} g/cm³.
- **Chromosphère** : Elle surmonte la photosphère .c'est une couche gazeuse qu'on assimile à l'atmosphère solaire, son épaisseur ne dépasse pas 800 km et sa température est de $(43.10^3$ K).
- **La couronne** : C'est une auréole blanche irrégulière sans limite définies, son épaisseur est de l'ordre de 3.10^6 km.

I.3.2 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est une énergie produite par le soleil à la suite de réactions de fusion thermonucléaire qui dégage une très grande quantité d'énergie, source de la plupart des énergies disponibles sur terre et exploitable pour la production d'électricité. [7]

- ✓ **Le rayonnement direct** : Rayonnement solaire provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- ✓ **Le rayonnement diffus** : Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol (albédo), suivant l'inclinaison de la surface réceptrice.
- ✓ **Le rayonnement global** : La somme du rayonnement solaire direct et du rayonnement solaire diffus constitue le rayonnement global.

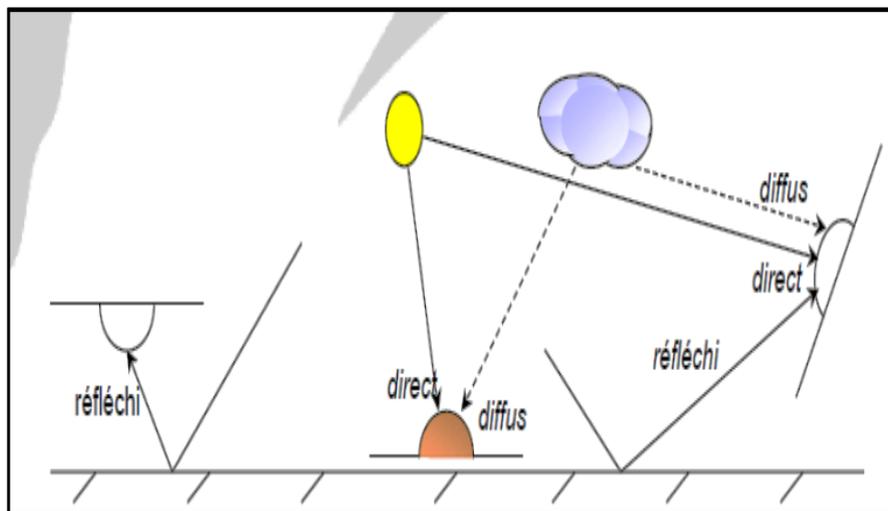


Figure I.5: Les composantes du rayonnement solaire.

I.3.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère

Le rayonnement solaire hors atmosphère ne dépend que des paramètres astronomiques, il est caractérisé par une donnée fondamentale appelée constante solaire.

I.3.4 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire

L'atmosphère est au sens large, une couche gazeuse qui enveloppe certains astres. La Terre ainsi que d'autres planètes ou les étoiles en sont pourvues.

Une atmosphère peut contenir des particules en suspension (poussières, aérosols, etc.) ou atteindre des températures très élevées, comme c'est le cas pour les étoiles, engendrant alors une émission de lumière.

L'atmosphère terrestre correspond à la couche de gaz et de particules qui entoure notre planète. L'air se compose très majoritairement de diazote (78 %), de dioxygène (21 %) et d'autres gaz, dont l'argon et le dioxyde de carbone. Ceux-ci, cumulés aux particules en suspension, jouent un rôle fondamental dans le maintien de la vie : absorption partielle du rayonnement ultraviolet, tampon thermique ou réchauffement de la surface par effet de serre. Ainsi, entre le jour et la nuit, les températures fluctuent peu.

Sa limite est difficile à déterminer car il n'existe pas de frontière nettement dessinée. Néanmoins, l'atmosphère terrestre se compose de plusieurs couches :

- a. La troposphère, présente au niveau du sol jusqu'à une dizaine de kilomètres d'altitude et concentrant la majeure partie de la masse de l'air et des phénomènes météorologiques.
- b. La stratosphère, qui compose le niveau supérieur, jusqu'à 50 km d'altitude, et héberge la couche d'ozone, absorbant une grande partie du rayonnement solaire.
- c. La mésosphère, située entre 50 et 80 km d'altitude.
- d. La thermosphère, jusqu'à 800 km d'altitude.
- e. L'exosphère, qui se poursuit jusqu'à 50.000 km d'altitude, avec une densité gazeuse très faible. [8]

I.3.5 Constante solaire

Une surface plane d'un mètre carré perpendiculaire au rayonnement solaire et située à la limite de l'atmosphère terrestre reçoit une puissance rayonnée fonction de la distance Soleil-Terre.

Cette distance variant quelque peu au cours de l'année, compte tenu de la légère excentricité de l'orbite terrestre, il en est de même de la puissance reçue par la surface en question.

Le tableau I.2 indique les valeurs de cette puissance surfacique pour le 1^{er} de chaque mois. On constate que le flux solaire varie peu au cours du temps. Aussi appelle-t-on constante solaire, notée C^* , la valeur moyenne du flux solaire reçu à la limite de l'atmosphère.

$$\text{On a : } C^* = 1353 \text{ W/m}^2$$

Date le 1 ^{er}	Puissance Surfacique w/m ²	Ecart relatif en %/C*
Janvier	1399	+3,40
Février	1394	+3,03
Mars	1379	+1,92
Avril	1354	+0,07
Mai	1333	-1,48
Juin	1312	-3,03
Juillet	1308	-3,33
Aout	1312	- 3,03
Septembre	1329	-1,77
Octobre	1350	-0,22
Novembre	1373	+1,48
Décembre	1392	+2,88

Tableau I.2 : L'écart relatif du flux solaire par rapport à la constante solaire. [2]

I.3.6.Albédo

L'albédo est le pouvoir réfléchissant d'une surface, soit le rapport de l'énergie lumineuse réfléchie à l'énergie lumineuse incidente. C'est une grandeur sans dimension, comparable à la réflectance, mais d'application plus spécifique, utilisée notamment en astronomie et climatologie ainsi qu'en géologie. Il a été introduit au XVIII^e siècle en optique et en astronomie par le mathématicien et astronome suisse Jean-Henri Lambert (image) [8].



Figure I.6 : J.H. Lambert.

L'albédo est une valeur comprise entre 0 et 1 : Un corps noir parfait, qui absorberait toutes les longueurs d'onde sans en réfléchir aucune, aurait un albédo nul, tandis qu'un miroir parfait, qui réfléchirait toutes les longueurs d'onde, sans en absorber une seule, aurait un albédo égal à 1 il est noté par a^* et donné par la relation :

$$a^* = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie incidente}}$$

Surface	Albédo solaire a *
Mer chaude	0,05
Lune	0,07
Forêt tropicale	0,12
Mer froide	0,15
Pierre,ciment, sol cultivé	0,15 à 0,25
Herbe verte	0,25
Sable clair	0,37
Neige tassée	0,60
Vénus	0,64
Neige fraîche	0,85
Nuage	0,80

Tableau I.3:Albédo solaire de différentes surfaces.[2]

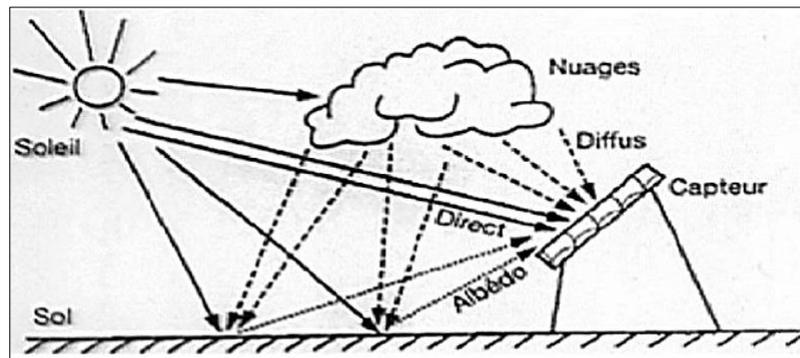


Figure I.7 : Schéma descriptive de l'albédo.

I.4 Domaine d'application

✓ Moyen naturel

La plus grande partie de l'utilisation de l'énergie solaire est consacrée au réchauffement de la Terre, ce qui rend possibles les formes connues d'existence biologique à proximité de la surface, suivie par la photosynthèse des plantes. La plupart des organismes, y compris les humains, dépendent soit directement (en tant qu'herbivores), soit indirectement (en tant que carnivores) de l'énergie solaire.

Le combustible et les matériaux de construction en découlent également.

Par ailleurs, l'énergie solaire est responsable des différences de pression d'air dans l'atmosphère, qui sont à l'origine du vent. Enfin, le cycle hydrique de la Terre est entraîné par

l'énergie solaire. Outre ces « effets » naturels, il existe de plus en plus d'applications techniques, en particulier dans le domaine de l'approvisionnement énergétique.

✓ **Applications techniques de l'énergie solaire :**

En s'appuyant sur la technologie solaire, l'énergie solaire peut être profitable de plusieurs façons :

- Les cellules solaires produisent de l'électricité à courant continu (photovoltaïque).
- Les panneaux solaires génèrent de la chaleur (thermo-solaire).
- Les centrales héliothermiques génèrent de l'électricité à partir de la chaleur et de la vapeur. Les cuisinières solaires ou les fours solaires permettent de réchauffer les aliments ou de stériliser les équipements médicaux.
- Les plantes et les déchets végétaux peuvent être traités pour produire des liquides exploitables (par ex., éthanol, huile de colza) ou des gaz (comme du biogaz).
- Les centrales éoliennes et hydroélectriques génèrent de l'électricité [8]

I.5 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre l'énergie solaire, où nous avons défini plus particulièrement le soleil. Le Soleil se trouve à la base de toutes les énergies. Il produit la chaleur et la lumière nécessaires à la vie sur Terre. Ce rayonnement solaire est utilisé pour chauffer et pour produire de l'électricité.

Le Soleil est une fantastique boule de feu qui brûle depuis 4,55 milliards d'années. Elle est si grande et si chaude que, même si nous en sommes très éloignés, nous bénéficions encore de sa chaleur et de sa lumière.

Le Soleil est 1'300'000 fois plus gros que la Terre, et la chaleur dans son cœur peut atteindre 15 millions de degrés ! Heureusement, 150 millions de kilomètres nous séparent de cette formidable source d'énergie, et notre atmosphère nous protège de la puissance de ses rayons.

Partie –I–

Chapitre II : Centrales solaires

II.1. Introduction

Les centrales solaires sont une technologie relativement récente, possédant un important potentiel de développement. Elles offrent une opportunité aux pays ensoleillés meilleur que celle des fermes éoliennes pour les pays côtiers.

Les endroits les plus prometteurs pour l'implantation de ces technologies sont ceux du sud-ouest des États Unis, l'Amérique du Sud, une grande partie de l'Afrique, les pays méditerranéens et du Moyen Orient, les plaines désertiques d'Inde et du Pakistan, la Chine, l'Australie, etc. Dans beaucoup de régions du monde, un kilomètre carré de terrain suffirait à générer jusqu'à 120 Gwh d'électricité par ans, grâce à la technologie des centrales solaire. Cette énergie est équivalente à la production annuelle d'une centrale classique de 50 MW [13].

L'objectif de ce chapitre est de citer les différentes types des centrales solaires leurs avantages et les inconvénients.

II.2. Différentes centrales solaires

II.2.1 Les centrales photovoltaïques

Terme le « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921).

Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745 1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse. [12]

a) Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (le silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique. Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p. La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement.[12]

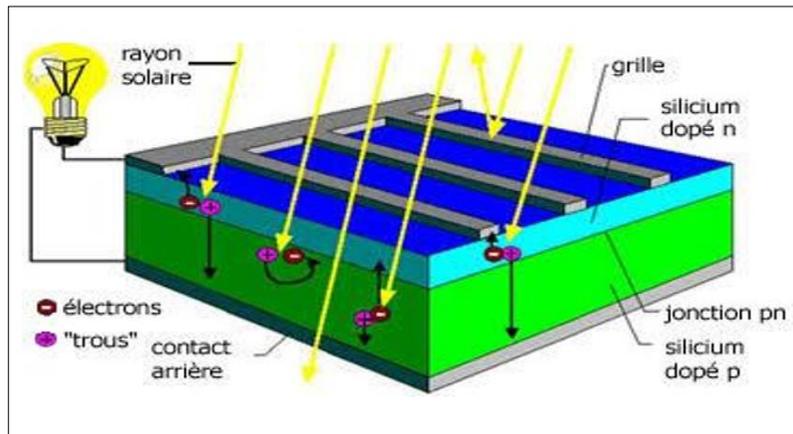


Figure II.1: Représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.

b) Les avantages et les inconvénients :

✓ Les avantages

- Technologie silencieuse et non polluante.
- Silicium utilisé le plus souvent comme matériau de base.
- Stabilité et fiabilité durant au moins 25 ans.
- Maintenance limitée au contrôle annuel des installations.
- Coûts de transfert d'énergie de maintenance et d'exploitation relativement faible.

✓ Les inconvénients

- Utilisation de batteries en plomb pour le stockage de l'énergie.
- Quantité d'énergie reçue par mètre carré limitée en raison d'une source d'énergie solaire diluée sur l'ensemble de la surface du globe.
- Production d'électricité aléatoire et périodique dépendant du niveau d'ensoleillement (par exemple, selon la densité de la couverture nuageuse) et devenant nulle le soir et la nuit. [3]

II.2.2 Les Concentrateurs

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel.

Le récepteur absorbe l'énergie réfléchi par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels.

On caractérise la performance du système par son facteur de concentration. Ce coefficient permet d'évaluer l'intensité de la concentration solaire : plus le facteur de concentration est élevé, plus la température atteinte sera importante. [8]

$$\text{facteur de concentration} = \frac{\text{surface du miroir}}{\text{surface de receptrur}}$$

On caractérise 02 types de concentrateurs :

1. **Fixes** : centrales à tour et le Collecteur Fresnel linéaire.
2. **Mobiles** : collecteurs paraboliques et Collecteurs cylindro-paraboliques.

II.2.3 Les Centrales thermodynamiques

a) Les centrales à capteurs cylindro –paraboliques

Ce type de centrale se compose d'alignements parallèles de longs miroirs hémicylindriques, qui tournent autour d'un axe horizontal pour suivre la course du soleil.

Les rayons solaires sont concentrés sur un tube horizontal dans lequel circule un fluide caloporteur (généralement une huile synthétique).

Les tuyaux étant noirs, ils absorbent toute la chaleur du soleil et permettent à la température du fluide de monter jusqu'à 500° C. [10]

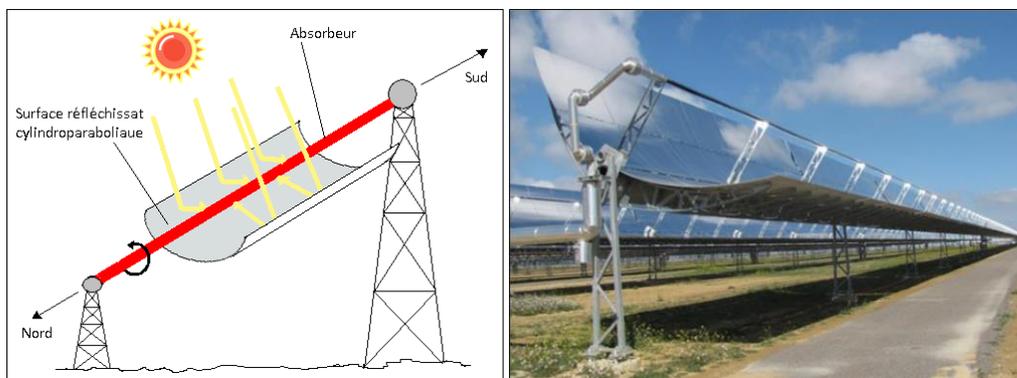


Figure II.2 : Les capteurs cylindro-paraboliques

b) Les centrales paraboliques

Différents types de collecteurs paraboliques tout quatre expérimentés en Allemagne. Les capteurs paraboliques fonctionnent d'une manière autonome. Ils sont constitués d'une grande parabole de révolution réfléchissante et d'un moteur « Stirling » au foyer de la parabole. Le tout pivote sur 2 axes pour suivre le déplacement du soleil afin de concentrer son rayonnement sur le foyer de la parabole réfléchissante. Le rapport de concentration est généralement d'environ 4000 et la température obtenue entre 500 et 1000°C.

Un de leurs principaux avantages est la modularité : ils peuvent en effet être installés dans des endroits isolés, non raccordés au réseau électrique. Pour ce type de système, le stockage n'est pas possible. [10]

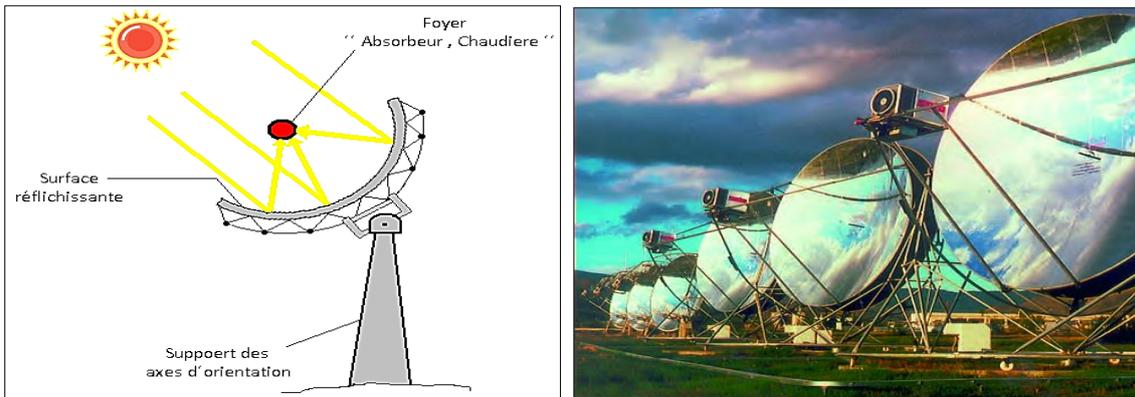


Figure II.3 : Les capteurs paraboliques

c) Les centrales à miroir Fresnel

Un facteur de coût important dans la technologie des collecteurs cylindro-paraboliques repose sur la mise en forme du verre pour obtenir sa forme parabolique.

Une alternative possible consiste à approximer la forme parabolique du collecteur par une succession de miroirs plans. C'est le principe du concentrateur de Fresnel. Chacun des miroirs peut pivoter en suivant la course du soleil pour rediriger et concentrer en permanence les rayons solaires vers un tube ou un ensemble de tubes récepteurs linéaires fixes.

En circulant dans ce récepteur horizontal, le fluide thermodynamique peut être vaporisé puis surchauffé jusqu'à 500 °c. La vapeur alors produite actionne une turbine qui produit de l'électricité. Le cycle thermodynamique est généralement direct, ce qui permet d'éviter les échangeurs de chaleur. [10]

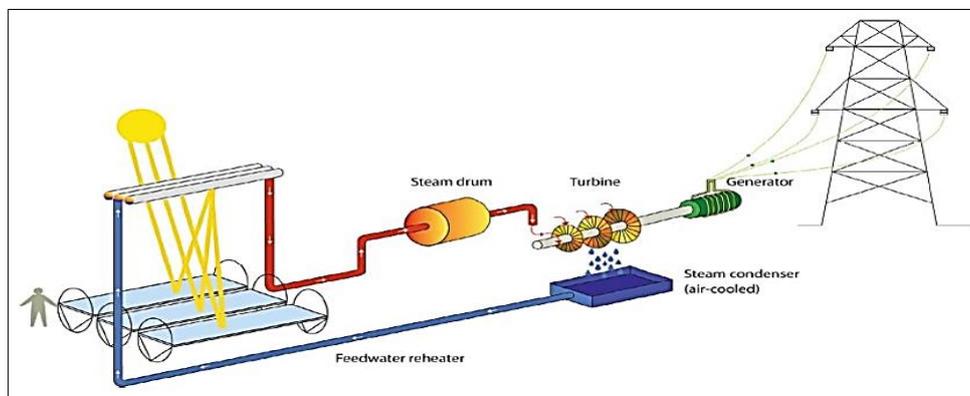


Figure II.4 : Les centrales solaires à miroir de Fresnel

d) Centrales à tour

Le principe des centrales à tour est le suivant :

Des héliostats au sol réfléchissent les rayons du soleil vers une chaudière en haut d'une tour où un liquide (généralement du sel fondu) est chauffé jusqu'à 2000°C.

Ce liquide porte ensuite à ébullition de l'eau dont la vapeur actionne des turbines et produit de l'électricité. [10]

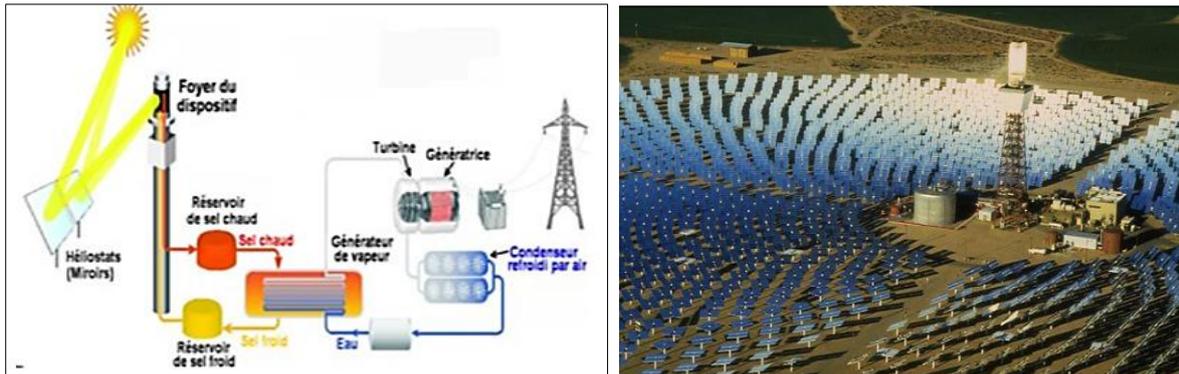


Figure II.5 : Les centrales à tour

e) Les centrales solaires à effet de cheminée

Le fonctionnement de ce type se base sur un principe simple : l'air chaud étant plus léger que l'air froid, il s'élève. Une serre gigantesque, le « collecteur », placée tout autour de la cheminée centrale, chauffe l'air grâce au soleil et provoque un vent puissant exploité par des turbines situées à l'embouchure de la cheminée pour produire de l'électricité [10].

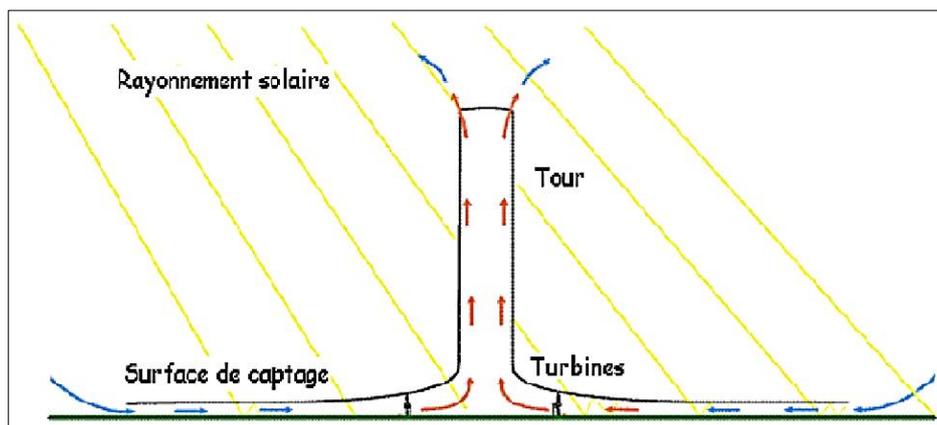


Figure II.6: Les cheminées solaires

II.3. Avantage et inconvénient des concentrateurs:

Le concentrateur est un dispositif qui permet, par réflexion ou réfraction du rayonnement incident, de soumettre le convertisseur à des flux surfaciques intenses ; la

conversion héliothermique à température élevée devient alors envisageable ; jusqu'à environ 300°C, sous quelques centaines de w.m^{-2}

✓ **Inconvénients**

• **D'ordre physique**

Perte à la réflexion ou à la transmission, d'une fraction du rayonnement direct (partie rayonnement global directement issue du soleil) selon la valeur du facteur de réflexion, ou de transmission du concentrateur (par exemple 0.9).

Perte totale ou partielle du rayonnement diffus (seconde composante du rayonnement global) qui provient de l'environnement, et non plus du soleil, par rapport auquel les calculs de trajectoires optiques ont été effectués (plusieurs dizaines de KW.m^2).

– **D'ordre technologie et économique**

Le capteur à concentration est souvent plus sophistiqué (par exemple, mobile) et donc plus cher par unité de surface que le capteur plan traditionnel à l'investissement comme à la maintenance. [10]

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les centrales solaires, le principe de fonctionnement de chaque type et les avantages et inconvénients de ces centrales.

Nous avons cité trois types de centrales qui sont les centrales photovoltaïques, les concentrateurs, et les centrales thermodynamiques où il existe plusieurs types.

La connaissance du principe de fonctionnement de ces différents types de centrales solaire nous permet de comprendre les méthodes utilisées dans l'industrie pour utiliser l'énergie solaire.

Partie –II–

Chapitre III : Paramètres solaires

III.1 Introduction :

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil. Pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux. La connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale. [2]

Au cours de chapitre, nous nous sommes intéressés de définir les différents paramètres solaires, telles que la position du soleil, l'éclairement solaire et l'irradiation hors atmosphère, et en terminant par citer les instruments du mesure du rayonnement solaire.

III.2 Calcul de la position du soleil :

La position du soleil dans le ciel n'est pas fixe, elle change à travers le jour et la saison. Ce changement de position est engendré par la rotation de la terre sur elle-même (autour de son axe), et de son mouvement autour du soleil (dans son orbite) Afin de déterminer cette position il est d'usage d'utiliser deux repères : le repère équatorial ou horaire et le repère horizontal ou azimutal. [8]

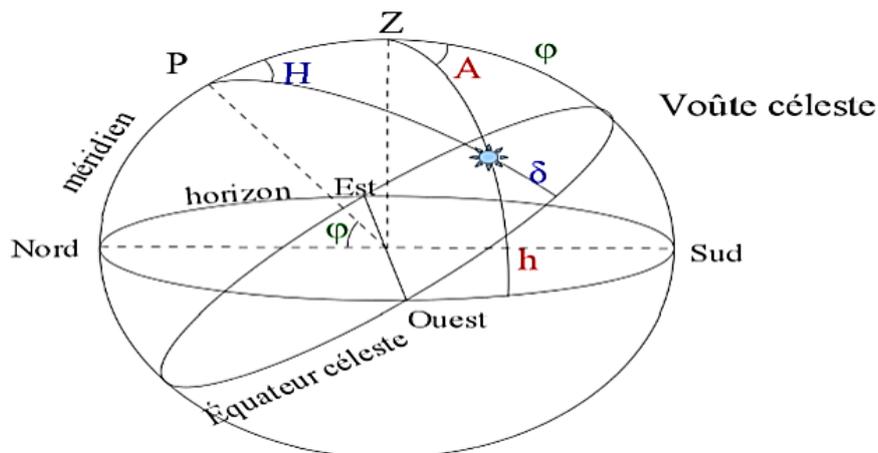


Figure III.1: Schéma montrant les différentes coordonnées angulaires.

III.2.1 Repère de coordonnées équatoriales :

Dans ce repère la position du soleil dans le ciel est déterminée par deux grandeurs :

- **La déclinaison (δ)** : C'est l'angle que forme entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. La déclinaison varie de façon sinusoïdale au cours de l'année, elle est nulle aux équinoxes et maximale aux solstices, elle varie de $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver à $+23,27^\circ$ au solstice d'été. Elle peut être évaluée en première approximation par la relation suivante : [8]

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (n - 81) \right] \quad (\text{III.1})$$

- δ est exprimée en degrés.
- n est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.
- **Angle horaire (ω)** : C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure le mouvement du soleil. L'angle horaire est donné par la relation suivante :[8]

$$\omega = 15 (\text{TSV} - 12) \quad (\text{III.2})$$

- TSV : temps solaire vrai.

Il vaut 0° à midi solaire, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la période de la terre dans sa rotation sur elle-même est égale à 24h. Compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir.

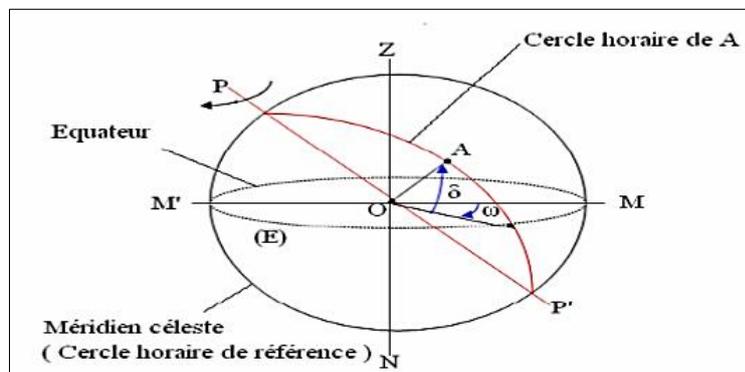


Figure III.2 : Les coordonnées horaires.

III.2.2 Repère de coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Dans ce repère les coordonnées du soleil sont :

- **Hauteur du soleil (h)** : C'est l'angle qui fait la direction de l'astre avec le plan horizontal. Il est donné par la relation suivante :[2]

$$\sin(h) = \cos(\varphi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\varphi) \times \sin(\delta) \quad (\text{III-3})$$

- **Azimut du soleil (a)** : correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :[2]

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (\text{III.4})$$

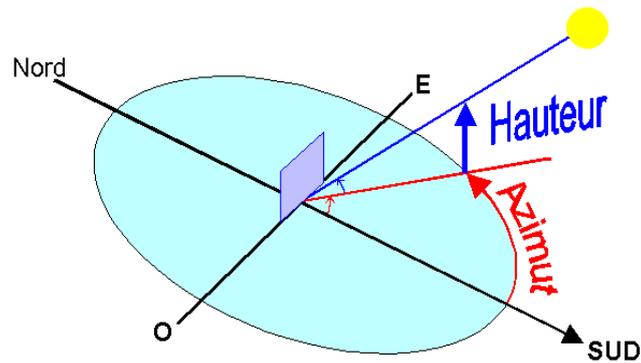


Figure III.3 : les coordonnées horizontales.

III.3 Paramètres de la position

Un point quelconque d'un lieu donné du globe peut être défini par les coordonnées suivantes :

- **Latitude (φ)** : C'est l'angle entre la verticale du lieu et le plan équatorial. Elle varie de -90° à $+90^\circ$, elle est positive vers le nord. [8]
- **Longitude (L)** : correspond à l'angle entre le plan méridien passant par ce lieu et le plan méridien origine (Green winch). [8]
- **Altitude(z)** : est la distance verticale entre ce point et une surface théorique de référence (surface de la mer). [8]

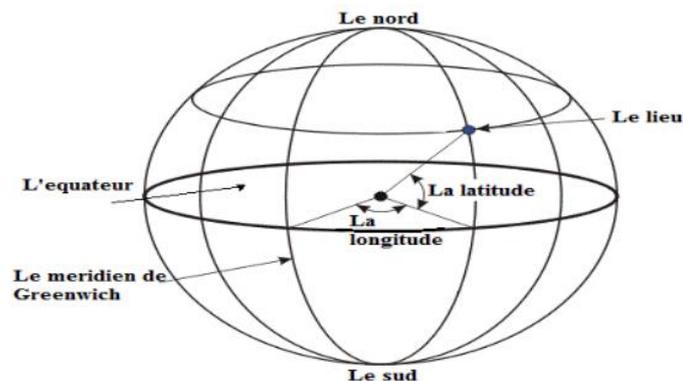


Figure III.4 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu donné.

III.4 Mouvement de la terre :

La terre décrit une ellipse dans son mouvement autour du soleil. La révolution complète d'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique. L'excentricité e de cette ellipse est très faible ($e=0,017$) aussi peut-on l'assimiler à un cercle en première approximation.

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cette rotation s'effectue en une journée. L'axe des pôles et l'écliptique font entre eux un angle appelé la déclinaison, il est égal à $23^{\circ}27'$.

C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 21 juin la distance terre-soleil est de 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement équinoxes de printemps et équinoxes d'automne. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux. Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (la déclinaison et horaire). [8]

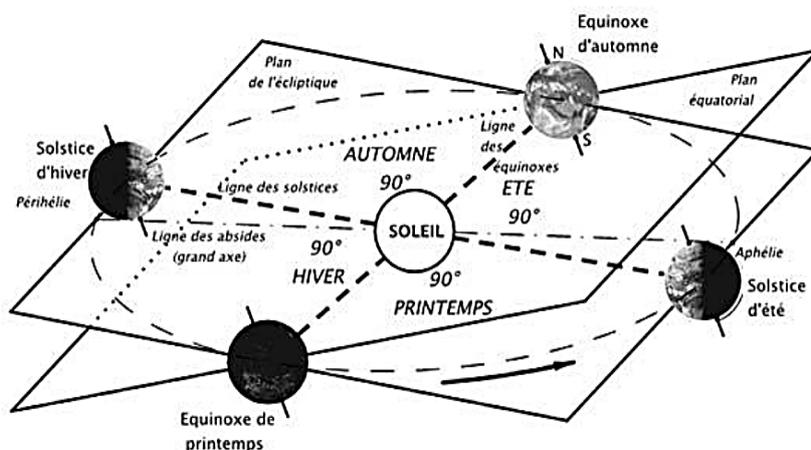


Figure III.5: Le mouvement de la terre au tour du soleil.

III.5 Paramètre du temps :

III.5.1 Temps Solaire Vrai (T.S.V) La position du soleil dans le ciel nous renseigne sur le temps solaire vrai TSV. C'est le temps donné par les cadrans solaires.[2]

Il est donné sous la forme suivante :

$$\text{TSV} = \text{TSM} + E_t \quad (\text{III-7})$$

Avec TSV en heurs et ω en degré.

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

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

III.5.2 Temps Solaire Moyen (T.S.M)

Il est appelé parfois temps locale (TL), et est donné par la relation :

$$\text{TSM} = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (\text{III-8})$$

III.5.3 Temps Universel (T.U)

Le temps universel TU est égal au TSM du méridien de Greenwich (méridien origine) appelé encore GMT (Greenwich Mean Time).

$$TU = TSM + (L / 15) \quad (III-9)$$

– L : est la longitude exprimée en degrés et le temps en heures.

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

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

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

III.5.4 Temps Légal (T.L)

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

$$TL = TU + \Delta H \quad (III-10)$$

$$\Delta H = C1 + C2$$

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

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

III.5.6 Equation du Temps

On appelle équation du temps la correction, positive ou négative, qu'il convient d'ajouter au temps solaire moyen pour connaître le temps solaire vrai $TSV = TSM + Et$, elle est exprimée par la relation suivante : [8]

$$Et = - 2.10^{-4} + 0,4197 \cos(\beta) - 7,3509 \sin(\beta) - 3,2265 \cos(2\beta) - 9,3912 \sin(2\beta) - 0,0903 \cos(3\beta) - 0,3361 \sin(3\beta) \quad (III-11)$$

$$\text{Avec : } \beta = \frac{360 * n}{365} \text{ [degré]}$$

III.5.7 Cas particuliers

Les quantités relatives au lever et au coucher du soleil ($h=0$) sont marquées de l'indice inférieur "0"

Et celles relatives au midi solaire (12h TSV, $a = \omega = 0$) de l'indice "m".

On a donc :

$$\text{Hauteur à midi solaire : } h_m = \sin^{-1}[\cos(\delta \times \varphi)]$$

$$\text{Angle horaire au coucher : } \omega_0 = \cos^{-1}[-\tan(\varphi) \times \tan(\delta)]$$

$$\text{Azimut au coucher : } a_0 = \cos^{-1}[\sin(\delta) / \cos(\varphi)]$$

$$\text{Durée du jour (en h) : } ddj = 2 \times (\omega_0 / 15)$$

☞ Remarque

Si $\tan \varphi \times \tan \delta \geq 1$, le soleil ne se couche pas ($a_0 = \omega_0 = 180^\circ$).

$\tan \varphi \times \tan \delta \leq -1$, le soleil ne se lève pas ($a_0 = \omega_0 = 0^\circ$).

III.6 Eclairage solaire

L'éclairage solaire correspond à la puissance solaire reçue par une surface plane élémentaire, appelée capteur. On distingue l'éclairage dû aux rayons solaires directs et celui dû au rayonnement solaire diffusés par le ciel ou réfléchies par une surface (le sol, un mur, ...). Cet éclairage bien sûr de l'orientation de la surface par rapport au soleil. Les grandeurs seront calculées en W/m^2 et seront notés par l'astérisque « * ».[2]

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes : Diffus et direct.[8]

III.6.1 Rayonnement direct $S^*(i)$

Est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère. Considérons un capteur élémentaire incliné d'un angle i par rapport à l'horizontale et orienté d'un angle γ par rapport au sud. L'éclairage direct S^* est la composante normale au capteur, de l'éclairage solaire I^* . On peut écrire : [6]

$$S^* = I^* \cdot \vec{k} \cdot \vec{n}$$

Avec : \vec{n} représente le vecteur unitaire normal à la surface élémentaire :

$$\vec{n} (\sin \gamma \cdot \sin i, \cos \gamma \cdot \sin i, \cos i).$$

et \vec{k} le vecteur unitaire donnant la direction du soleil :

$$\vec{k} (\cos h \cdot \sin a, \cos h \cdot \cos a, \sin h).$$

d'où il vient:

$$S^*(i, \gamma) = I^* [\sin(i) \cdot \cos(h) \cdot \cos(a - \gamma) + \cos(i) \cdot \sin(h)].$$

On peut remarquer que la surface n'est ensoleillée que si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\vec{k} \cdot \vec{n} > 0, \text{ d'où } S^* > 0.$$

Quand la lumière est rasante on a :

$$\vec{k} \cdot \vec{n} = 0 \text{ et } S^* = 0.$$

Quand

$\vec{k} \cdot \vec{n} < 0$, le soleil éclaire inutilement le dos de la surface réceptrice et l'on a $S^* = 0$.

Deux cas particuliers importants sont à considérer :

1. Le capteur est horizontal ($i=0^\circ$) : $S_h^* = I^* \cdot \sin(h)$

2. Le capteur est vertical ($i=90^\circ$) orienté au sud ($\gamma = 0^\circ$) : $S_v = I^* \cos(h) \cdot \cos(a)$

Avec - $90^\circ < a < 90^\circ$

III.6.2 Rayonnement diffus $D^*(i)$: C'est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée. Lorsque le capteur est horizontal ($i=0^\circ$) il reçoit le rayonnement diffusé par le ciel soit D_h^* [8]

Finalement on obtient :

$$D^*(i) = \left\{ \left(\frac{1+\cos i}{2} \right) D_h^* + \left(\frac{1-\cos i}{2} \right) a^* \cdot G_h^* \right\} \quad \text{(III-12)}$$

III.6.3 Rayonnement global G^* : C'est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. Les trois quantités, le rayonnement direct noté I, le rayonnement diffus D, et le rayonnement global G, Sont reliés par la relation suivante : [8]

$$G^* = S^* + D^* \quad \text{(III-13)}$$

$$D_h^* = G^* - I^* \sin h \quad \text{(III-14)}$$

✓ h est la hauteur du soleil.

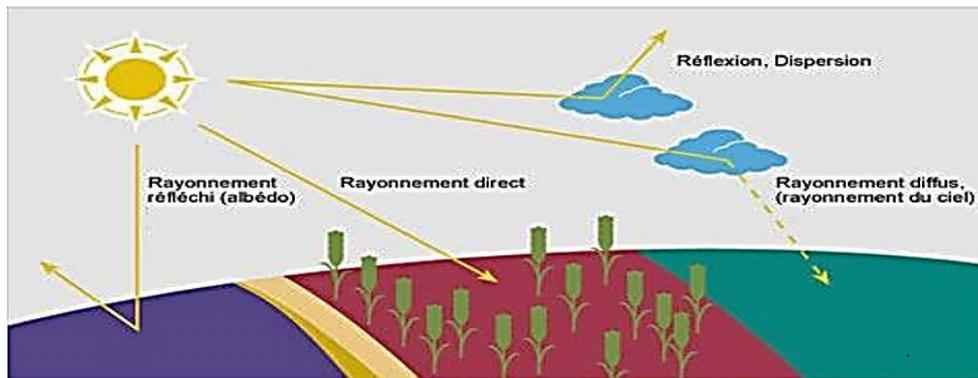


Figure III.6 : Rayonnement direct, diffus et global.

III.6.4 Rapports d'éclairement

Dans le cas de l'éclairement direct, on pose : $R_S = \frac{S^*(i,\gamma)}{S_h^*}$

De même on pose pour l'éclairement diffus : $R_D = \frac{D^*(i)}{D_h^*}$

Et pour l'éclairement global : $R_G = \frac{G^*(i,\gamma)}{G_h^*}$

Se définitions amènent aux résultats suivants :

$$R_S = \frac{\sin i \cdot \cos(a-\gamma)}{\tan h} + \cos(i) \quad \text{(III.15)}$$

$$R_D = \left(\frac{1+\cos i}{2}\right) + \left(\frac{1-\cos i}{2}\right).a \cdot \frac{G_h^*}{D_h^*} \quad (\text{III.16})$$

$$R_G = \left(R_S - \frac{1+\cos i}{2}\right) \frac{S_h^*}{G_h^*} + \frac{1+\cos i}{2} + \left(\frac{1-\cos i}{2}\right).a \quad (\text{III.17})$$

☞ *Remarque*

Si le calcul donne $R_S < 0$ alors prendre $R_S = 0$ dans les calculs. Ceci peut se produire si le soleil se trouve « derrière » le capteur

Dans le pratique pour que les rapports d'éclairement soient les plus élevés possibles, on incline le capteur d'un angle proche de la latitude du lieu ($i \approx \varphi$).

III.7 Irradiation hors atmosphère :

En déterminant l'irradiation hors atmosphère, on élimine le problème climatologique qui tient compte du lieu d'étude, de la saison et de la nébulosité du ciel.

De nombreuses mesures météorologiques ont permis d'établir des formules empiriques expriment l'irradiation au sol à partir de l'irradiation hors atmosphère.

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre, situé à une latitude φ Notons C_h^* l'éclairement solaire correspondant. [2]

On a: $C_h^* = C^* \cdot \sin h$

C^* : constante solaire.

Notons C_h l'irradiation journalière on a : $C_h = \int_{LS}^{CS} C_h^* dt = \int_{LS}^{CS} C^* \sin h dt$

remplaçant $\sin h$ par sa valeur :

$$C_h = C^* \int_{LS}^{CS} (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi) dt.$$

Remarque

Pour une journée et un lieu donné δ et φ sont fixés.

1 heure de temps correspond à une variation de 15° de l'angle horaire ω : $dt = \frac{12}{\pi} d\omega$

Si le temps en heure et ω en radians l'intégration donne alors :

$$C_h = \frac{24}{\pi} \frac{C^*}{1000} (\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot \omega_0 + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \sin \omega_0). \quad (\text{III.18})$$

Avec : C_h en KWh/m².J et $C^* = 1353 \text{W/m}^2$.

Une autre expression peut être écrite en considérant la durée du jour en heure et ω_0 en radians: $ddj = \frac{24\omega_0}{\pi}$

Les fractions circulaires étant calculées avec les angles en degrés, on obtient :

$$C_h = \frac{C^*}{1000} [\sin \delta \cdot \sin \varphi \cdot ddj + \cos \delta \cdot \cos \varphi \cdot \frac{24}{\pi} \cdot \sin (7,5 \cdot ddj)] \quad (\text{III.19})$$

III.7.1 Cas d'un ciel clair

Dans le cas où aucun nuage ne vient perturber le rayonnement solaire, on peut calculer aisément l'irradiation journalière en intégrant l'éclairement reçu tout au long de la journée, c'est-à-dire sur la durée ddj.

Les quantités relatives à ciel clair seront indicées par «0 » L'irradiation global par ciel clair, reçue par un plan horizontal, sera notée G_{0h} et calculée en écrivant : [2]

$$G_{0h} = \int_{Ls}^{Cs} G_h^* dt$$

Ls : l'heure de lever de soleil

Cs : l'heure de coucher de soleil

Cas d'une surface quelconque, on aura :

$$G_0(i, \gamma) = \int_{Ls}^{Cs} G^*(i, \gamma) dt = \int_{Ls}^{Cs} R_G(i, \gamma) \cdot G_h^* dt$$

Après intégration on obtient :

$$G_{0h} = \frac{2}{\pi} ddj \cdot G_{hm}^*$$

III.7.2 Cas d'un ciel variable

Seul un grand nombre de mesures locales peuvent permettre de prédire, avec une bonne approximation, l'énergie solaire qui pourra être récupérée en un lieu donné. [2]

III.7.2.1 Durée d'ensoleillement

Appelée durée d'insolation ddi, est un premier paramètre. On le caractérise par le facteur d'éclairement σ . celui-ci est égal au rapport de la durée d'insolation sur la durée du jour, On a donc par définition : [2]

$$\sigma = \frac{ddi}{ddj} \quad (III.20)$$

Mais l'énergie solaire reçue par une surface n'est pas seulement en fonction de la durée d'insolation, en effet il faut tenir compte de l'heure d'éclairement : une heure d'ensoleillement à midi sera plus intéressante sur le plan énergétique que la même durée à 9h du matin.

On introduit alors un nouveau facteur appelé facteur d'irradiation e , correspondant au rapport de l'énergie réellement reçue sur l'énergie qu'aurait reçue le capteur par ciel clair. On peut donc écrire finalement : $G(i, \gamma) = e \cdot G_0(i, \gamma)$

Une approche consiste à utiliser une formule empirique de la forme :

$$G_h = C_h = (a_1 + a_2 \cdot \sigma)$$

a_1, a_2 : coefficient dépendant de la climatologie locale.

C_h : l'irradiation de surface horizontale placée à la limite de l'atmosphère.

a_1 ; a_2 ; C_h σ dépendent de la période étude : la journée, le mois ou l'année.

Les paramètres (a_1 , a_2 , σ) varient nécessairement d'un site à autre il est nécessaire de se renseigner auprès des services météorologiques susceptibles de fournir ces indications. Un grand nombre de relevés journaliers permet de définir des valeurs annuelles moyennées sur le mois ou l'année.

On a essayé de caractériser ces valeurs annuelles par la climatologie du lieu : climat méditerranéen, continental, équatorial.

Climat	Exemple de lieu possédant ce climat	σ	a_1	a_2
		Valeurs Moyennes annuelles		
Aride chaud	Tamanrasset (Algérie)	0,83	0,30	0,43
Méditerranéen	Nice (France)	0,62	0,17	0,63
Continental humide	Atlanta (Géorgie, USA)	0,59	0,38	0,26
Froid humide	Hambourg (Allemagne)	0,36	0,22	0,57
Subtropical humide	Buenos aires (Argentine)	0,59	0,26	0,50
Tropical à moussons	Pune (inde)	0,37	0,30	0,51
Équatorial	Kisangani (zaïre)	0,48	0,28	0,39

Tableau III.1: Valeurs des coefficients annuels moyens, a_1 , a_2 .

Le tableau ci-dessous donne pour un ciel clair, c'est-à-dire sans nuage, les éclaircissement solaire I^* et G_h^* :

Conditions de trouble	I^* [W/m^2]	G_h^* [W/m^2]
Ciel très pur	$1210 \exp \left[-\frac{1}{6 \sin(h+1)} \right]$	$1130 (\sin h)^{1,15}$
Ciel moyennement troublé	$1230 \exp \left[-\frac{1}{3,8 \sin(h+1,6)} \right]$	$1080 (\sin h)^{1,22}$
Ciel trouble	$1260 \exp \left[-\frac{1}{2,3 \sin(h+3)} \right]$	$995 (\sin h)^{1,25}$

Tableau III.2 : Expressions empiriques des éclaircissements solaires en w/m^2 par ciel clair.

III.8. Instruments de mesure

La mesure du rayonnement solaire est assurée par des appareils spécifiques :

III.8.1 Pyrhéliomètre

Le pyrhéliomètre est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire directe. Il est généralement constitué par une thermopile peinte en noir, donc très absorbante, montée sur un système de suivi pointé vers le Soleil. Ainsi cet instrument ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil, à l'exclusion de celui issu du ciel ou de la Terre.

La lumière du Soleil pénètre dans l'instrument par une fenêtre et est ensuite dirigée sur la thermopile qui convertit la chaleur en un signal électrique qui est enregistré. Celui-ci est ensuite converti en une mesure équivalente exprimée en watts par mètre carré. [15]



Figure III.7: Pyrhéliomètre.

III.8.2 Héliographe

L'héliographe est un instrument qui permet de mesurer la durée de l'insolation en un point de la surface de la planète. Plus précisément, il enregistre la durée pendant laquelle le rayonnement solaire est d'une intensité suffisante pour produire des ombres distinctes. L'héliogramme est le diagramme d'enregistrement d'un héliographe. [16]



Figure III.8: Héliographe.

III.8.3 Pyranomètre

Le pyranomètre est un instrument pour mesurer l'irradiance solaire (directe et diffuse) qui atteint la surface terrestre. Avec cet instrument, il est possible de mesurer non seulement le rayonnement global, mais aussi le rayonnement solaire réfléchi (albédomètre) et le rayonnement diffus au moyen d'une bande d'occultation.

Le pyranomètre mesure des valeurs de rayonnement dans la gamme de longueurs d'onde de 300 à 3000 nm, avec une visibilité de 2π stéradians. L'élément utilisé pour la mesure est une thermopile dont la surface extérieure a été assombrie par une peinture noire mate afin de porter le pouvoir réfléchissant à moins de 2% ($\rho < 0,02$) dans la gamme spectrale du capteur. [17]



Figure III.9 : Pyranomètre.

III.9. Conclusion

Le but de ce chapitre était de présenter les paramètres liés au soleil, ainsi que les instruments de mesure des rayonnements solaires.

Les paramètres solaires sont principalement la position du soleil où on a défini les trois paramètres latitude, longitude et altitude ; l'éclairement solaire qui est dû aux rayons solaire directs et aux rayons diffusés, et l'irradiation hors atmosphère.

Pour les instruments de mesure des rayonnements solaires, on a présenté trois appareils qui sont les pyréliomètres, les héliographes et les pyranomètres.

Partie –II–

Chapitre IV : Les capteurs solaires plans

IV.1 Introduction

Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Sans concentration du rayonnement solaire, le flux d'énergie tombant sur une surface située au niveau de la mer ne peut guère dépasser $1\text{KW}/\text{m}^2$. Cette valeur ne permet pas d'atteindre des températures supérieures à 100°C . Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent les composantes directe et diffuse du rayonnement incident .Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et chauffage d'habitation ou de piscines. [2]

L'objet de ce chapitre est de définir les capteurs solaires plans passant par leur principe de fonctionnement et les différents types de ces capteurs. Le type de capteurs que nous avons choisi pour notre étude est le capteur solaire plan à air.

Ce chapitre présente également la méthode de calcul du rendement d'un capteur solaire plan.

IV.2 les Capteurs solaires plans

Le capteur solaire plan est un système thermique qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique.

La chaleur reçue de cette conversion est utilisée soit directement (cas de chauffage), soit elle-même convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire des cycles thermodynamiques.

Son principe de fonctionnement est basé sur l'effet de serre qui consiste à piéger le rayonnement solaire, où ce dernier arrive au niveau du couvert et le traverse pour atteindre une surface revêtue d'une peinture noire, appelée absorbeur.

L'absorbeur va absorber une grande partie du rayonnement solaire entraînant une augmentation de sa température. Le rayonnement réfléchi par l'absorbeur arrive sur la vitre et comme celle-ci est opaque aux rayonnements infrarouges, le rayonnement est ainsi piégé.

Le rôle d'un capteur solaire thermique est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air,...). [4]

IV.2.1 Classification des capteurs solaires thermiques

On peut classer les capteurs solaires thermiques selon les critères suivants :

1) Le fluide de travail utilisé, où on peut trouver:

- a) Des capteurs solaires à air
- b) Des capteurs solaires à eau

(Dans ce travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique plan à air).

2) L'orientation des capteurs, où il existe deux types :

a) Des capteurs fixes

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

- La simplicité et la fiabilité.
- Ils peuvent faire partie intégrante d'une construction (toit ou mur).

b) Des capteurs à poursuite

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

IV.2.2 Capteur plans à eau :

Dans les capteurs thermiques à eau, l'eau ou plus souvent un liquide caloporteur, circule dans des tubes en circuit fermé.

Pour obtenir un meilleur rendement, les tubes peuvent être "sous-vide" c'est-à-dire que la surface des tubes est double et qu'entre ces deux couches est fait le vide. Ceci permet d'obtenir un effet de serre.

Ce système représente la première technologie de capteurs, la moins performante actuellement. L'absorbeur est alors placé à l'intérieur du tube ou sous la plaque vitrée, il est chauffé par le rayonnement solaire et transmet la chaleur au liquide caloporteur qui circule dans les tubes.

Les capteurs solaires à eau sont utilisés pour produire de l'eau chaude sanitaire (ECS) dans un chauffe-eau solaire individuel (CESI). [6]

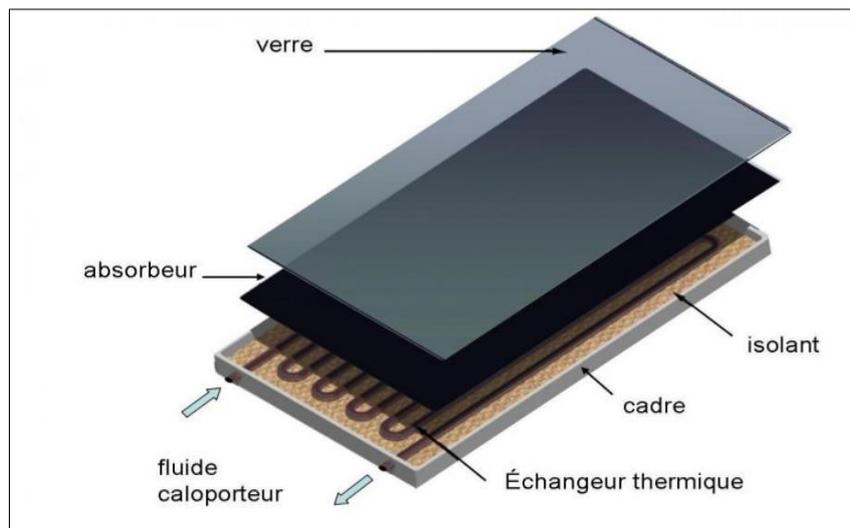


Figure IV.1: Différents éléments d'un capteur solaire plan à eau.

IV.2.3 Capteur plan à air :

Les capteurs plans à air sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évitent 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. [6]

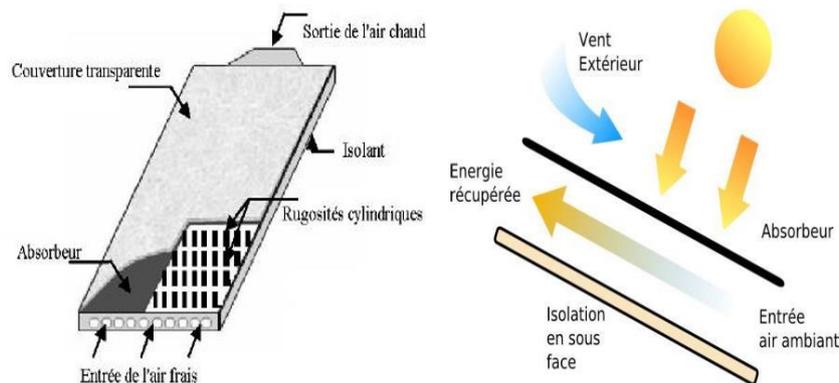


Figure IV.2 : Capteur plan à air

IV.3 Principe de fonctionnement d'un capteur plan :

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

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

L'isolation thermique en dessous et autour du capteur diminue les déperditions thermiques et augmente ainsi son rendement. [10]

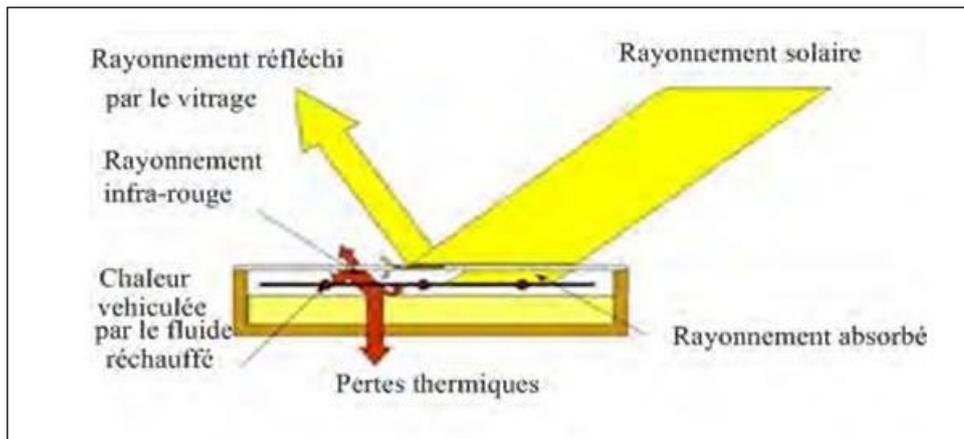


Figure IV.3 : Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan

IV.4 Différents types des capteurs solaires

IV.4.1 Capteur sans vitrage : (aussi appelé capteur "moquette")

Il ne comporte pas de couverture et est souvent constitué uniquement :

- ✓ d'absorbants (métalliques ou en plastique).
- ✓ de faisceaux de tubes cylindriques ou ovalisés parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes.

Les pertes thermiques étant dans ce cas élevées.

Il est peu sensible à l'angle d'incidence du rayonnement. Les températures courantes de fonctionnement ne dépassent jamais 30°C, ce qui limite leur emploi :

- ✓ au chauffage des piscines.
- ✓ au préchauffage d'eau chaude.



Figure IV.4 : Capteurs non vitrés sur un toit de piscine

IV.4.2 Capteur vitré :

Le capteur muni d'une couverture transparente, souvent appelé « capteur vitré », est le plus utilisé, car il correspond au domaine d'application le plus courant : le chauffage de l'eau sanitaire. La température d'utilisation est en général inférieure à 70 °C. Plus rarement, un capteur vitré, muni d'une couverture transparente de type « double vitrage », permet d'atteindre des températures de fonctionnement de l'ordre de 100 °C. [6]

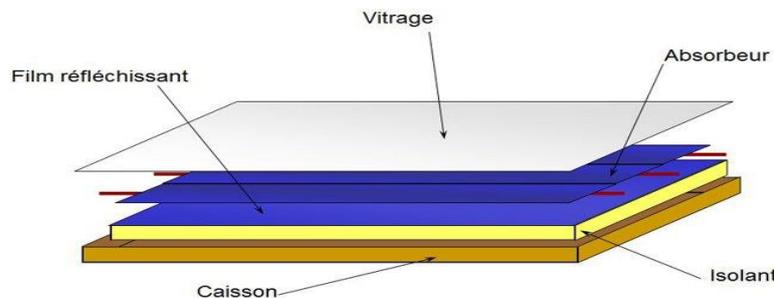


Figure IV.5 : Capteur solaire plan vitré

IV.4.3 Capteur sous vide

Ce type de capteur utilise le vide comme isolation thermique, il possède donc un très bon rendement à hautes températures. Il est composé :

- ✓ D'une série de tubes de verre sous vide, de faible diamètre (jusqu'à une quinzaine de centimètres).
- ✓ D'un absorbeur à l'intérieur des tubes de verre.
- ✓ Des tubes en cuivre à l'intérieur d'un tube de verre.

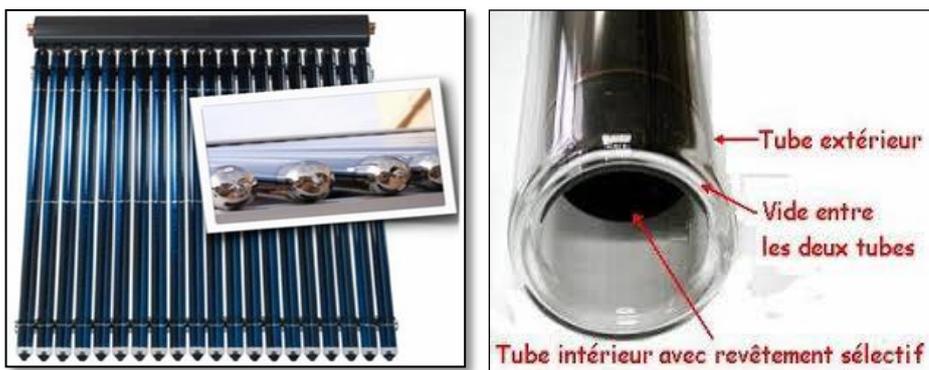


Figure IV.6: Les capteurs à tube sous vide

IV.5 Élément de construction :

IV.5.1 Absorbeur

L'absorbeur est un élément essentiel du capteur solaire. Il doit absorber la plus grande partie du rayonnement solaire et transmettre la chaleur produite vers le fluide caloporteur avec un minimum de perte.

La fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbée par l'absorbeur est appelée facteur d'absorption solaire α^* (absorptivité) de la surface.

Le complément à 1 de cette fraction correspond au facteur de réflexion solaire ρ^* (réflectivité) dans la mesure où la plaque est opaque et donc que le facteur de transmission solaire τ^* (transmissivité) est nul.

Un absorbeur doit avoir les caractéristiques suivantes :

- ✓ Un bon coefficient d'absorption.
- ✓ Une bonne conductivité thermique.
- ✓ Une bonne résistance à la corrosion.

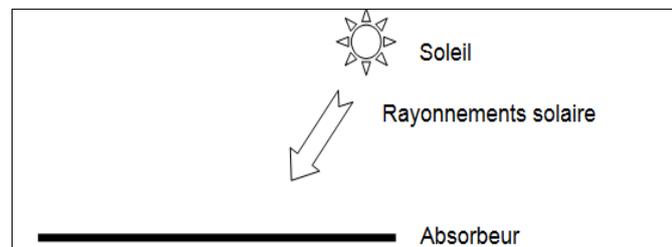


Figure IV.7: Schéma d'un capteur plan limité à la seule plaque absorbante.

L'absorbeur en chauffant va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonnée sur l'énergie que rayonnerait la surface considérée comme un corps noir est appelée facteur d'émission infrarouge (ϵ) ou émissivité.

L'émittance E d'une surface à la température T s'écrit : $E = \epsilon \sigma T^4$

Où (σ) est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.

Les matériaux utilisés sont :

- Le cuivre : c'est le meilleur absorbeur, mais le plus coûteux.
- L'aluminium : sa légèreté et sa conductivité sont appréciables, il est parmi les métaux qui résiste à la corrosion grâce à la couche d'alumine (AL₂O₃), sa surface est recouverte d'une couche mince de peinture noire, afin d'augmenter le pouvoir d'absorption.
- Les matières plastiques : ont l'avantage par rapport aux métaux, d'être plus légères et insensibles à la corrosion.

Dans le tableau ci-dessous sont données les caractéristiques de divers métaux pouvant être utilisés comme absorbeur.

Métal	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Chaleur massique C_p [J/Kg.K]	Masse volumique ρ [Kg/m ³]	Diffusivité a [m ² /s]
Cuivre	384	398	8900	108
Acier inoxydable	14	460	7800	4
Aluminium	204	879	2700	86

Tableau IV.1 : Caractéristiques thermo physiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Pour diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont souvent revêtus d'une couche sélective. Pour la plupart des capteurs, le revêtement sélectif est obtenu à partir de nickel et de chrome.

Les modes de revêtements les plus courants sont donnés au Tableau :

Revêtement	Absorption	Emission
Peinture noire	0,92-0,97	0,95
Chrome noir sur cuivre (sélectif)	0,95	0,14
Chrome noir sur acier (sélectif)	0,91	0,07
Tinox (sélectif)	0,95	0,05

Tableau IV.2: Revêtements des surfaces d'absorbeur.

IV.5.2 Fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau .

Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants :

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été lorsque le soleil "tape" fort.
- Avec de l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion.

- Toute fuite est sans conséquence.
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus faible.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

L'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux.

Le produit de la masse volumique ρ par la chaleur spécifique C_p est faible :

$\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ pour l'air contre $4,2 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3 \text{ K}$ pour l'eau.

Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu du point précédent.

Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.[2]

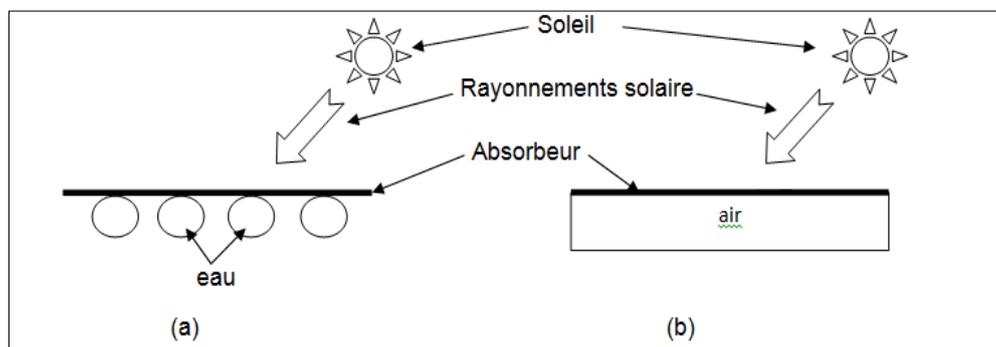


Figure IV.8: Schéma d'un capteur plan avec son système d'évacuation

de la chaleur : a) à eau, b) à air

IV.5.3 Vitrage ou couverture transparente

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

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

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

Soit un capteur exposé au rayonnement solaire, sa couverture est transparente au rayonnement visible mais opaque aux rayonnements U.V et I.R. A la surface de la terre, le rayonnement

solaire est composé de 42% de rayonnement visible qui va être transmis à l'absorbeur lequel en chauffant va réémettre du rayonnement I.R. [11]

IV.5.4 Effet de serre :

L'effet de serre est souvent mis à profit pour la conversion thermique à base de température du rayonnement solaire. On désigne normalement par "effet de serre", l'ensemble des modifications apportées à l'équilibre énergétique et thermique d'un corps récepteur (le sol par exemple). [4]

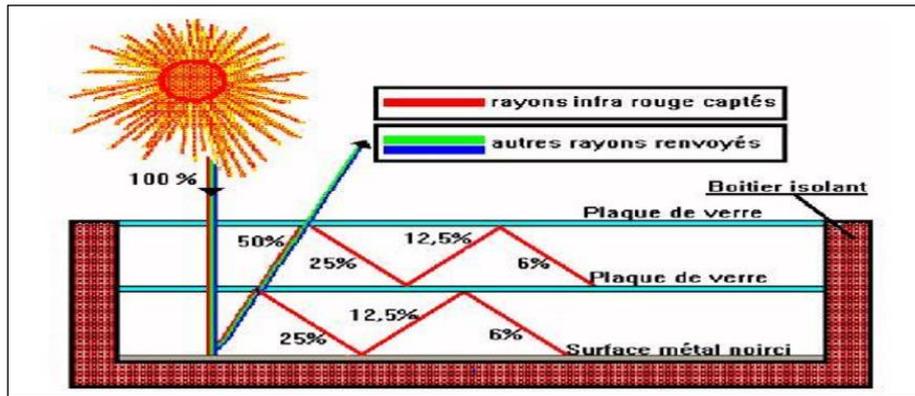


Figure IV.9 : L'effet de serre dans un capteur solaire thermique

IV.5.5 Isolation thermique

L'isolation thermique permet de diminuer les pertes et ralentit le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire.

Un bon isolant doit avoir les qualités suivantes :

- Une faible densité (pour une faible inertie thermique).
- Une faible conductivité thermique.
- La chaleur massique doit être basse.
- Une résistance thermique dans l'intervalle des températures de services.[6]

Dans le tableau ci-dessous sont données les caractéristiques de différents matériaux pouvant servir d'isolant.

IV.5.6 .Coffre ou la cadre

Le coffre du capteur renferme les différents actifs. Il devra donc assurer une protection efficace aux agents atmosphériques.

Les coffres de capteurs sont réalisées soit en fine feuille de métal (acier galvanisé, aluminium, inox) avec protection par revêtement stable aux intempéries.

Le coffre ou cadre doit permettre d'assurer sa fixation sur la couverture tout en lui permettant de se déplacer librement. Le vitrage est généralement posé avec un joint élastomère insensible aux rayonnements ultraviolets et avec un profile mécanique autorisant des opérations de montage et démontage aisées des celui-ci. [4].

Matériau	Conductivité thermique λ [W/m.K]	Masse volumique ρ (Kg /m ³)	Chaleur massique C _P J/Kg.K	Diffusivité $a = \lambda / \rho \cdot C_p$ [10 ⁻⁷ m ² /s]
Laine de verre	0.036	40	840	10,7
Mousse de polyuréthane	0.029	30	1600	6,0
Bois de pin	0.118	500	1210	1,95
Papier	0.14	700	1340	1,5
Brique	0.697	1700	900	4 ,6
Air (à 20°c)	0.025	1,2	1003	208

Tableau IV.3: Propriétés thermiques de quelques matériaux pouvant servir d'isolant.

IV.6 Utilisation d'un capteur solaire plan à Air

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

- Chauffer les locaux.
- Activer la croissance des végétaux.
- Sécher les grains et les fourrages.
- Sécher les produits (agro-alimentaires).[11]

IV.7 Avantages et inconvénients d'un capteur plan

✓ Avantages

- Coût du capteur relativement bas.

- Le capteur peut être installé au sol comme il peut être aussi intégré architecturalement (toits, balcons, etc.).
- Il possède un degré de rendement élevé.

✓ **Inconvénients**

- Baisse du rendement d'utilisation en hiver à cause des pertes thermiques élevées.
- Risque de salissement de la surface de l'absorbeur par dépôt de poussière particulièrement dans les régions arides et semi arides.
- Possibilité de condensation au vitrage de capteur. [8]

IV.8 Rendement d'un capteur plan

IV.8.1 Bilan énergétique du capteur plan

Soit Q^* l'énergie solaire absorbée par un capteur, une partie de celle-ci est récupérée par le fluide caloporteur c'est l'énergie utile Q_u . Cette énergie peut être directement utilisée ou bien transférée vers un système de stockage (ballon d'eau chaude par exemple). Un capteur solaire est aussi sujet à des pertes thermiques. Une partie de l'énergie absorbée est transférée vers l'environnement sous forme d'énergie thermique principalement par convection et rayonnement. Ces pertes seront notées Q_a .

Enfin si on s'intéresse à une période de mise en température du système (au démarrage par exemple) il faudra tenir compte de l'énergie absorbée par le capteur nécessaire à cette montée en température. Cette énergie notée Q_t , dépend de l'inertie thermique de l'installation.[2]

Ainsi le bilan thermique global s'écrit :

$$Q^* = Q_u + Q_a + Q_t \quad (IV-1)$$

En termes de puissance on aura :

$$\dot{Q}^* = \dot{Q}_u + \dot{Q}_a + \dot{Q}_t \quad (IV-2)$$

L'étude la plus significative des performances thermiques d'un capteur plan est de déterminer son rendement instantané défini comme étant le rapport entre le flux utile récupéré, sur l'éclairement solaire global incident sur le capteur.

Si on note G^* la puissance solaire globale reçue par le capteur, son rendement sur une durée s'écrit :

$$\eta = \frac{\int \dot{Q}_u dt}{\int G^* dt}$$

Où η est le rendement instantané du capteur solaire.

Si les conditions sont constantes sur une période de temps, l'efficacité diminue à :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} \tag{IV-3}$$

Pour l'établissement des bilans énergétiques ou thermiques du capteur solaire en régimes permanent ou transitoire, on est amené à considérer chaque partie du capteur comme un nœud, sur lequel nous établirons un bilan thermique.

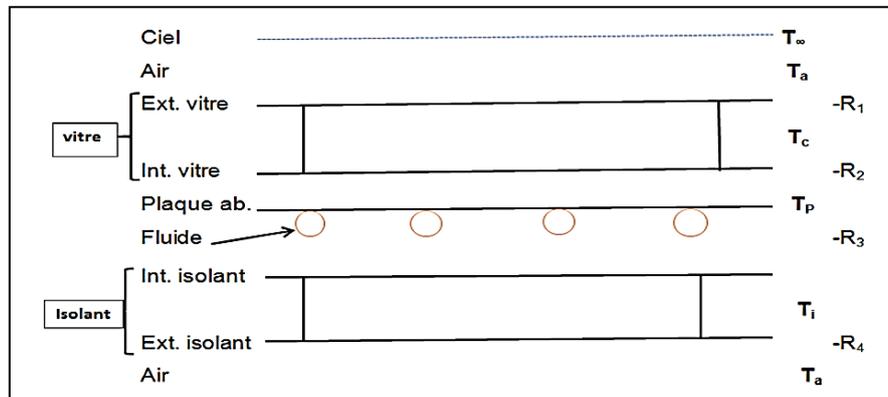


Figure IV.10: Différents nœuds et l'analogie électrique équivalent relative du capteur.

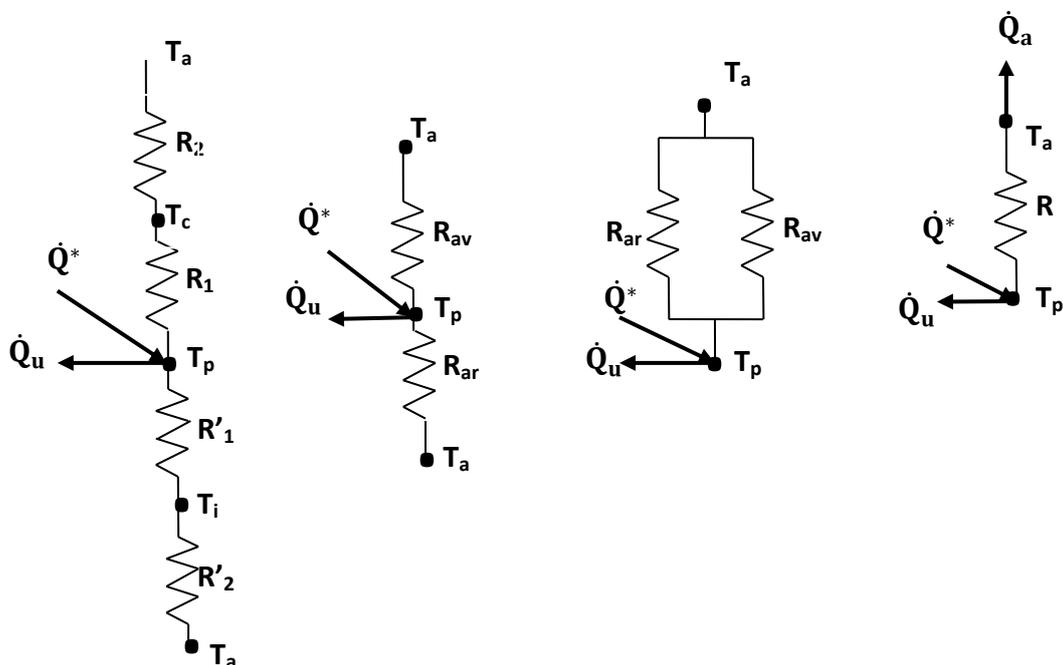


Figure IV.11: Analogie électrique permettant de déterminer le flux thermique perdu avec l'environnement à la température T_a . [2]

A partir du schéma électrique équivalent on définit :

R_1 : Résistance thermique entre le milieu ambiant T_a et la vitre T_c . On a affaire à des échanges thermiques par convection et rayonnement

Soit h_{c1} et h_{r1} les coefficients d'échanges thermiques relatifs respectivement à la convection et au rayonnement. On a :

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1}h_{r2}} \quad (IV-4)$$

R_2 : Résistance thermique entre la vitre T_c et l'absorbeur T_p . La résistance thermique est l'inverse de la conductance thermique. Dans notre cas, cette dernière est la somme de deux termes : une conductance due à la convection naturelle qui règne dans l'air confiné entre la surface absorbante et la vitre et une autre due au phénomène d'échange radiatif intervenant entre ces deux surfaces à températures différentes. On notera donc h_{c2} et h_{r2} les coefficients correspondants. Et par suite :

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2}h_{r2}} \quad (IV-5)$$

R_1 et R_2 étant en série, la résistance vers l'avant du capteur R_{av} s'écrit :

$$R_{av} = R_1 + R_2$$

R_3 : Résistance thermique créée par l'isolant (entre l'absorbeur et la face interne l'isolant), on a affaire à la conduction pure. Le coefficient d'échange par conduction dans le cas d'un mur semi-infini s'écrit :

$$R_3 = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (IV-6)$$

Où λ_i est la conductivité thermique de l'isolant et e_i son épaisseur

R_4 : Résistance thermique entre la face externe de l'isolant et le milieu ambiant. En générale cette résistance peut être négligée d'autant plus que la température de surface de l'isolant étant le plus souvent très proche de celle de l'air ambiant T_a .

De même que pour l'avant, on définit une résistance thermique arrière R_{ar} qui s'écrit :

$$R_{ar} = R_3 + R_4$$

La similitude électrique permet d'écrire :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1+R_2} + \frac{1}{R_3+R_4} \quad (IV-7)$$

Et en utilisant les conductances thermiques :

$$K = K_{av} + K_{ar} \quad (IV-8)$$

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

$$\text{Et } K_{ar} = \frac{1}{R_3+R_4} \approx \frac{1}{R_3} \quad \text{Puisque : } R_4 \approx 0$$

Le flux thermique échangé avec l'environnement à T_a s'écrit :

$$\dot{Q}_a = k. (T_p - T_a) \quad (IV-9)$$

On en déduit le rendement instantané, égal au rapport de l'énergie utile sur l'éclairement solaire G^* reçue par le capteur :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} = \frac{\dot{Q}^* - \dot{Q}_a}{G^*} = (\tau_c^* \cdot \alpha_p^*) - \frac{\dot{Q}_a}{G^*}$$

On appelle rendement optique du capteur, que l'on note v^* , le produit du coefficient de transmission solaire de la vitre par le coefficient d'absorption solaire de la surface absorbante.

$$v^* = \tau_c^* \cdot \alpha_p^* \quad (IV-10)$$

Finalement le rendement instantané (en fonction T_p) en régime permanent du capteur plan s'écrit :

$$\eta = v^* - k \frac{T_p - T_a}{G^*} \quad (IV-11)$$

IV.8.2 Influence de la température d'entrée de fluide caloporteur

Il paraît plus judicieux de chercher à déterminer le rendement du capteur en fonction, Non pas la température T_p de l'absorbeur, mais plutôt en fonction de la température T_{fe} du fluide à l'entrée du capteur. L'expression qui permet de connaître la température de sortie T_{fs} du fluide caloporteur en fonction de sa température d'entrée T_{fe} .

La puissance fournie au fluide par mètre carré de capteur s'écrit : [8]

$$\dot{Q}_u = \dot{M} \cdot C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (IV-12)$$

$$\text{Posons : } F_t = \frac{\dot{M} \cdot C_p}{K} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{FK}{\dot{M} C_p}\right) \right\} \quad (IV-13)$$

F_t : Appelé le facteur de transfert thermique, ce facteur représente le rapport de flux thermique réel reçu par le fluide sur celui qui serait récupéré si la surface absorbante était isotherme à T_{fe}

\dot{M} : Le débit massique, telle que : $\dot{M} = \frac{\dot{m}}{p \cdot L}$

\dot{m} : Débit massique de fluide, telle que : $\dot{m} = \frac{\rho \dot{v}}{nt}$

F : Rendement d'irrigation.

$$F = \frac{1}{\frac{P}{D_e + 2 \cdot w \cdot \eta_w} + \frac{p \cdot k}{\chi \cdot h_c}} \quad (IV-14)$$

χ : le périmètre de mouillé, telle que : $\chi = \pi \cdot D_i$

η_w : terme pour simplifier, telle que : $\eta_w = \frac{th(m.w)}{m.w}$

$$m = \sqrt{\frac{k}{\lambda_p \cdot e_p}} \quad \text{et} \quad w = \frac{p - D_e}{2}$$

Ce facteur de transfert sera proche de l'unité dans les cas de débits importants et un fonctionnement de capteur à basse température.

On a donc

$$\dot{Q}_u = F_t \times [\dot{Q}^* - K (T_{fe} - T_a)] \quad (\text{IV-15})$$

D'où le rendement instantané :

$$\eta = F_t \left\{ v^* - k \frac{(T_{fe} - T_a)}{G^*} \right\} \quad (\text{IV-16})$$

IV.9 .Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les capteurs solaires, les types de ces capteurs, les éléments de construction de ces capteurs, leur principe de fonctionnement, leur domaine d'application et leurs avantages et inconvénients.

Le rendement d'un capteur solaire plan est un paramètre nécessaire à calculer, où nous avons présenté la méthode de calcul de ce rendement.

Partie –II–

Chapitre V : Résultats et Interprétations

V.1 Introduction

Nous nous sommes intéressé dans ce chapitre de présenter et interpréter les résultats des calculs effectués sur le capteur solaire plan à air. Les mesures ont été faites dans des conditions bien précises où l'état du ciel était clair et très pur et le capteur a été orienté à plein sud.

Ces calculs ont pour but de déterminer l'influence de l'albédo, latitude et le rayonnement global sur le rendement instantané.

V.2 Problématique

Pour calculer les rendements instantanés η d'un capteur plan à air, il faut d'abord déterminer les éclaircissements globaux G^* . Nous avons choisi deux cas :

- 1^{er} cas : on fixe latitude φ et on prend trois valeurs pour l'albédo a^*
- 2^{ème} cas : on fixe l'albédo a^* et on prend trois valeurs pour latitude φ

Pour les graphes on utilise l'origine telle que les calculs manuel.

La journée choisie est celle du 17 Novembre telle que le vent est parallèle au capteur de vitesse $w = 4$ m/s et la température choisie est de $T_C = 15^\circ\text{C}$.

Dans la pratique pour que les rapports d'éclaircissement soient les plus élevés possibles, on incline le capteur d'un angle proche de la latitude du lieu ($i \approx \varphi$).

Température ambient T_a	10 °C
Température de l'absorbeur T_p	60 °C
Coefficients d'émission infrarouge de l'absorbeur ε_p de la vitre ε_c	$\varepsilon_p = 0,95$ $\varepsilon_c = 0,85$
Distance de l'absorbeur vitre b	0,025m
Conductivité thermique λ_i	0,045 w/m.K
Epaisseur de l'isolant e_i	0,05m
Rendement optique ν^*	0,85
Temps solaire varie TSM	11h
Fluide caloporteur	Air

Tableau V.1: Les données pour les calculs.

Le tableau suivant représente les résultats obtenu du calcul du rendement instantané et l'éclairement global pour latitude fixée.

Latitude ϕ (°)	Albédo a^*	Rayonnement global G^* (w/m ²)		Rendement instantané η (%)	
		G^*	G^*	η	η
0	0,15	G_{11}^*	1001,05	η_{11}	42
		G_{21}^*	895,02	η_{21}	38
		G_{31}^*	499,87	η_{31}	4,57
30	0,37	G_{12}^*	1001,05	η_{12}	42
		G_{22}^*	905,52	η_{22}	39
		G_{32}^*	508,04	η_{32}	5,87
60	0,80	G_{13}^*	1001,05	η_{13}	42
		G_{23}^*	924,28	η_{23}	40
		G_{33}^*	523,76	η_{33}	8,24

Tableau V.2 : Les résultats obtenus pour une valeur fixe de latitude

V.3 Evolution du l'éclairement global en fonction de l'albédo

Figure V.1 présente l'évolution du l'éclairement global en fonction de l'albédo pour différentes valeurs de latitude. Les courbes montrent que l'albédo n'a aucun effet sur l'éclairement global pour le capteur solaire horizontal, alors que si le capteur est incliné, les éclaircissements augmentent avec l'augmentation de l'albédo.

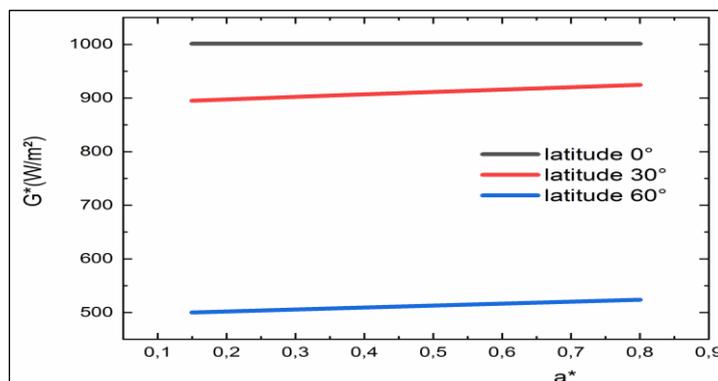


Figure V.1 Evolution du l'éclairement global en fonction de l'albédo

V.4 Evolution de rendement instantané en fonction de l'albédo

Figure V.2 illustre l'évolution du rendement instantané en fonction de l'albédo pour différentes valeurs de la latitude. Les courbes indiquent que le capteur solaire horizontal a un meilleur rendement instantané par rapport aux autres. la croissance de rendement instantané en fonction de l'albédo.

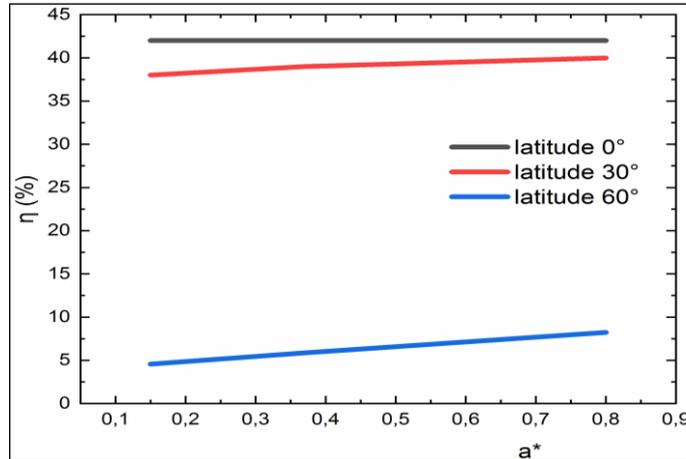


Figure V.2 : Evolution de rendement instantané en fonction de l'albédo.

V.5 Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global (latitude fixe)

Figures V.3, V.4 et V.5 représentent l'évolution du rendement instantané en fonction de l'éclairement global pour différentes valeurs de la latitude. L'évolution du rendement instantané est présenté par un point dans la figure V.3, ce qui signifie que le rayonnement global n'a aucune influence sur le rendement si latitude est égale 0° . Figure V.4 indique que le rendement augmente en fonction du rayonnement global pour une latitude de 30° , et cette augmentation est linéaire dans la figure V.5 pour une latitude de 60° .

Ces trois figures montrent que si le capteur est horizontale (latitude est égale 0°), le rayonnement reçue par le soleil est absorbé plus que le cas d'un capteur incliné, et que l'augmentation de la latitude induit à une diminution du rendement instantané.

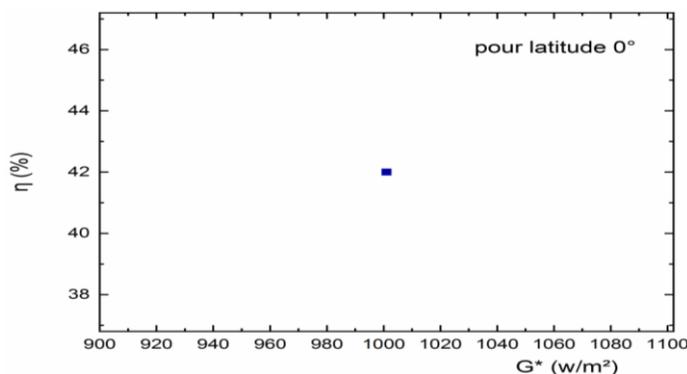


Figure V.3: Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 0^\circ$

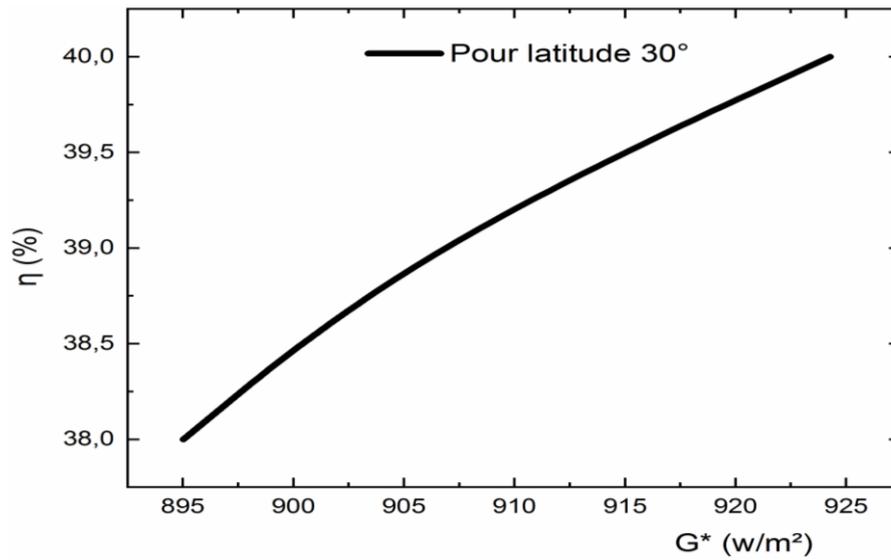


Figure V.4: Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 30^\circ$.

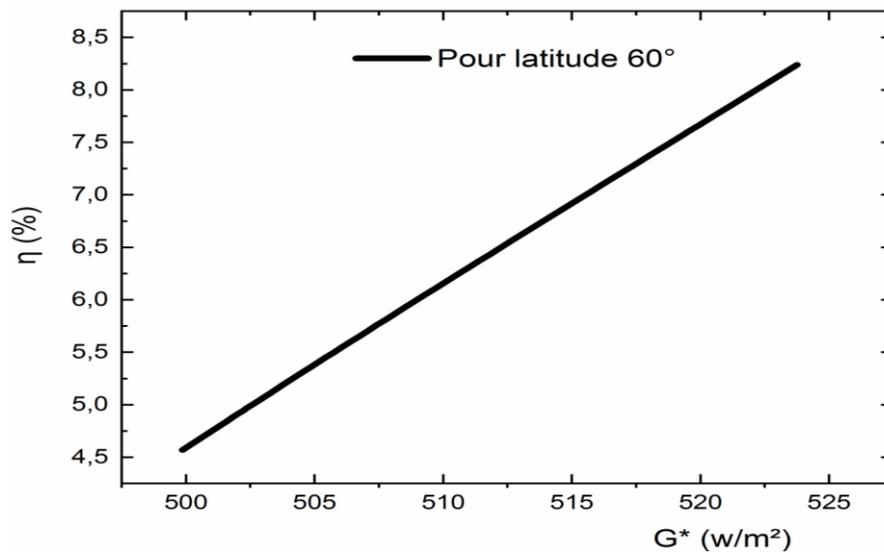


Figure V.5 : Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global si $\varphi = 60^\circ$

Le tableau suivant représente les résultats obtenus dans les calculs du rendement instantané et l'éclairement pour l'albédo fixée.

Albédo a^*	Latitude φ ($^\circ$)	Rayonnement global G^* (w/m^2)		Rendement instantané η (%)	
		G^*	G^*	η	η
0,15	0	G_{41}^*	1001,05	η_{41}	42
		G_{51}^*	1001,05	η_{51}	42
		G_{61}^*	1001,05	η_{61}	42
0,37	30	G_{42}^*	895,02	η_{42}	38
		G_{52}^*	905,52	η_{52}	39
		G_{62}^*	924,28	η_{62}	40
0,80	60	G_{43}^*	499,87	η_{43}	4,57
		G_{53}^*	508,04	η_{53}	5,87
		G_{63}^*	523,76	η_{63}	8,24

Tableau V.3 : Les résultats obtenus pour une valeur fixe de l'albédo

V.6 Evolution du l'éclairement global en fonction du la latitude

L'influence de la latitude sur l'éclairement global est présentée dans la figure V.6 pour différentes valeurs de l'albédo. Les courbes indiquent que la variation de l'éclairement global diminue avec l'augmentation de latitude, ce qui signifie que l'augmentation de la latitude influe sur le rayonnement absorbé.

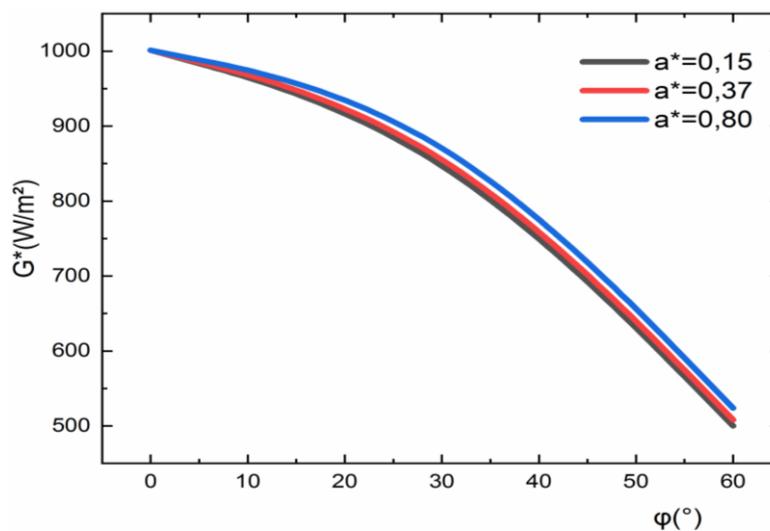


Figure V.6 Evolution de l'éclairement global en fonction du la latitude

V.7 Evolution de rendement instantané en fonction de latitude

L'effet de la latitude sur le rendement instantané pour différentes valeurs de l'albédo est présenté dans la figure V.7. Les trois courbes montrent que le rendement instantané diminue avec l'augmentation de la latitude, ce qui indique que l'inclinaison du capteur solaire a une influence sur le rendement instantané.

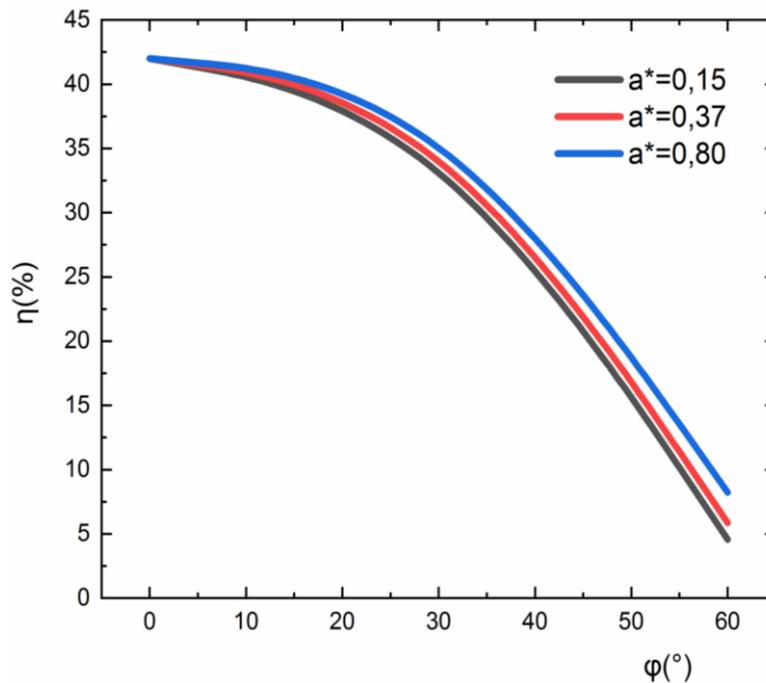


Figure V.7: Evolution de rendement instantané en fonction de la latitude

V.8 Evolution de rendement instantané en fonction de rayonnement global (albédo fixe)

Figures V.8, V.9 et V.10 représentent l'évolution du rendement instantané en fonction du rayonnement global pour trois valeurs de l'albédo. Ces figures montrent que les trois courbes ont la même allure. D'autre part, le rendement instantané augmente avec le rayonnement global, ce qui indique que l'influence de la nature de surface telle que le mer froide, sable clair et nuage.

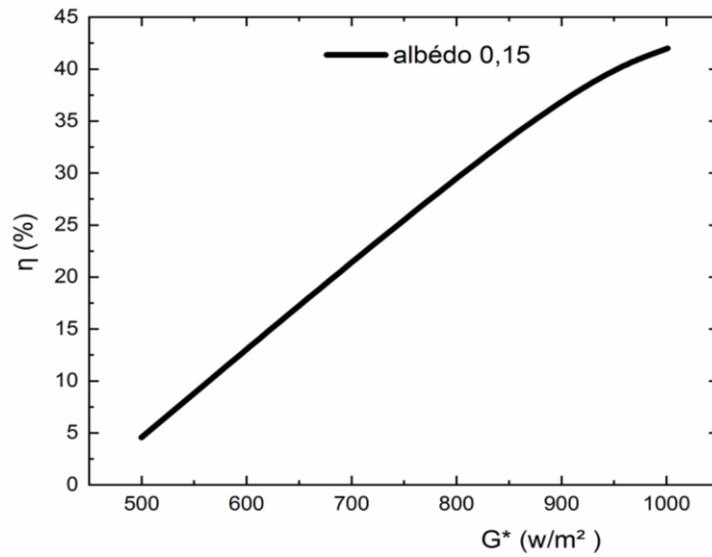


Figure V.8: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,15$

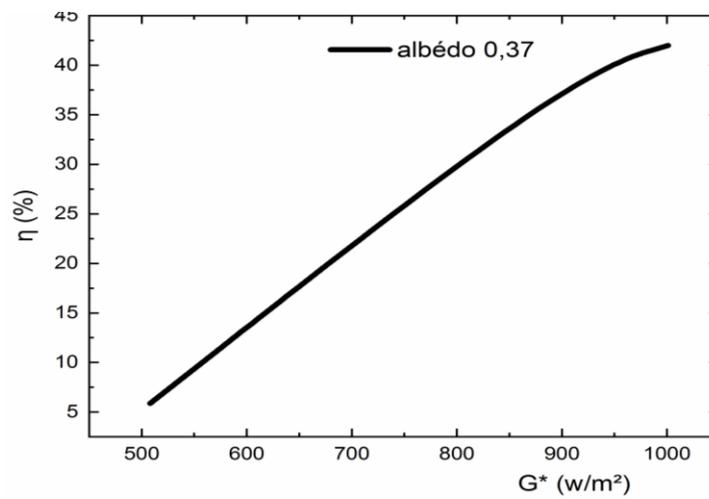


Figure V.9: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,37$

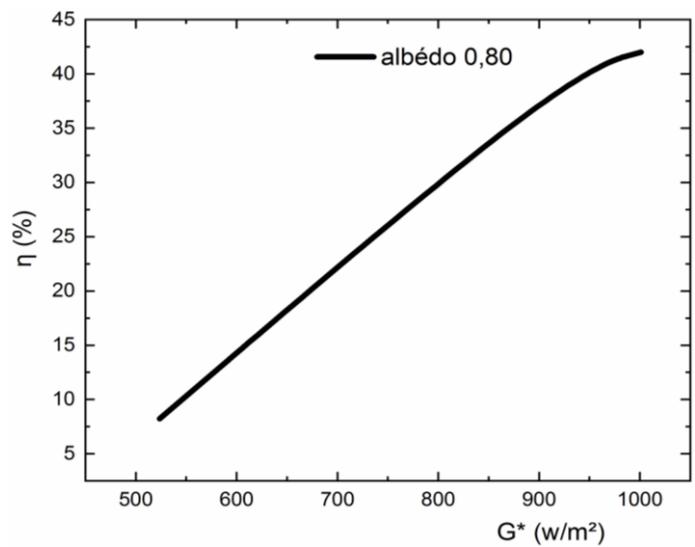


Figure V.10: Evolution de rendement instantané en fonction du rayonnement global si $a^* = 0,8$

V.9 Conclusion

L'objectif du présent chapitre est de présenter et interpréter les résultats obtenus pour l'étude d'un capteur solaire plan à air. Pour l'ensemble des résultats obtenus, Nous avons conclu que :

Les courbes de l'influence de rayonnement incidente, réfléchi et l'angle d'inclinaisons d'un capteur solaire sur le rayonnement global qui indique l'état de ciel est très clair et pur et la nature de la surface données par exemple (mer froide, sable clair et nuage) .

L'évolution de rendement instantané est une fonction croissante avec l'influence de rayonnement incidente et réfléchi ; on remarque pour l'influence de capteur solaire la décroissance de rendement instantané

L'éclairement global n'a aucune influence sur le rendement instantané si le capteur est horizontal.

D'une autre part l'influence de l'éclairement global si le capteur horizontal le rendement instantané est constant montre que l'influence de la latitude sur le rendement instantané telle que la fonction croissante, et les mêmes fonctions pour l'influence de la nature de surface.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche en énergies renouvelable est devenue l'intérêt primordial de l'humanité en raison de leur grande importance dans divers domaines.

L'énergie solaire est la plus intéressante à utiliser vu qu'elle a considérablement évolué avec le développement de la technologie.

Le soleil produit de la chaleur et de la lumière nécessaires à la vie sur terre, pour cela en utilisant les centrales solaires thermiques pour recevoir l'énergie solaire.

On utilise des capteurs solaires qui transforment le rayonnement solaire en chaleur, cette chaleur peut être utilisée dans le chauffage des bâtiments ou être transformée en courant électrique à l'aide de matériaux semi conductance appelée cellules solaires.

La performance des capteurs dépend de leur type d'exploitation, de l'amélioration du pourcentage de captation et de rayonnement solaire pour augmentation de rendement instantané.

L'objectif de ce projet de fin d'étude est de faire une étude sur un capteur solaire plan à air afin d'expliquer l'influence de la latitude, l'albédo et l'éclairement global sur le rendement instantané d'un capteur plan à air. L'étude a été faite où l'état du ciel était clair et très pur et le capteur a été orienté à plein sud. Les résultats obtenus ont été présentés et interprétés dans le dernier chapitre de cette mémoire.

Références bibliographiques

Articles

- [1] **AMARDJIA-ADNANI** ALGERIE ENERGIE SOLAIRE ET HYDROGENE
Développement durable HANIA office DES PUBLICATIONS UNIVERSITAIRES 5-2007
- [2] **J. BERNARD**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipses Edition Marketing.
(2004).
- [3] **Sylvain Bringand** Installations solaires photovoltaïque Editions le moniteur.
- [9] J,Bonal;P,Rossetti.Les énergies alternatives, Omniscience. (2007).

Ouvrages

- [4] Mémoire de master **MOGHARBI-HALASSA** Conception et réalisation d'un capteur solaire plan à air GM Option énergétique 2010/2011 Université Kasdi MERBAH de Ouargla
- [5] Mémoire de master **NADJI NEDJEMEDDINE** Étude des performances d'un capteur solaire plan à conversion thermique GM spécialité énergétique et environnement 2017/2018 UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA
- [6] Mémoire de master Hammoumi Mohamed +Morghad Hassan.pdf Étude Expérimentale d'un capteur solaire plan à air spécifique au séchage GM Option Génie énergétique 2013 Université ABOU-BEKR BELKAID –Tlemcen-
- [7] Mémoire de magister Amraoui Mohamed Amine pdf. Etude numérique d'un capteur solaire plan à air Influence de la forme de la rugosité GM option machines thermiques 2011-2012
- [8] Mémoire de master **DJEDAH+HAGAR** DETERMINATION DU RENDEMENT INSTANTANEE D'UN CAPTEUR SOLAIRE PLAN À EAU GM option énergétique 2016/2017 UNIVERSITÉ IBN KHADOUN DE TIARET
- [10] Mémoire de master **CHAROUAT Ahmed +BOULAKHRAS Morsli** Etude et calcul du rendement d'un capteur solaire plan à air GM spécialité énergétique 2016 /2017 UNIVERSITÉ IBN KHADOUN DE TIARET
- [11] Mémoire de master **SAFAR HOUARI** Etude d'un capteur solaire plan à Air GM spécialité énergétique 2011 /2012 UNIVERSITÉ IBN KHADOUN DE TIARET
- [12] Mémoire de master **Aliou Doumbaye Maiga Moutari + IssoufaTahmodi Nouhan** Etude et modélisation d'une installation photovoltaïque GM spécialité énergétique 2017 / 2018 UNIVERSITÉ IBN KHADOUN DE TIARET
- [13] Mémoire de master **KHADRAOUI ZAKARIA** .pdf Etude d'une centrale solaire thermique GM spécialité énergétique et environnement 2017

[14] Mémoire magister YACINE Fouad ETUDE DES NOUVELLES GENERATIONS DE CELLULES PHOTOVOLTAIQUES Département de physique -Option Rayonnement et Matière 2010/2011 Université Mohamed Boudiaf(USTO.MB) Oran

Sites web

[15] Pyrhéliomètre définition simple et facile du dictionnaire –L’Internaute

[https://www.linternaute .fr](https://www.linternaute.fr) > dictionnaire

[16] <https://educalingo.com/fr/dic-fr/héliographe>

[17] [https://www.campbells ci.fr /cmp6](https://www.campbells.ci.fr/cmp6)

[18] énergie renouvelable. Solaire thermique guide –ST.pdf

[https://www.landes.fr/files/cg40/envirennement /guide -ST.pdf](https://www.landes.fr/files/cg40/envirennement/guide-ST.pdf)

Annexes

✓ Caractéristiques De L'air

T °C	ρ kg/m ³	C_p J/kg.K	μ 10 ⁻⁶ Pa.s	ν 10 ⁻⁶ m ² /s	λ 10 ⁻³ W/m.K	a 10 ⁻⁶ m ² /s	Pr
0	1,292	1000	17,0	13,2	23,8	18,4	0,716
5	1,269	1001	17,3	13,6	24,1	19,0	0,717
10	1,247	1001	17,5	14,1	24,4	19,6	0,717
15	1,225	1002	17,8	14,5	24,8	20,2	0,718
20	1,204	1003	18,0	14,9	25,1	20,8	0,719
25	1,184	1003	18,2	15,4	25,5	21,4	0,719
30	1,164	1004	18,5	15,9	25,8	22,0	0,720
35	1,146	1005	18,7	16,3	26,1	22,7	0,720
40	1,127	1006	18,9	16,8	26,4	23,3	0,721
45	1,110	1006	19,2	17,3	26,8	24,0	0,721
50	1,092	1007	19,4	17,8	27,1	24,6	0,722
55	1,076	1008	19,6	18,2	27,4	25,3	0,722
60	1,060	1009	19,9	18,7	27,7	25,9	0,723
65	1,044	1010	20,1	19,2	28,0	26,6	0,723
70	1,029	1010	20,3	19,7	28,3	27,3	0,724

ρ masse volumique

C_p chaleur spécifique

μ viscosité dynamique

λ conductivité thermique

a diffusivité ($\frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$)

Pr Nombre de Prandtl

Les nombres sans dimension que l'on rencontre sont les suivants, avec x la longueur caractéristique (on m)

Nombre de Prandtl : $Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$

Nombre de Grashof : $Gr_x = \frac{\rho^2 \Delta T \cdot x^3}{\mu^2 \cdot T}$

Nombre de Nusselt : $Nu = \frac{h \cdot x}{\lambda}$

– Convection naturelle

Entre deux plaques planes définissant un volume fermé

$$h = \frac{Nu \cdot \lambda}{b}$$

$$\text{Gr} < 1700 + 47,8 i$$

$$\text{Nu} = 1,013$$

$$\text{Gr} > 80000$$

$$\text{Nu} = 2,5 + 0,0133(90-i)$$

Autrement

$$\text{Nu} = [0,06 + 3 \cdot 10^{-4}(90 - i)] \text{Gr}^{0,33}$$

N_u Nombre de Nusselt

– **Convection forcée :**

Air sur une plaque plane

Cette corrélation sert principalement au calcul de l'échange thermique par convection forcée due au vent sur un capteur plan.

$$h = 5.7 + 3.8 w$$

Résumé

Dans cette mémoire de Master, nous avons fait une étude théorique sur l'énergie solaire et les différentes centrales solaires, une réception sur l'énergie solaire, les composent du capteur solaire plan à air, et en fin nous avons calculés le rendement instantané en fonction des paramètres solaire dans des conditions bien précise telles que l'orientation du capteur solaire plan à air vers le sud, l'état de ciel et la journée choisie. Le rendement instantané du capteur solaire a été étudié en fonction de la latitude, l'albédo et l'éclairement global, où les résultats obtenus ont montré que ces paramètres ont des influences très importantes sur le rendement instantané.

Mots clés : Energie solaire, capteur solaire plan, rendement instantané.

Abstract

In this Master thesis, we did a theoretical study on solar energy and different solar power plants, a reception on energy, make up the solar collector air plane, and in the end we calculated the instantaneous efficiency based solar parameters under specific conditions such as the orientation of the solar collector plane to the south, the state of the sky and the chosen day. The instantaneous efficiency of the solar collector was studied as a function of latitude, albedo and overall illumination, where the results obtained showed that these parameters have very important influences on the instantaneous efficiency.

Key words: Solar energy, flat solar collector, instantaneous efficiency.

ملخص

في رسالة الماجستير هذه ، قمنا بدراسة نظرية حول الطاقة الشمسية ومحطاتها المختلفة ، واستقبال على هذه الطاقة وانواع الملتقطات الشمسية المسطحة الهوائية ، وفي النهاية قمنا بحساب الكفاءة اللحظية استنادًا إلى المعلومات الشمسية في ظل ظروف محددة مثل اتجاه اللاقط الشمسي إلى الجنوب ، وحالة السماء واليوم المختار. دراسة الكفاءة اللحظية للاقط الشمسي بدلالة خطوط العرض وانعكاس الاشعة الشمسية المنبعثة والإضاءة الشاملة، حيث أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن هذه المعلومات لها تأثيرات مهمة عليها..
الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، اللاقط الشمسي المسطح ، الكفاءة اللحظية.