

UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET

DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



MEMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

Pour L'obtention du Diplôme de Master

Domaine : Sciences & Technologie

Filière : Génie Mécanique

Cycle : Master

Spécialité : Mécanique Énergétique

THÈME

**DÉTERMINATION DU RENDEMENT INSTANTANÉE D'UN
CAPTEUR SOLAIRE PLAN À EAU**

Préparé par :

**MAHAMAT SALEH HAGGAR
AHMED DJEDDAH**

Soutenu publiquement le 15/06/2017 devant le jury composé de :

SAD CHEMLOUL NOURDINE	M.C.A	Président
MEKKROUSSI SAID	M.C.B	Examineur
BELKACEM ABED	M.C.A	Encadreur

PROMOTION 2016/2017

Dédicaces

À mes chers parents

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices, bien que je ne vous en acquitte jamais assez. Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur, une longue vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A ma grand-mère chérie qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur, puisse Dieu lui prêter longue vie et beaucoup de santé et de bonheur dans les deux vies.

A tout ma famille **DJEDDAH** et **BENTABET**, je vous adore trop, vous êtes super !!

À tous mes amis de toujours **HAMID**, **RACHID**, **SAID**, en souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

A tous les membres de ma promotion. A tous mes enseignants depuis mes premières années d'études.

A tous ceux qui me sont chers et que j'ai omis de citer.

AHMED DJEDDAH

Dédicaces

Merci **ALLAH** de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et de dire " **Ya Kayoum** ".

À ma mère **ZENABA**, ma source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Tes prières et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites, tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.

A mon défunt père **SALLEH HAGGAR**, école de mon enfance, qui a été mon ombre et qui a veillé sur moi de son vivant jusqu'à sa mort. Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse **ALLAH**, le tout puissant t'accorde sa miséricorde.

A mes petits frères **ABAKAR** et **BECHIR** et ma très chère grande sœur **RAKIE**.

A Toute la **Famille HAGGAR**.

A mes très chères amies de la résidence universitaire 2000 lits-Tiaret.

A toute la promotion mécanique (**énergétique**) sans exception.

A tous ceux qui ont sacrifié leur temps pour la science et à tous ceux qui utilisent la science pour le bien et la prospérité de l'humanité.

MAHAMAT SALEH HAGGAR

Remerciements

On remercie **Allah** le tout puissant de nous avoir donné l'opportunité, la santé, et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire dans les bonnes conditions.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de **Mr ABED BELKACEM**. On le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire.

Merci à **Mr GUICHICHE**, enseignant au département de physique de nous aider à établir un programme de calcul sur Matlab et pour ses conseils pleins de sens.

Nous adressons nos remerciements à Monsieur le Président de jury et Messieurs les membres de jury d'avoir accepté de nous faire l'honneur de juger ce travail.

Nos profonds remerciements s'adressent également à tous nos enseignants du département du génie mécanique pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles et pour le travail énorme qu'il effectue pour nous créer les conditions les plus favorables pour le déroulement de nos études.

Nos remerciements vont également à l'endroit de tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Sommaires

Dédicaces	
Remerciements	
Nomenclature	
Liste des figures, images et tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I. Introduction	3
I.1 Les différentes énergies renouvelables	3
I.1.1 L'énergie hydraulique – Hydroélectricité.....	3
I.1.2 L'énergie éolienne.....	4
I.1.3 La biomasse.....	4
I.1.4 La Géothermie.....	5
I.1.5 Les Avantages et inconvénients des énergies renouvelables.....	5
I.1.6 L'énergie solaire	6
I.1.6.1 Origine.....	6
I.1.6.2 Caractères particuliers.....	7
I.1.6.3 Captation.....	7
I.2 le soleil	8
1- L'intérieur du soleil.....	9
2- La photosphère.....	9
3- La chromosphère et la couronne solaire.....	9
I.2.1 Rayonnement solaire.....	9
I.2.2 Le rayonnement solaire hors atmosphère.....	10
I.2.3 Le gisement solaire en Algérie.....	10
I.2.4 Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire.....	12
I.2.5 Constante solaire.....	13
I.2.6 Albédo	14
I.3 différentes centrales solaires.....	15
I.3.1 Centrale photovoltaïque	15

a. Principe.....	15
b. les avantages	16
c. les inconvénients.....	16
I.3.2 les concentrateurs.....	17
I.3.3 Les Centrales thermodynamiques.....	17
a. Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques.....	17
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.....	21
I.3.4 Domaine d'application.....	23
a. Moyen naturel.....	23
b. Applications techniques de l'énergie solaire.....	23
I.4 conclusion.....	23

Chapitre II : Réception de l'énergie solaire

II. Introduction.....	24
II.2 Calcul de la position du soleil.....	24
II.2.1 Repère de coordonnées équatoriales.....	24
II.2.2 Repère de coordonnées horizontales.....	25
II.3 Paramètre de la position.....	26
II.3.1 Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre.....	26
II.3.2 Angle d'incidence sur un plan	26
II.3.3 Orientation d'un plan quelconque.....	27
II.4 Le mouvement de la terre.....	27
II.5 Paramètre du temps	28
II.5.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V).....	28
II.5.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M).....	28
II.5.3 Le Temps Universel (T.U).....	28
II.5.4 Le Temps Légal (T.L).....	28
II.5.6 L'équation du Temps.....	28

II.5.7 Cas particuliers.....	29
II.6 Eclairage solaire	29
II.6.1 Le rayonnement direct.....	29
II.6.2 Le rayonnement diffus.....	30
II.6.3 Le rayonnement global.....	30
II.6.4 Rapports d'éclairage	31
II.7 Irradiation hors atmosphère	31
II.7.1 Cas ciel claire.....	32
II.7.2 Cas ciel variable.....	32
II.7.2.1 La durée d'ensoleillement.....	32
II.8 Instrument de mesure.....	34
II.8.1 Le Pyrhéliomètre	34
II.8.1.2 Applications de mesures par Pyrhéliomètre	35
II.8.2 L'héliographe.....	35
II.8.2.2 Utilité.....	35
II.8.3 Pyranomètre.....	35
II.9 conclusion.....	36

Chapitre III : les capteurs solaires plans

III-1 introduction.....	37
III.2 les Capteurs solaires plans	37
III.2.1 Classification des capteurs solaires thermiques.....	38
III.2.2 le capteur plans à air.....	39
III.2.3 le Capteur plans à eau.....	39
1)-Capteurs plans non vitrés.....	40
2)-Capteurs plans vitrés.....	40
3)-Capteurs plans à haute performance.....	40
III.3 Description d'un capteur solaire plans.....	42
III.3.1 Élément de construction.....	43
III.3.1.1 Absorbeur.....	43
III.3.1.2 le fluide caloporteur.....	45

III.3.1.3 Le vitrage ou la couverture transparente.....	46
III.3.1.4 Effet de serre.....	48
III.3.1.5 Isolation thermique.....	49
III.3.2 Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré.....	50
III.3.2.1 caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires.....	51
III.4 Rendement d'un capteur plan.....	52
III.4.1 Bilan énergétique du capteur plan.....	53
III.4.2 Influence de la température d'entrée de fluide caloporteur.....	56

Chapitre IV : Résultats et interprétation

IV. Introduction.....	58
IV.1 Problématique.....	58
IV.2 Méthode.....	58
IV.3 Analyse des données.....	58
IV.4 Interprétation des résultats.....	59
IV.4.1 Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global)	59
IV.4.2 Evolution de l'éclairement global.....	60
VI.4.3 Evolution des températures de sortie du fluide caloporteur.....	61
IV.4.4 Evolution du rendement instantané du capteur	62
Conclusion générale.....	64
Annexes	65
Références et bibliographiques.....	67
Résumé	69

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
TSV	Temps solaire vrai	Heures
n	Nombre de jour de l'année	Jours
a	L'azimut	Degré
L	Longitude de lieu	Degré
φ	Latitude de lieu	Degré
Ω	L'angle horaire	Degré
Δ	La déclinaison	Degré
G^*	Rayonnement global	W/ m ²
h_c	Coefficient d'échange par convection	W/m ² . °c
ddi	Durée du jour	Heur
a^*	Albédo	-
K	Conductance thermique	w/m ² .°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
F_t	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.m ²
χ	La périmètre mouillé	m
C_p	La capacité calorifique du fluide	Kj/kg.K
Et	Equation de temps	Minute
C_h	L'irradiation journalière	Kw.h/m ²

Nomenclature

Lettres grecques	Désignation	Unité
α	Coefficient d'absorption	Sans unité
β	Inclinaison du capteur	Degré
τ	Coefficient de transmission	Sans unité
η	Rendement instantané	Sans unité
λ_i	Conductivité thermique d'un corps d'indice i	W/m. k
ρ	Masse volumique d'un corps d'indice i	Kg/m ³
μ	Viscosité dynamique	Kg/m. s
ε	Coefficient d'émissivité	Sans unité
σ	Constante de Stefan Boltzmann	W/m ² . K ⁻⁴
τ^*	Le coefficient de transmission	Sans unité
K_d	Coefficient de dilatation	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

Liste des figures, images et tableaux

Les figures :

Figure 1 : centrale hydroélectrique.....	4
Figure 2 : centrale géothermique.....	5
Figure 3 : Structure du soleil.....	9
Figure 4 : Schéma descriptive de l'albédo.....	15
Figure 5 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque.....	16
Figure 6 : central à effet de cheminée.....	22
Figure 7 : Les coordonnées horaires.....	24
Figure 8 : Les coordonnées horaires.....	25
Figure 9 : Les coordonnées célestes horizontal.....	26
Figure 10 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu donné.....	26
Figure 11 : le mouvement de la terre au tour du soleil.....	27
Figure 12 : Rayonnement direct, diffus et global.....	30
Figure 13 : Capteur plan à air.....	39
Figure 14 : Différents éléments d'un capteur solaire plan à eau	42
Figure 15 : plaque absorbante d'un capteur solaire.....	43
Figure 16 : capteur solaire plan à eau avec son système d'évacuation.....	45
Figure 17 : L'effet de serre dans un capteur solaire thermique.....	48
Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré.....	50
Figure 19 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan.....	53
Figure 20 : Différents nœuds et l'analogie électrique équivalent relative du capteur.....	54
Figure 21 : Evolution de l'éclairement (D^* , S^* , G^*) pour le Cas d'un ciel très pur.....	59

Liste des figures, images et tableaux

Figure 22 : Evolution de l'éclairement pour le Cas d'un ciel moyennement troublé.....	59
Figure 23 : Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global) pour le Cas d'un ciel troublé.....	60
Figure 24 : Evolution de l'éclairement global pour les trois (03) Cas.....	60
Figure 25 : Evolution de la température de sortie du fluide pour les trois Cas.....	62
Figure 26 : Evolution du rendement instantané du capteur pour les trois (03) Cas.....	63

Les images :

Image 1 : Eolienne avec hélices spéciales.....	4
Image 2 : différentes utilisations de la biomasse.....	5
Image 3 : énergie solaire.....	6
Image 4 : différents rayonnements solaires.....	10
Image 5 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.....	11
Image 6 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné.....	12
Image 7 J.H. Lambert.....	14
Image 8 : les capteurs cylindro-paraboliques.....	18
Image 9 : Les miroirs paraboliques.....	19
Image 10 : centrale à miroir Fresnel.....	20
Image 11 : centrale à tour.....	21
Image 12 : Le Pyrhéliomètre.....	34
Image 13 : L'héliographe.....	35
Image 14 : Pyranomètre.....	36
Image 15 : capteur à revêtement sélectif.....	41

Liste des figures, images et tableaux

Image 16 : Capteur sous vide.....42

Les tableaux :

Tableau 1 : Caractéristiques principales du soleil.....8

Tableau 2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.....11

Tableau 3 : L'écarte relatif du flux solaire par rapport à la C^*13

Tableau 4 : albédo solaire de différentes surfaces.....14

Tableau 5 : valeurs des coefficients annuels moyens σ , a_1 , a_233

Tableau 6 : expressions empiriques des éclairement solaires en w/m^2 par ciel clair.....34

Tableau 7 : Caractéristiques thermo physiques des matériaux utilisés comme absorbeur..44

Tableau 8 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.....44

Tableau 9 : Caractéristiques optiques des matériaux.....47

Tableau 10 : Caractéristiques optiques des matériaux.....47

Tableau 11 : propriétés des quelques matériaux pouvant servir d'isolant.....49

Tableau 12 : Les caractéristiques du capteur étudié.....58

Introduction générale

Introduction Générale

Depuis la révolution industrielle du XIXème siècle, l'utilisation de l'énergie d'origine fossile a pris de l'ampleur. Compte tenu de l'épuisement de ces énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature, il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme l'énergie solaire.

La consommation mondiale énergétique augmente malheureusement au détriment de l'environnement qui nous entoure, d'une part, et non renouvelable d'autre part. En effet, les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel, etc...) sont utilisées de manière abusive. Ces énergies sont polluantes et limitées. Aujourd'hui la communauté scientifique reconnaît la responsabilité de cette consommation sur le réchauffement climatique qui risque d'avoir des effets dramatiques sur les équilibres physiques, économiques sociaux et politiques de notre planète. Le recours à des énergies propres pour assurer la sécurité énergétique et le développement économique et social des populations devient incontournable. Les énergies renouvelables et spécialement le solaire devrait être la tendance en tenant compte de la sécurité de l'approvisionnement et de la protection de l'environnement, ce choix est motivé par le fait que la quantité d'énergie solaire reçue chaque jour par la planète est 5 fois supérieure à la totalité des consommations quotidiennes humaines (nucléaire, charbon, bois, fioul, gaz, hydraulique...).

L'énergie solaire est la plus dominante parmi les énergies renouvelables et aussi la plus facilement exploitable. De par la diversité de son utilisation et l'intérêt qu'elle porte à travers le monde, cette forme d'énergie a connu un grand essor ces dernières années. Toutefois, le prix élevé de cette énergie par rapport au prix des énergies non renouvelables représente un handicap face à l'expansion de son utilisation. L'optimisation des dispositifs solaires est parmi les solutions recommandées afin de renverser la tendance actuelle et voir l'utilisation de l'énergie solaire se répandre davantage dans le monde.

L'utilisation de l'énergie solaire la plus simple et la plus directe, est la production d'eau chaude sanitaire. C'est aussi l'une des plus anciennes, comme plusieurs dispositifs de chauffe-eau-solaires ont été inventés depuis les débuts du XXème siècle jusqu'à nos jours, plus performants les uns que les autres.

Pendant plusieurs années de développement des capteurs solaire plan à eau, plusieurs types ont été créés. En se basant sur le désigne de la plaque absorbante, le

Introduction Générale

capteur solaire plan à eau peut être divisé en trois types principaux : capteur à eau vitré, non vitré et capteur à eau à haute performance.

Dans cette étude nous nous intéressons au capteur solaire plan à eau pour la production de l'eau chaude, et en plus le capteur est vitré, nous faisons cette étude sur trois états du ciel différents : le premier est très pur, le deuxième est moyennement troublé et le troisième est troublé.

A cet effet, un petit rappel sur le système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique ainsi que la conductance thermique sont établis. Des calculs numériques sur Matlab nous ont permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

Le présent travail comporte quatre chapitres et une partie annexe.

- Dans le premier chapitre, l'intérêt est porté sur la généralité sur les énergies renouvelables, une petite description du soleil et les différents types des centrales solaires.
- Le deuxième chapitre est consacré à l'étude du gisement solaire et la réception de l'énergie solaire avec quelques notions et définitions astronomiques, couramment utilisées dans tout domaine relatif au solaire.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude théorique du capteur solaire plan, ses différents composants et le rendement de ce dernier
- Les principaux résultats obtenus et leurs interprétations font l'objet du quatrième chapitre.
- Dans la partie annexe, Le lecteur trouvera également quelques formules empiriques ainsi que les caractéristiques thermo physiques de l'eau.

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

Chapitre I

Généralités sur les énergies renouvelables

I. Introduction

Issue de la nature, l'énergie se présente sous deux formes :

Les énergies non renouvelables, qui sont d'origine fossile : le pétrole, le charbon, le gaz sont parmi les plus connues.

Les énergies renouvelables, dont les plus importantes sont : le solaire, l'éolien, et la géothermie. Elles trouvent leurs sources dans les différents flux énergétiques naturels incidents sur la terre, qui sont essentiellement

- ❖ Le rayonnement solaire, qui procure 99,97% de sa densité thermique.
- ❖ La chaleur interne terrestre, qui procure 0,03% de sa densité thermique.
- ❖ Les forces de gravitation.

Parmi toutes les énergies renouvelables, l'énergie solaire est la plus éminente, elle est également à l'origine de la plupart des sources d'énergies utilisées par l'homme.

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.

Dans ce présent chapitre, on commence par une brève description des différentes énergies renouvelables en suite la description du soleil et un résumé sur les différentes centrales solaires.

I.1 Les différentes énergies renouvelables

Comme son nom l'indique, une énergie renouvelable est une énergie utilisant des éléments naturels, renouvelés plus rapidement qu'ils ne sont consommés. Ainsi, le solaire, l'hydraulique, le géothermique, l'éolien et la biomasse sont des énergies renouvelables et respectueuses de l'environnement. [12]

I.1.1 L'énergie hydraulique – Hydroélectricité

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années à travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [13]

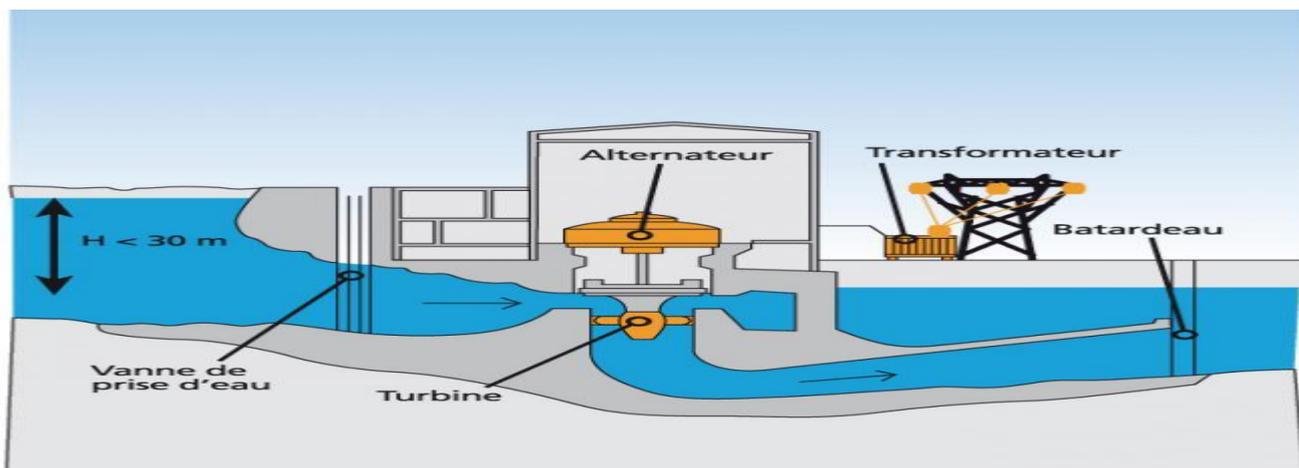


Figure 1 : centrale hydroélectrique.

I.1.2 L'énergie éolienne

La force éolienne est connue et exploitée à travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante. [13]



Image 1 : Eoliennes avec hélices spéciales.

I.1.3 L'énergie de la biomasse

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments. Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. 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. La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes (cultivées spécialement pour la production d'énergie), les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels.

Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz. [13]

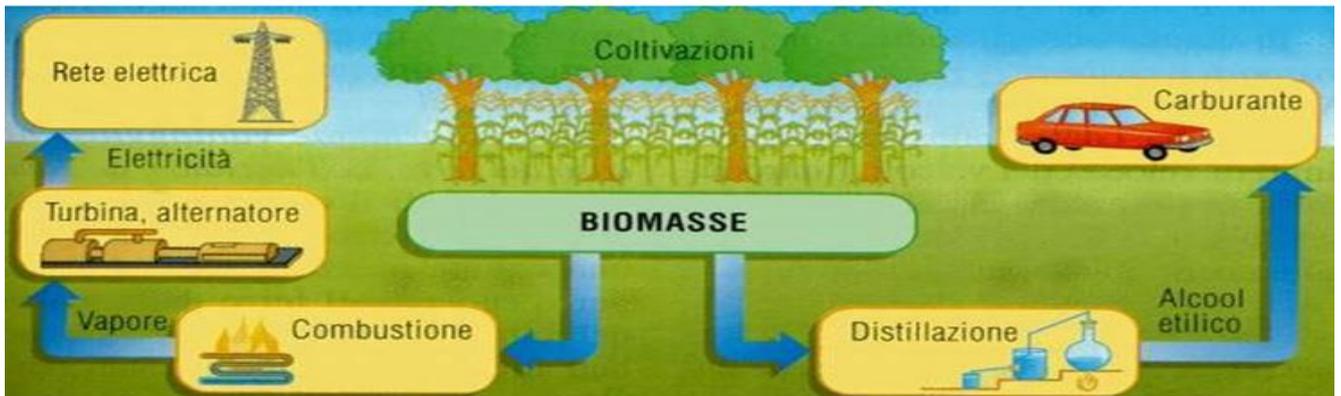


Image 2 : différentes utilisations de la biomasse.

I.1.4 Energie de la Géothermie

L'énergie géothermique désigne l'énergie créée et emmagasinée dans la terre sous forme thermique. Elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches. [13]

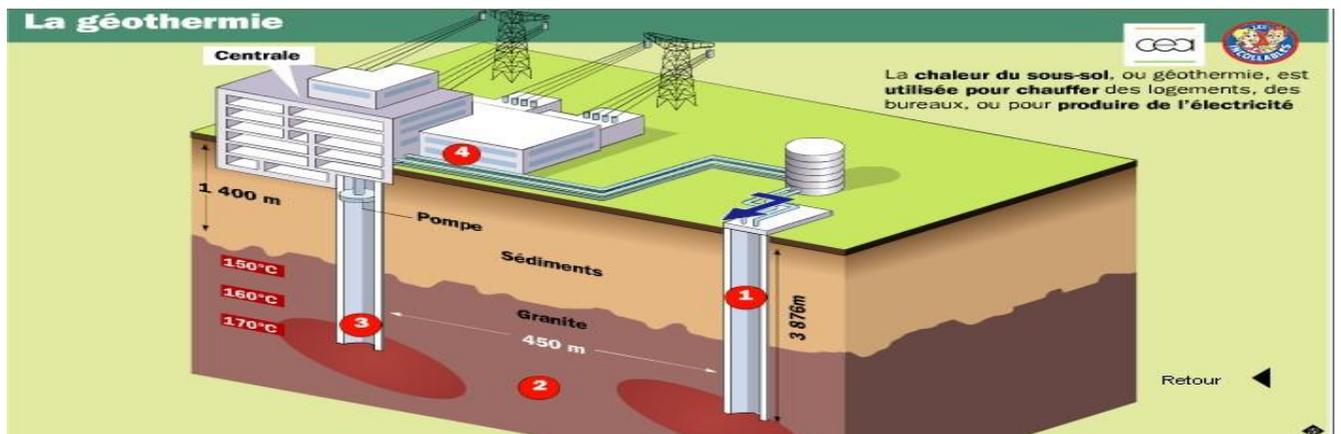


Figure 2 : centrale géothermique.

I.1.5 Les Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

a. Les avantages

- ✓ N'émettent que marginalement des gaz à effet de serre
- ✓ Matière première inépuisable
- ✓ Contribuent à notre indépendance énergétique et à notre sécurité d'approvisionnement

b. Les inconvénients

- ✓ Ressources souvent intermittentes ou irrégulières et peu prévisibles,
- ✓ Ressources généralement coûteuses au niveau actuel des technologies existantes.

I.1.6 Energie solaire

L'énergie solaire provient des rayons du soleil qui atteignent la Terre. Le premier point important à noter est que cette énergie est présente dès le lever du soleil. De même, bien qu'elle soit plus puissante par beau temps, elle est également présente et utilisable par temps nuageux. En effet, l'énergie solaire tire à la fois partie des rayons directs du soleil mais aussi des rayons diffus à travers l'atmosphère.

Le dernier point intéressant à noter est que chaque année, les rayons du soleil arrivant jusqu'à nous permettent de produire assez d'énergie pour combler les besoins énergétiques de tous les habitants de la Terre. En théorie, il suffit donc d'installer des matériaux qui captent cette énergie et la transforment en électricité, chauffage etc. pour arriver à une énergie propre et renouvelable. L'énergie solaire peut être exploitée sous deux formes principales : la conversion photothermique qui consiste en une transformation directe du rayonnement solaire en chaleur et la conversion photovoltaïque pour la production d'électricité.



Image 3 : énergie solaire.

I.1.6.1 Origine

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

Chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène se transforment en 560 millions de tonnes d'hélium, cette différence de 4 millions de tonnes par seconde correspond à la

différence d'énergie de liaison entre les protons d'hydrogène et ceux d'hélium donnant une énergie sous forme de rayonnement, estimée à $3,7 \cdot 10^{26}$ j/s.

I.1.6.2 Caractères particuliers

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

- Elle est universelle, sa densité de puissance maximale est de 1 kW/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 104 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.1.6.3 Captation

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

❖ L'énergie solaire thermique

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

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

❖ L'énergie solaire thermodynamique

La solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales hélios thermoélectriques. Trois types principaux de centrales sont utilisés :

1. Les centrales à capteurs cylindre-paraboliques pour atteindre des températures entre 300 et 350 °C.

2. Les centrales à capteurs paraboliques pour atteindre 1000°C ou plus.
3. Les centrales à tour pour atteindre 1000 °C.

❖ L'énergie solaire photovoltaïque

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé, cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux.

I.2 Le soleil

Le soleil est la seule étoile du système solaire et la plus proche de la terre, sa lumière met environ huit (8) minutes à nous atteindre. La deuxième étoile la plus proche est Proxima de sépare de cette étoile fait que le soleil soit la seule étoile qui assure la vie sur terre.

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

Le soleil est une étoile naine de forme pseudo-sphérique comparable à une immense boule de gaz très chaud qui se compose de 80% d'hydrogène et de 19% d'hélium, le 1% restant étant un mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. Bien que le soleil soit une étoile de taille moyenne, il représente à lui seul 99.9% de la masse du système solaire qui est dominé par les effets gravitationnels de l'importante masse du soleil. Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau suivant :

Diamètre (km)	1392000
Masse (kg)	$1,989.10^{30}$
Surface (km²)	$6.09.10^{12}$
Volume (km³)	$1.41.10^{18}$
Masse volumique moyenne (kg/m³)	1410
Vitesse (km/s)	217
Puissance rayonnée (kW)	$3,83.10^{23}$
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2.5.10^{17}$
Température superficielle (K)	5770

Tableau 1 : Caractéristiques principales du soleil.

1- L'intérieur du soleil : cette région est divisée en trois zones ; le noyau, la zone radiative et la zone convective. Elle représente 40% de la masse du soleil et elle s'étend sur une épaisseur d'environ $25 \cdot 10^4$ km. Sa température atteint plusieurs millions de degrés et la pression un milliard d'atmosphère.

2- La photosphère : C'est une couche opaque d'environ 300 km d'épaisseur. Sa température est de l'ordre de quelques millions de degrés, décroissant très rapidement dans l'épaisseur de la couche jusqu'à une température dite de surface de l'ordre de 4500°C .

3- La chromosphère et la couronne solaire : C'est une région à faible densité où la matière est très diluée, elle représente l'atmosphère du soleil. Cette couche est caractérisée par un rayonnement émis très faible est très élevée (environ un million de degrés).

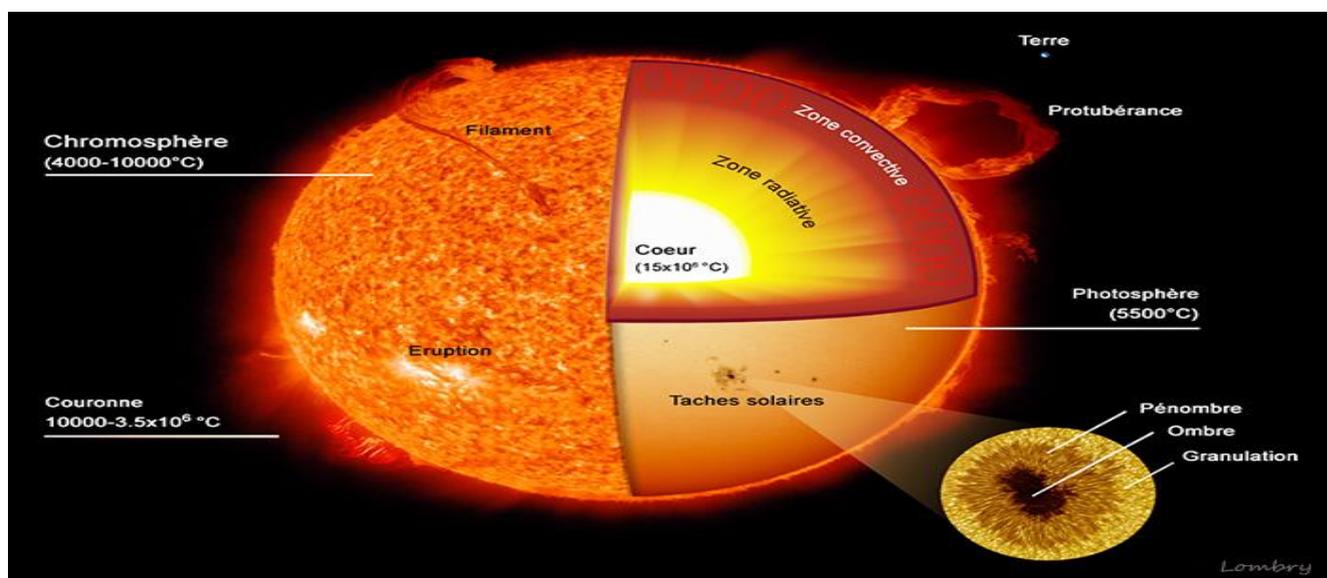


Figure 3 : Structure du soleil.

I.2.1 Rayonnement solaire

Le rayonnement électromagnétique émis par le soleil est la manifestation externe des interactions nucléaires qui se produisent au cœur du soleil et de l'ensemble des interactions secondaires qu'elles génèrent dans son enveloppe. Il constitue la quasi-totalité de l'énergie expulsée par le soleil.

Le rayonnement solaire est caractérisé par différentes caractéristiques dont la plus importante est la constante solaire, qui est une donnée fondamentale indépendante des conditions météorologiques. La deuxième caractéristique du rayonnement solaire est sa répartition spectrale, qui est à peu près celle d'un corps noir à 5800°K . Le rayonnement solaire est une superposition d'ondes dont les longueurs vont de 0,25 micromètres à 4 micromètres. [8]

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m^2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchit une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc.

- a. **Le rayonnement direct** : est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair.
- b. **Le rayonnement diffus** : est le rayonnement émis par des obstacles (nuages, sol, bâtiments) et provient de toutes les directions. La part du rayonnement diffus n'est pas négligeable et peut atteindre 50% du rayonnement global (selon la situation géographique du lieu). Le rayonnement global sur la terre et sa part de rayonnement diffus varie au cours de l'année.
- c. **Le rayonnement global** : qui est la somme du rayonnement direct et diffus.

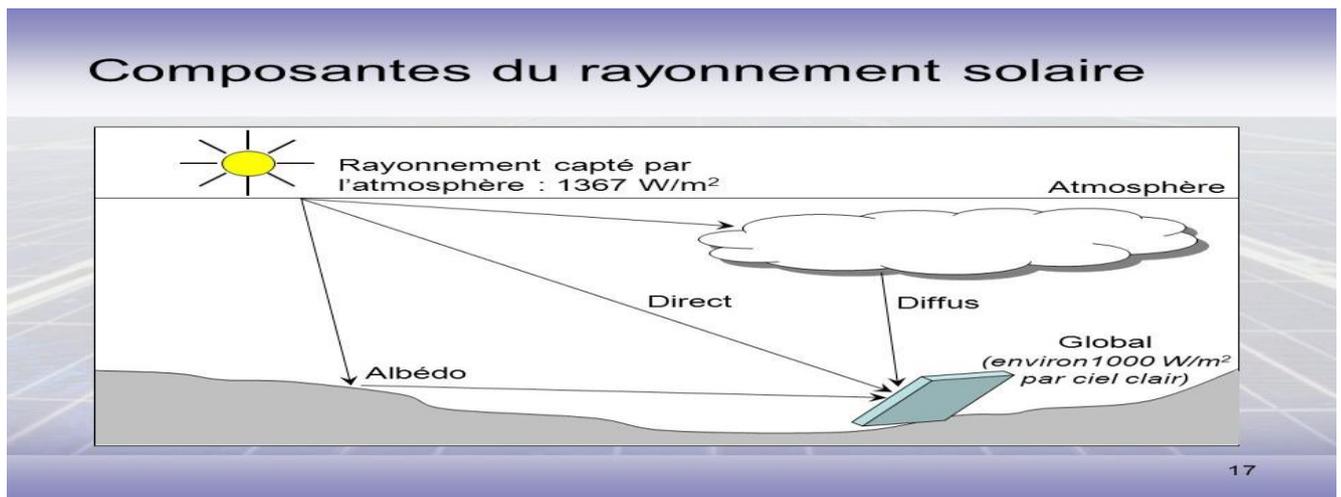


Image 4 : différents rayonnements solaires.

I.2.2 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.2.3 Le gisement solaire en Algérie

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

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre l'image 05. [8]

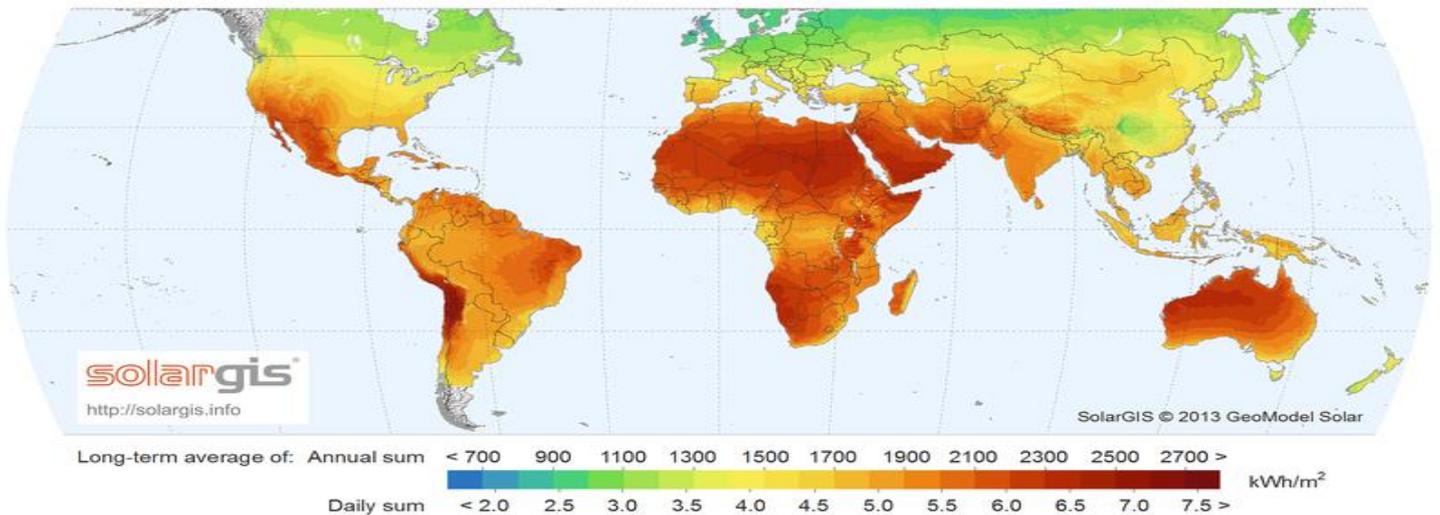


Image 5 : Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel.

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence Spatiale Allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique, 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque.

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau selon l'ensoleillement reçu annuellement.

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

Tableau 2 : Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques.

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

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

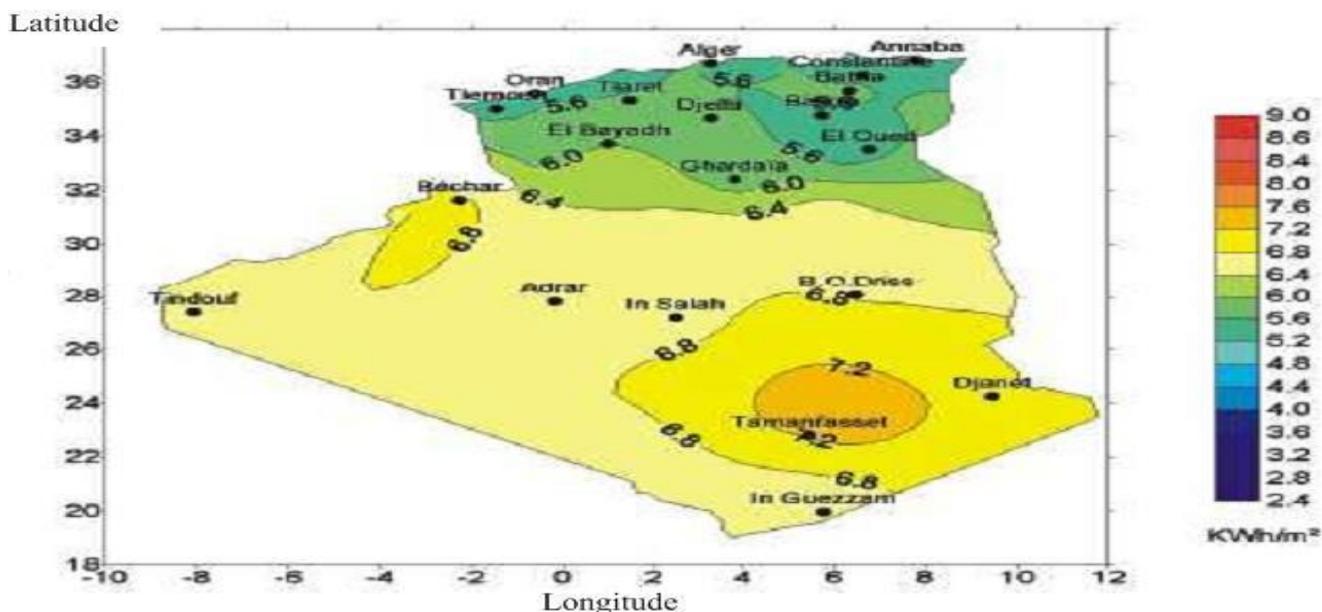


Image 6 : Moyenne annuelle de l'irradiation solaire globale reçue sur un plan incliné. [10]

I.2.4 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. [15]

I.2.5 Constante solaire

La constante solaire C^* est le flux énergétique reçu par une surface plane d'un mètre carré, perpendiculaire au rayon solaire, située en dehors de l'atmosphère à une distance moyenne terre-soleil. Cette distance varie 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 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 terrestre, On a : $C^*=1353 \text{ w/m}^2$. L'écart relatif du flux solaire par rapport à C^* et donné au tableau suivant :

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 3 : L'écart relatif du flux solaire par rapport à la C^* . [1]

On y constate que cet écart ne dépasse pas 3,40% en valeur absolue.

I.2.6 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 07). [16]



Image 7 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 :

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

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 4 : albédo solaire de différentes surfaces.

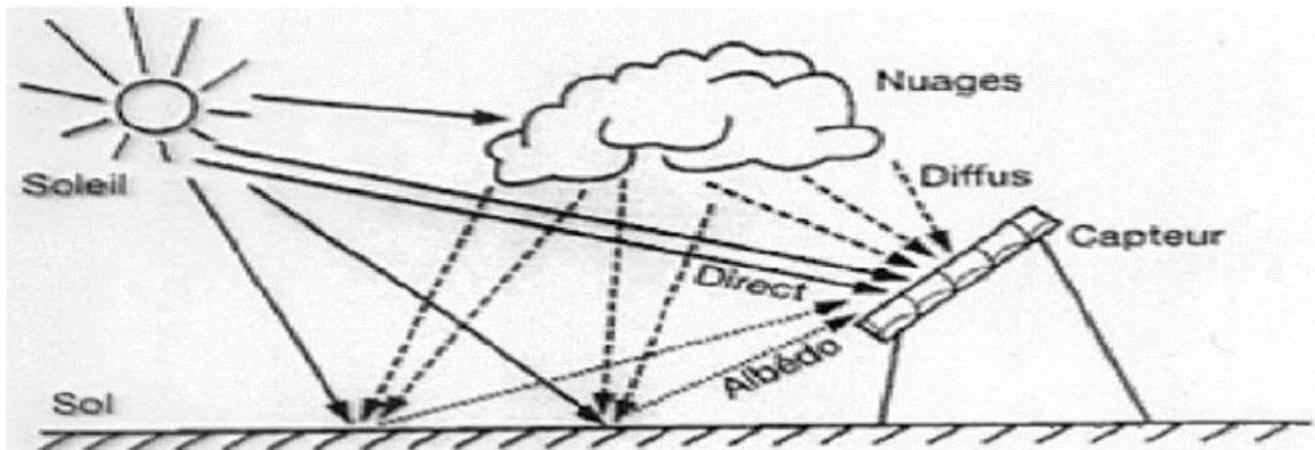


Figure 4 : Schéma descriptive de l'albédo.

Avant d'installer un équipement utilisant l'énergie solaire, il est important de connaître la luminance au sol, c'est-à-dire la quantité de lumière solaire reçue au sol.

Dans le calculs d'un avant-projet, on peut choisir un albédo solaire moyen égal à 0,3 pour le sol terrestre. Il faut noter qu'une partie du rayonnement solaire réfléchi par le sol peut lui revenir dans le cas d'une couverture nuageuse importante, il s'ensuit un phénomène de multiples réflexions qui a pour conséquence de fournir un albédo effectif plus faible.

I.3 différentes centrales solaires

I.3.1 Les centrales photovoltaïques

Le terme « 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. Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement. [17]

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

a) - Principe :

La cellule Photovoltaïque, aussi appelée cellule solaire, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme en énergie électrique l'énergie lumineuse fournie par une source d'énergie inépuisable, le soleil. Elle exploite les propriétés des matériaux semi-conducteurs utilisés dans l'industrie de l'électronique (diodes, transistors et circuits intégrés).

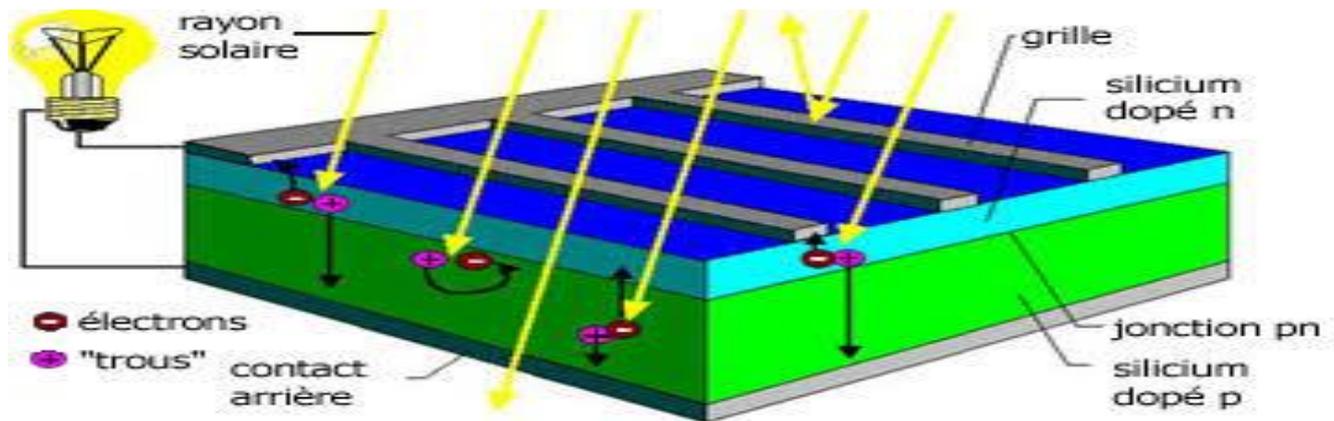


Figure 5 : représentation en coupe d'une cellule photovoltaïque. [14]

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p). Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente (comme un aimant possède un champ magnétique permanent). Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque.

Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure. [17]

b) Les Avantages

- Les installations photovoltaïques sont la plupart du temps des installations très fiables qui ne demandent que très peu d'entretien
- C'est une installation silencieuse par le fait que c'est une énergie électrique, contrairement à l'éolienne par ex.
- Les installations sont adaptables, et avec un montage très simple.
- C'est une énergie non-polluante et propre, il ne génère pas de gaz à effet de serre et sans déchets. Et surtout, le principal avantage, c'est une énergie inépuisable.

c) Les Inconvénients

- Ces installations dépendent surtout de l'ensoleillement, elles ne fonctionnent pas le soir et pendant la nuit et il n'y a pas de production d'électricité. Le niveau de production n'est donc pas prévisible.

- La fabrication de ses panneaux demande beaucoup de recherche et du développement et un investissement important. Cet investissement se traduit donc par le prix élevé de ses panneaux.
- Les rendements du photovoltaïque sont faibles, autour de 20% pour les meilleurs. Ces installations conviennent mieux pour des projets à besoins faibles ou moyens.
- Le rendement des cellules photovoltaïques diminue en fonction de la durée de vie, qui dure entre 20 à 30ans. On dit même que ses cellules perdent 1% du rendement par an.

I.3.2 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 réfléchié 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. [18]

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

On caractérise 02 type de concentrateurs

1. Fixes

Centrales à tour et le Collecteur Fresnel linéaire.

2. Mobiles

Collecteurs paraboliques et Collecteurs cylindro-paraboliques.

I.3.3 Les Centrales thermodynamiques

a. Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques

Ces centrales sont en réalité composées de longs miroirs d'une forme hémicylindriques (demi-cercle) alignés pareillement. Ces miroirs tournent autour d'un axe horizontal pour pouvoir suivre le soleil à chaque instant. Ces miroirs permettent de diriger les rayons du soleil vers un liquide appelé liquide caloporteur (liquide qui permet d'extraire la chaleur) qui sera

ensuite chauffer d'où la nécessité du mouvement des panneaux au soleil. La température du fluide peut atteindre 500°C. Lorsque le liquide est bien chauffé, il va être transféré vers une centrale où le liquide sera mélangé avec de l'eau qui va au final se transformer en vapeur. Cette vapeur va entraîner une turbine qui permettra de produire de l'électricité, de la même manière que la géothermie. Depuis peu, certaines centrales sont capables de tourner jour et nuit grâce aux importantes capacités de stockage de la chaleur mises en place.



Image 8 : les capteurs cylindro-paraboliques.

Les avantages

- ✓ C'est une source gratuite et inépuisable.
- ✓ Elle peut fonctionner sans interruption grâce aux nouveaux systèmes de stockage.
- ✓ Il n'y a aucune émission de produits polluants.

Les inconvénients :

- ✓ Ces centrales nécessitent d'une surface au sol très importante et un coût d'installation important pour que la centrale fonctionne à plein régime.
- ✓ Il faut souvent les placer dans des zones à très fort ensoleillement et une zone assez chaude.

b. Les centrales paraboliques

Pour vous faire une idée, ces centrales paraboliques ont exactement la même forme que les paraboles que certaines personnes mettent dehors pour capter les chaînes de télévision, mais dans le cas de ces centrales, elles sont beaucoup plus grandes.

Cette parabole est composée de miroirs. La parabole est quant à elle reliée à un récepteur, Le miroir parabolique réfléchit les rayons émis par le Soleil en un point de

convergence appelé foyer, qui est situé dans le récepteur, Le récepteur monte donc en température. Ce dernier est composé d'un moteur appelé moteur Sterling qui est capable de convertir l'énergie thermique en énergie mécanique pour ensuite la reconvertir en énergie électrique. Comme pour la centrale vue auparavant, la parabole suit le déplacement du soleil pour profiter de l'ensoleillement maximum.

La température peut atteindre 1000°C sur le récepteur mais le moteur n'a pas besoin d'une chaleur intense pour permettre des rendements en électricité optimaux. [18]



Image 9 : Les miroirs paraboliques.

Les avantages

- ✓ C'est une source d'énergie inépuisable et gratuite comme pour la centrale vue auparavant
- ✓ Les centrales permettent d'avoir un bon rendement et de bonnes performances
- ✓ Il n'y a pas d'émissions polluantes

Les inconvénients

- ✓ Ces centrales, contrairement au cylindro-parabolique, ne fonctionnent que la journée et donc par intermittence.

c. Les centrales à miroir Fresnel

Les centrales à miroir Fresnel sont basées sur le même principe que les centrales cylindro-paraboliques. Cependant, au lieu d'utiliser des miroirs en forme de cylindre, on poserait des miroirs plans (plats) appelés " réflecteurs compacts linéaires ". Les rayons émis par le Soleil sont dirigés vers le tube horizontal où le liquide est placé. Ce tube est lui-même

surmonté d'un miroir secondaire pour bien rediriger les rayons qui se seraient mal dirigés. On garderait donc le système de liquide et de turbine pour produire et créer de l'électricité.



Image 10 : centrale à miroir Fresnel.

Les avantages

- ✓ Les centrales seraient beaucoup moins chères : les miroirs sont plus faciles à fabriquer et meilleur marché que les cylindro-paraboliques.
- ✓ Elles sont moins exposées au vent, et donc la durée de vie des miroirs est augmentée.

Les inconvénients

- ✓ Les performances sont beaucoup trop faibles par rapport à ce qu'apporte les centrales cylindro-paraboliques. Aux alentours de 30% plus faibles.

d. Centrales à tour

Les tours solaires ou centrales à concentration, reposent pratiquement sur le même principe que les centrales cylindro-paraboliques. Elles sont composées de 2 blocs.

Le bloc solaire se présente sous la forme d'une tour géante autour de laquelle sont situés plusieurs centaines ou milliers de miroirs qui reflètent les rayons du soleil à un point unique au sommet de la tour. Les miroirs, aussi appelés " héliostats" (en grec : qui fixe le soleil) suivent le déplacement du soleil. Le point situé au sommet de la tour, appelé absorbeur, va permettre de transformer les rayons émis par le soleil en chaleur à haute température ; elle peut atteindre 600°C. Ainsi, le liquide placé en haut de la tour va se chauffer et va être en contact avec de l'eau. [11]

Le bloc puissance est constitué d'une chaudière qui permet de créer de la vapeur grâce au contact du liquide et de l'eau. La vapeur produite entraîne une turbine qui produit de l'électricité. Le liquide permet donc de transférer la chaleur du bloc solaire au bloc puissance.



Image 11 : centrale à tour.

Les avantages

- ✓ Ces centrales sont également une source d'énergie inépuisable
- ✓ Seule la construction est payante : elle est gratuite lorsqu'elle est construite.
- ✓ C'est une énergie non polluante
- ✓ Elles permettent de valoriser les territoires vastes et désertiques.

Les inconvénients

- ✓ Ces centrales ont besoin d'un espace vaste et une surface au sol importante
- ✓ Elles requièrent un très fort ensoleillement

e. Les centrales solaires à effet de cheminée

Le fonctionnement est très simple, Les centrales solaires à effet de cheminée sont composées d'une tour immense autour de laquelle il y a la présence d'une serre. La serre est quant à elle chauffée par le soleil : l'air chaud va donc se retrouver sous terre et va circuler jusqu'à la tour.

Le fonctionnement se base donc sur un principe : l'air chaud est plus léger que l'air froid donc il s'élève. Lorsqu'il arrive près de la cheminée, il s'élève grâce au principe vu auparavant. Le déplacement d'air va permettre aux turbines, situées au bas de la cheminée de tourner et donc de produire de l'électricité.

Les centrales à effet de cheminée ne sont pas encore très développées puisqu'il n'y en a actuellement qu'une seule de construite et qui ne fournit que 50kW, des projets pour en implanter de nouvelles notamment en Espagne et en Australie, sont en cours.

La centrale espagnole devrait faire 750 mètres de hauteur et fournir 40MW (soit la demande de 120 000 personnes en électricité) tandis que la centrale australienne devrait atteindre 1000 mètres et permettre de fabriquer 200MW. [11]

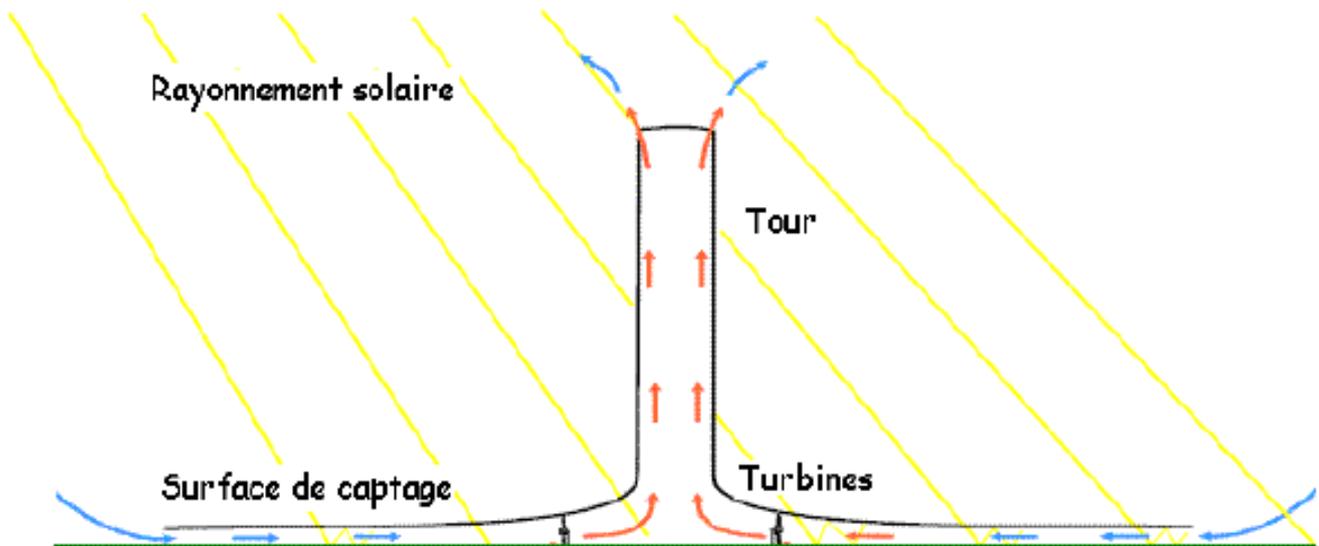


Figure 6 : central à effet de cheminée.

Les avantages

- ✓ Comme toutes les centrales vues auparavant, c'est une source d'énergie inépuisable et gratuite.
- ✓ Les centrales ne polluent pas
- ✓ Le système fonctionne jour et nuit et sans intermittence car la chaleur est toujours présente sous la serre même la nuit.
- ✓ Elles ne demandent que très peu d'entretien grâce à la simplicité du fonctionnement.

Les inconvénients

- ✓ Ces centrales demandent un investissement très important.
- ✓ Etant donné l'immensité des tours, certaines personnes y voient un gâchis du paysage.

I.3.4 Domaine d'application

a. 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.

b. 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 (voir l'article sur l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique).

I.4 conclusion

En conclusion, ce chapitre comporte les différentes formes d'énergies renouvelables les plus connues dont les sources sont le soleil, l'eau et la chaleur interne de la terre. Parmi ces sources, le soleil est le plus dominant et joue un rôle d'importance primordiale dans le maintien de la vie sur terre en lui fournissant d'énormes quantités d'énergie. Nous avons ensuite donné quelques détails sur l'énergie solaire en nous appuyant sur les différentes centrales solaires.

Chapitre II

Réception de l'énergie solaire

II. Introduction

Le soleil a toujours eu un rôle dominant dans les différentes activités naturelles de l'univers, en particulier sur la Terre pour la formation des sources d'énergie fossile et renouvelable. L'émission des radiations solaires du soleil vers chaque coin dans l'espace apparaît sous forme d'ondes électromagnétiques transportant de l'énergie à la vitesse de la lumière.

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.

Dans ce présent chapitre, on commence par une brève description du mouvement de la terre ainsi que la position du soleil, nous définissons ensuite quelques données nécessaires pour notre étude notamment les paramètres de position et de temps solaire, en fin une description détaillée du rayonnement solaire, sa mesure directe.

II.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.

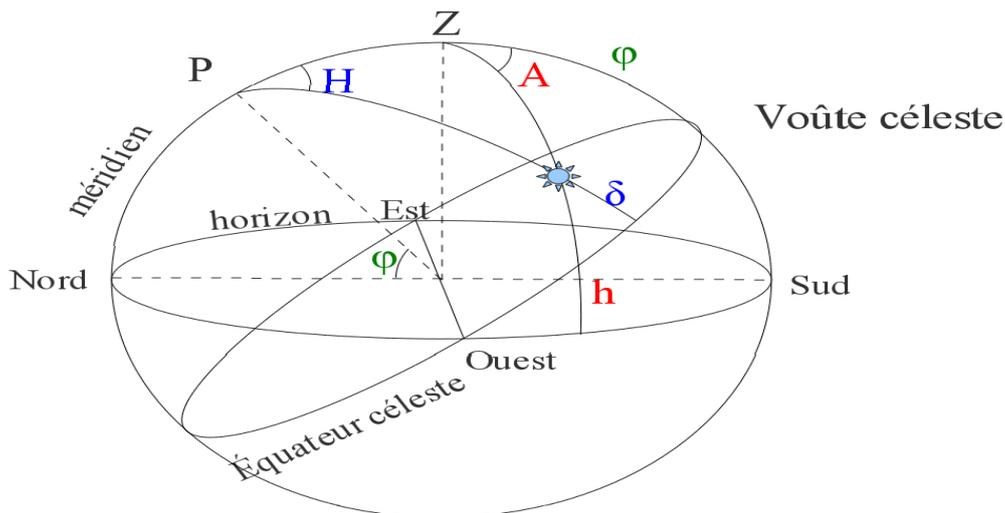


Figure 7 : Les coordonnées horaires.

II.2.1 Repère de coordonnées équatoriales

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

1- La déclinaison (δ) : C'est l'angle entre la direction soleil-terre et le plan de l'équateur terrestre. 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 :

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

- δ est exprimée en degrés.
- n est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

2- 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 la course du soleil dans le ciel. Il est donné par la relation suivante :

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

- 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.

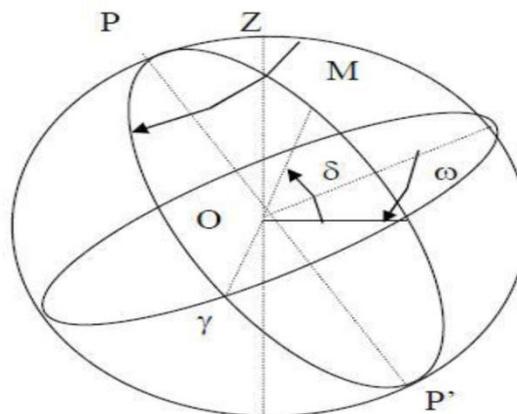


Figure 8 : Les coordonnées horaires.

II.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 :

1- La hauteur du soleil (h) : C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est donné par la relation suivante :

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

2- Azimut du soleil (a) : C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et le sud. L'azimut est compté positivement vers l'ouest et négativement vers l'est. Il est donné par la relation suivante :

$$\sin(a) = \frac{[\cos(\delta)\sin(\omega)]}{\cos(h)} \quad (II-4)$$

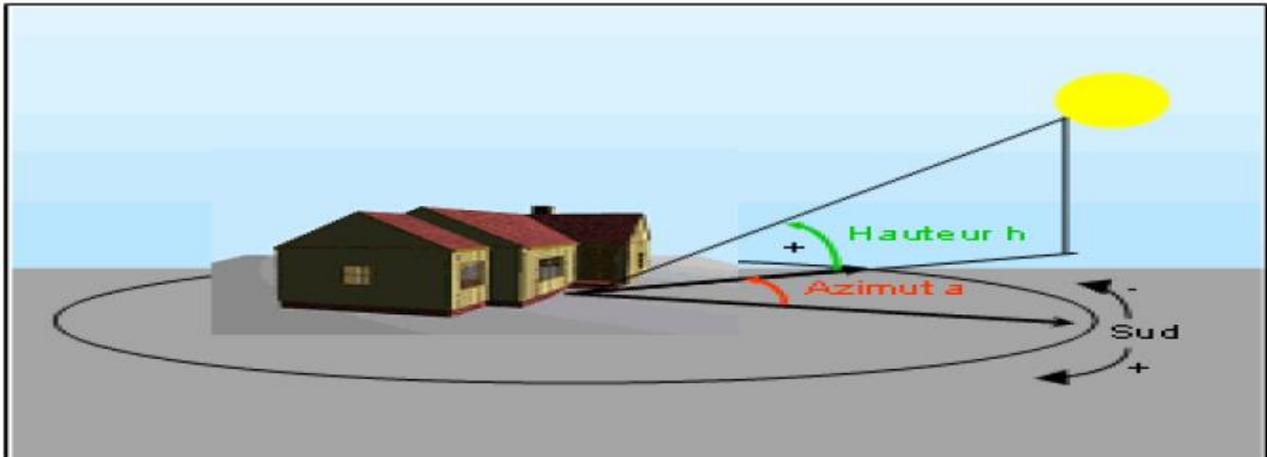


Figure 9 : Les coordonnées célestes horizontal.

II.3 Paramètres de la position

II.3.1 Grandeurs pour le repérage d'un site à la surface terrestre

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

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

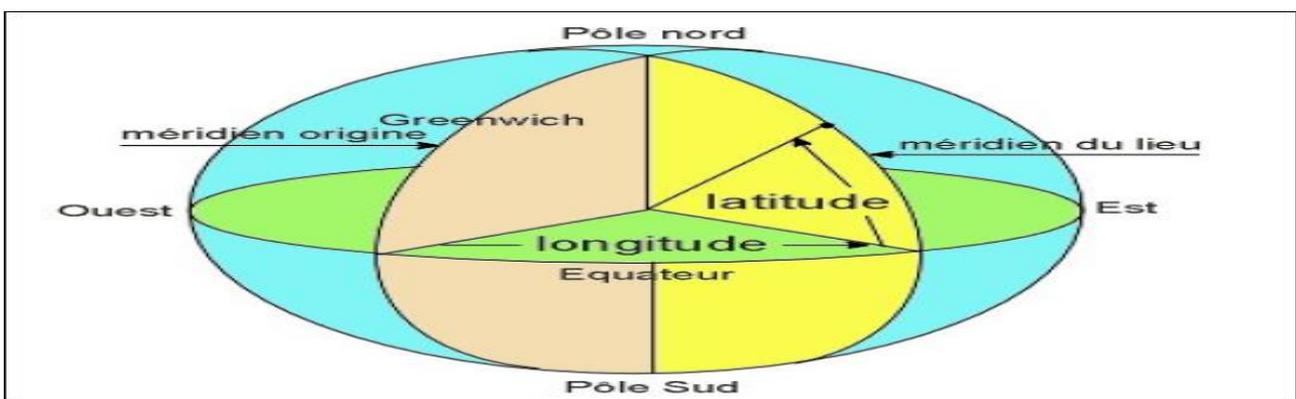


Figure 10 : Définition des coordonnées terrestre d'un lieu donné.

II.3.2 Angle d'incidence sur un plan

L'angle d'incidence (i) est l'angle que fait la direction des rayons solaires incidents avec la normal au plan de la surface réceptrice. Il est donné par la relation suivante :

$$\cos(i) = \cos(\alpha - a) \cos(\gamma) \cos(h) + \sin(\gamma) \sin(h) \quad (\text{II-5})$$

II.3.3 Orientation d'un plan quelconque

L'orientation d'un plan quelconque est définie par deux angles (α , γ) :

α : azimut du plan : c'est l'angle que fait la projection de la normale sur le plan horizontal et la direction du sud.

γ : hauteur du plan : c'est l'angle que fait la normale du plan et sa projection sur le plan horizontal. L'inclinaison β du plan par rapport au plan horizontal est donnée par :

$$\beta = 90 - \gamma \quad (\text{II-6})$$

II.4 Le 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). [6]

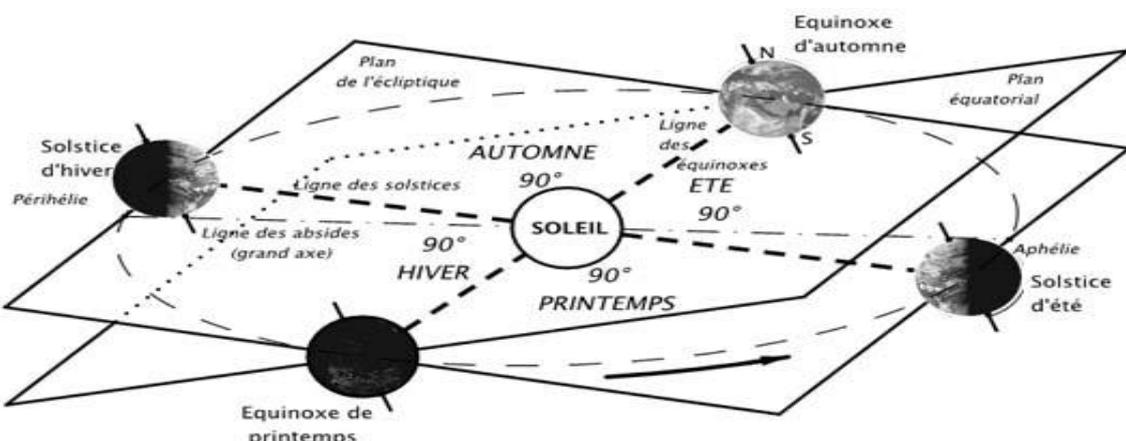


Figure 11 : le mouvement de la terre au tour du soleil.

II.5 Paramètre du temps

II.5.1 Le Temps Solaire Vrai (T.S.V)

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

$$TSV = TSM + Et \quad (II-7)$$

- ω : En degré.

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

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.5.2 Le Temps Solaire Moyen (T.S.M)

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

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

II.5.3 Le Temps Universel (T.U)

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

$$TU = TSM + \left(\frac{L}{15}\right) \quad (II-9)$$

- 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.

II.5.4 Le Temps Légal (T.L)

C'est le temps officiel d'un état, il est donné par : $TL = TU + \Delta H$ (II-10)

$$\Delta H = C_1 + C_2$$

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

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

II.5.6 L'équation 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 :

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

Avec : $\beta = \frac{360 \cdot n}{366}$

II.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, $a=w=0$) de l'indice 'm'.

On a donc :

- Hauteur à midi solaire : $h_m = \sin^{-1}[\cos(\delta \times \varphi)]$
- Angle horaire au coucher : $\omega_0 = \cos^{-1}(-\tan \varphi \times \tan \delta)$
- Azimut au coucher : $a_0 = \cos^{-1}\left(\frac{\sin \delta}{\cos \varphi}\right)$
- Durée du jour (en h) : $ddj = 2 \times \left(\frac{\omega_0}{15}\right)$

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 ($a_0 = \omega_0 = 0^\circ$).

II.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 « * ».

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. [1]

II.6.1 Le rayonnement direct $S^*(i, \gamma)$:

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

Où \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 : $\vec{k} \cdot \vec{n} = 0$ 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 $-90^\circ < a < 90^\circ$

II.6.2 Le 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^*

Finalement on obtient :

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

II.6.3 Le 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 :

$$G^* = S^* + D^* \quad (II-13)$$

$$D_h^* = G^* - I^* \sin h \quad (II-14)$$

- h est la hauteur du soleil.

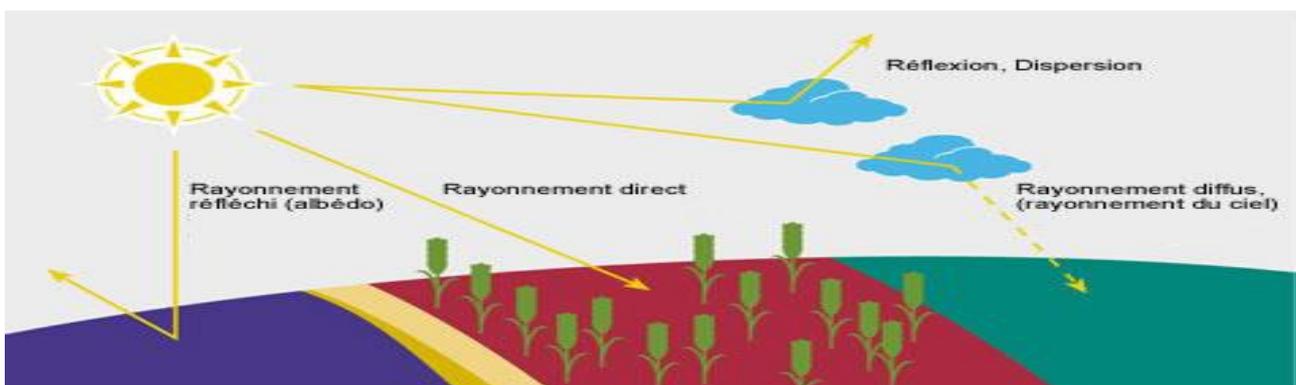


Figure 12 : Rayonnement direct, diffus et global.

II.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 :

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

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

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

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 ($i \approx \varphi$).

II.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. [1]

Considérons un plan horizontal, à la limite de l'atmosphère terrestre, situé à une latitude φ

Notons C_h^* l'éclairement solaire correspondant.

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

C^* : constante solaire.

Notons C_h l'irradiation journalière on a : $C_h = \int_{\text{journée}} C_h^* \cdot dt = \int_{1s}^{cs} C^* \cdot \sin(h) \cdot dt$

En remplaçant $\sin h$ par sa valeur :

$$C_h = C^* \int_{1s}^{cs} (\sin \delta \cdot \sin \varphi + \cos \omega \cdot \cos \delta \cdot \cos \varphi) dt$$

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 :

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

Avec C_h en KWh/m² et $C^*=1353$ W/m².

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 :

$$C_h = \frac{C^*}{10^3} \left[\sin \delta \sin(\varphi \cdot ddj) + \cos \delta \cos \varphi \cdot \frac{24}{\pi} \sin(7,5 \cdot ddj) \right] \quad (II-19)$$

II.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 :

$$G_{0h} = \int_{L_s}^{C_s} G_h^* dt$$

L_s : l'heure de lever de soleil

C_s : l'heure de coucher de soleil

Cas d'une surface quelconque, on aura : $G_0(i, \gamma) = \int_{L_s}^{C_s} G^*(i, \gamma) dt = \int_{L_s}^{C_s} R_G(i, \gamma) \cdot G_h^* dt$

Après intégration on obtient : $G_{0h} = \frac{2}{\pi} ddj \cdot G_{hm}^*$

II.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.

II.7.2.1 La 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 : $\sigma = \frac{ddi}{ddj} \quad (II-20)$

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 moussons	Pune (inde)	0,37	0,30	0,51
Équatorial	Kisangani(zaire)	0,48	0,28	0,39

Tableau 5 : valeurs des coefficients annuels moyens σ, a_1, a_2 .

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

Condition de trouble	I^*	G_H^*
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 6 : expressions empiriques des éclairement solaires en w/m^2 par ciel clair.

II.8 Instruments de mesure

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

II.8.1 Le Pyrhéliomètre

La mesure de l'éclairement solaire direct est assurée par un Pyrhéliomètre. Cet appareil est généralement constitué par une thermopile peinte en noir. Cette thermopile est installée dans un tube de 30cm de longueur ayant une ouverture de 5°. Le tube est monté sur un système de poursuite du disque solaire, appelé monture équatoriale qui permet au tube d'être pointé constamment vers le soleil.

Ainsi à l'exclusion du rayonnement issu de l'atmosphère et 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. Cet appareil ne mesure que le rayonnement directement issu du soleil. Il est constitué de : Capuchon de protection, Ouverture chauffée, Viseur, Capteur, Hygromètre, Câble pour alimenter le chauffage. [19]



Image 12 : Le Pyrhéliomètre.

II.8.1.2 Applications de mesures par Pyrhéliomètre

Les applications classiques des mesures par pyrhéliomètre sont les études scientifiques du climat et de la météorologie, la recherche sur les propriétés de certains matériaux, et la mesure de l'efficacité de certains appareils photovoltaïques. [19]

II.8.2 L'héliographe

L'héliographe est un instrument qui permet de mesurer la durée de l'ensoleillement sur 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. [20]

II.8.2.2 Utilité

La connaissance de la durée d'ensoleillement (ddi) est utile en météorologie, mais aussi pour les énergéticiens (pour les calculs de production d'eau chaude ou d'électricité par panneaux ou moquettes solaires par exemple).



Image 13 : L'héliographe. [20]

II.8.3 Pyranomètre

Le rayonnement solaire global G_h^* est mesuré par un pyranomètres. Un courant électrique promotionnel à l'éclairement reçu est fourni par une thermopile protégé par deux hémisphères en verre et par un disque métallique recouvert de peinture blanche. Le verre est transparent aux longueurs d'onde comprises dans la bande spectrale (0,3-2,5) μm . L'appareil monté horizontalement grâce à un niveau à bulle, donne la valeur de l'éclairement global G_h^* .

L'intégration de cette quantité permet de définir la valeur du facteur d'irradiation e . Pour mesurer le rayonnement diffus, il suffit de monter sur un pyranomètres une bande venant occulter le rayonnement direct.

On peut déterminer l'albédo en montant deux pyranomètres en opposition, l'un est orienté vers le ciel et l'autre étant bien orienté vers le sol. En mesurant la différence des deux signaux par ces deux pyranomètres.



Image 14 : Pyranomètre.

II.9 Conclusion

Après avoir passé en revue quelques paramètres astronomiques nécessaires à notre étude, nous avons fait un petit rappel sur l'éclairement solaire et on conclut que les rayonnements qui atteignent la surface de la terre sont disponibles dès le lever du jour, il suffit donc d'installer un dispositif de captation dans un endroit où l'irradiation est optimale pour en fin exploiter cette forme énergie.

Chapitre III

Les capteurs solaires plans

III.1 Introduction

L'utilisation de l'énergie solaire redevient d'actualité grâce à son formidable impact sur la réduction des émissions de CO₂ et à des installations performantes. Pour exploiter cette énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires.

L'histoire des capteurs thermiques à basse température remonte à Horace-Bénédict de Saussure (1740-1799) qui met en évidence l'effet de serre obtenu par un vitrage au-dessus d'un absorbeur dans un caisson isolé. Il faut cependant attendre 1910 pour voir apparaître les premiers chauffe-eaux solaires en Californie.

Un capteur solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme. Il y a plusieurs types de capteurs bien distincts, qui ont chacun un usage spécifique.

Les capteurs solaires plans sont les éléments fondamentaux de la transformation de l'énergie solaire en énergie thermique à basse température. Leur rôle est la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

Sans concentration du rayonnement, le flux d'énergie tombant sur une surface située à un niveau quelconque ne peut guère dépasser 1 KW/m². Cette valeur ne permet d'atteindre des températures supérieures à 100°C. Par contre ils ne nécessitent pas un suivi du soleil et utilisent des composants directs et diffuse du rayonnement solaire incident. Ils sont principalement utilisés pour la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et le chauffage d'habitations ou de piscines.

Ce présent chapitre contient un bref rappel sur le capteur solaire plan à eau, ses principaux composants, et la dernière partie est consacrée au rendement d'un capteur solaire plan (à eau et vitré) sujet de notre étude.

III.2 les Capteurs solaires plans

Ce sont échangeurs de chaleur qui fonctionnent entre une source radiante (le soleil) et un fluide. Leur rôle est la conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique. La chaleur collectée par l'absorbeur est cédée au fluide caloporteur qui circule dans des canalisations qui servent à transporter la chaleur du capteur vers le point d'utilisation.

III.2.1 Classification des capteurs solaires thermiques

On peut classer les capteurs solaires selon :

1) Le fluide de travail utilisé

On peut trouver :

a) Des capteurs solaires à air

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

b) Des capteurs solaires à eau

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

Les capteurs à eau peuvent être classés en capteurs à :

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

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

2) L'orientation des capteurs

Les capteurs solaires peuvent être :

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

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.

III.2.2 le capteur plan à air

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air, on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur.

De l'air « frais » provenant de l'intérieur de la maison est envoyé dans le capteur afin d'être chauffé puis réinjecté dans la maison. Le mouvement d'air peut se faire soit par convection soit par ventilation forcée.

Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition, c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide.

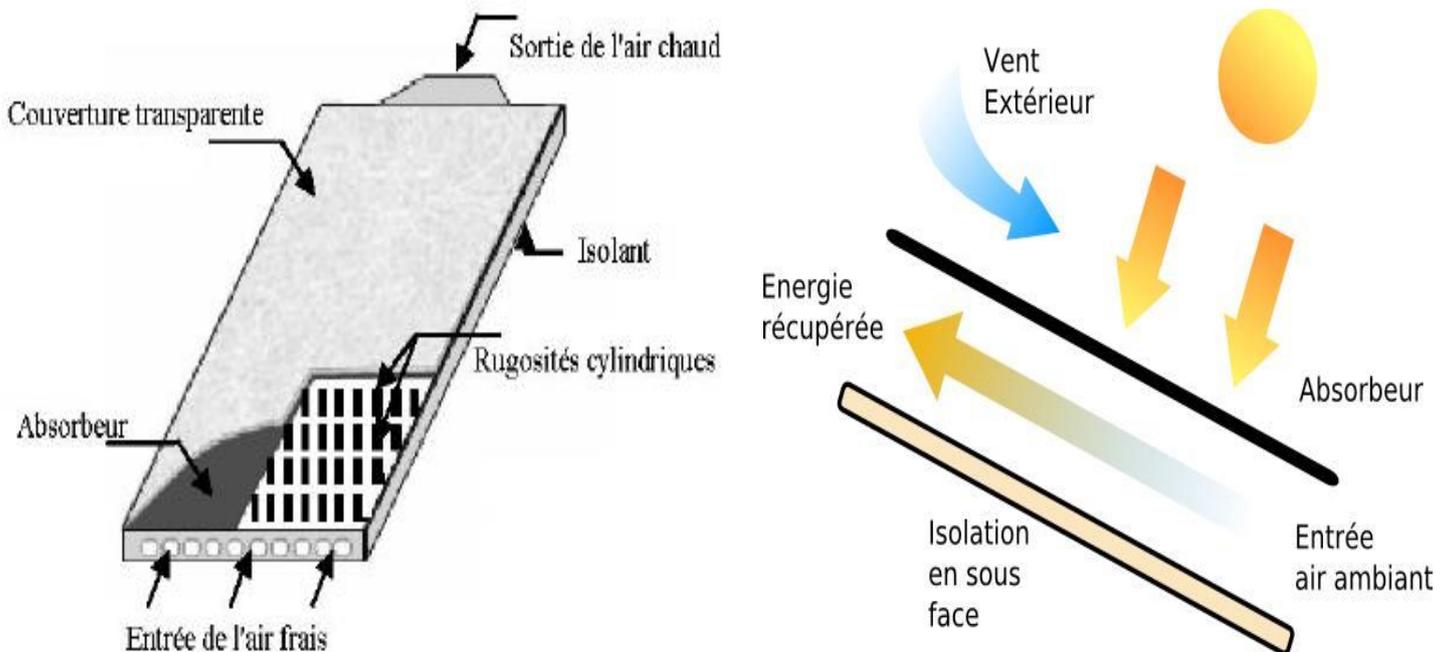


Figure 13 : Capteur plan à air

Note : Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique plan à eau.

III.2.3 le Capteur plans à eau

Il existe une grande gamme de capteurs solaires qui permettent de répondre aux différents besoins de chauffage des liquides. Leur choix dépend de la température de besoin et des conditions climatiques pendant la période d'utilisation du système. Bien entendu, plus le niveau de température est élevé, plus les technologies mises en œuvre

sont évoluées et plus les coûts de production sont élevés. Les technologies les plus courantes sont : Les capteurs plans vitrés, les capteurs plans non vitrés et les capteurs plans à haute performance.

1) Capteurs plans non vitrés

Ils sont constitués d'un réseau de tubes peints en noir en plastique résistant aux rayons U V, sans couverture transparente. Ils sont essentiellement utilisés pour le chauffage de l'eau des piscines extérieures en été. Ce type de capteur est conseillé pour des basses températures de service, moins de 40°C.

2) Capteurs plans vitrés

C'est un élément très simple, comportant un absorbeur métallique qui transforme le rayonnement solaire en chaleur, cette chaleur transmet à un liquide caloporteur, l'absorbeur est monté dans un boîtier isolé recouvert d'un verre ou feuille en matière synthétique hautement transparente. L'absorbeur comporte une couche noire souvent sélective qui absorbe efficacement le rayonnement solaire et réduit les pertes par rayonnement. Le vitrage crée un effet de serre qui permet d'atteindre des températures de 70°C à 90°C et augmente ainsi le rendement. Le capteur solaire peut avoir une ou plusieurs couvertures transparentes.

3) Capteurs plans à haute performance

a) Capteurs plans sélectifs

Chaque par exemple Certains absorbeurs ont un revêtement sélectif dont la propriété est d'émettre qu'une faible portion de l'énergie absorbée (7 à 20%). Pour la plupart des capteurs ce type de revêtement est à base de nickel et de chrome. L'absorbeur sélectif améliore le rendement du capteur.

Cette particularité est d'autant plus intéressante pour des climats froids et pour des applications nécessitant des températures importantes d'eau.

Un capteur thermique doit posséder deux qualités principales :

- ✓ Etre très noir pour absorber l'énergie du soleil
- ✓ Etre un miroir infrarouge pour éviter les pertes

Un capteur qui possède ces deux propriétés est optimal, on dit qu'il est sélectif. [6]



Image 15 : capteur à revêtement sélectif.

b) Capteurs plans sous vide

Les capteurs sous vide permettent d'atteindre des températures plus élevée (jusqu'à 120°C). Ils sont constitués de tubes en verre dans lesquels se trouve un absorbeur sélectif.

Le vide réalisé dans les tubes permet de diminuer fortement les pertes thermiques du capteur, l'autre avantage de ce capteur est de pouvoir être disposé suivant n'importe quelle inclinaison ce qui facilite son intégration.

Il existe différents types de collecteurs à tubes sous vides :

à flux direct : dans ce type de capteur, le fluide caloporteur circule à l'intérieur de l'absorbeur, permettant ainsi un rendement élevé.

à caloduc : dans les tubes sous vide à caloduc, l'absorbeur contient un liquide vaporisé sous vide partiel. Cette vapeur chauffée se condense dans un condenseur et retourne sous forme liquide dans l'absorbeur. Le condenseur, lui s'occupe de transférer la chaleur au fluide caloporteur. Ce système nécessite une inclinaison minimale du tube absorbeur.

de type Sydney : le tube "Sydney" se caractérise par un tube de verre à double paroi pour éviter une perte du vide. La surface absorbante est située sur le tube de verre intérieur. L'arrondi du tube nécessite l'utilisation d'un réflecteur pour utiliser toute la surface de l'absorbeur, d'où son appellation de tube CPC (Concentrateur parabolique composé).



Image 16 : Capteur sous vide.

III.3 Description d'un capteur solaire plans

Un capteur plan utilise l'effet de serre et parvient à récupérer environ 50% de l'énergie Incidente. Il se compose des éléments suivants : La couverture transparente (le vitrage), la surface absorbante (l'absorbeur), l'isolant, le fluide caloporteur et le boîtier.

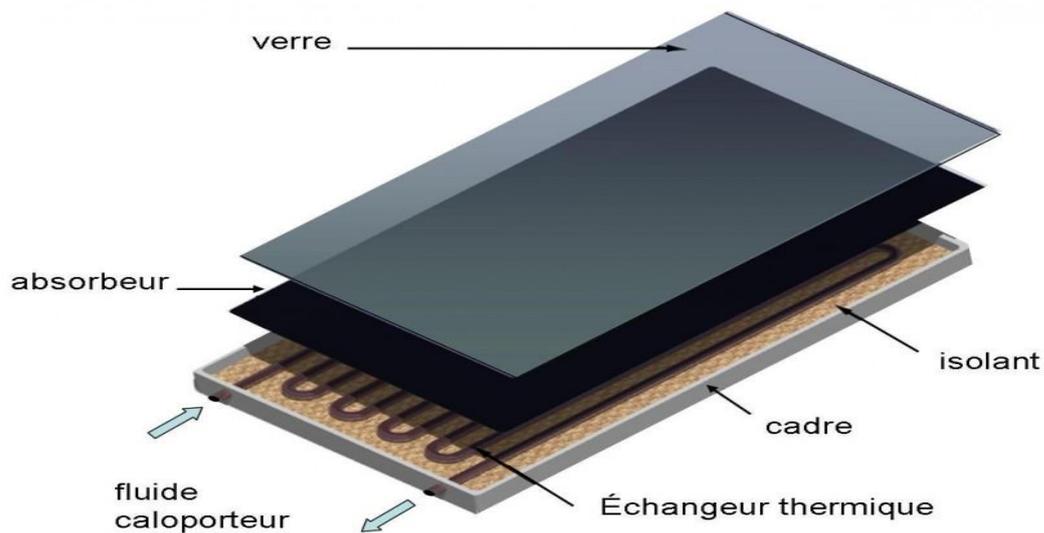


Figure 14 : Différents éléments d'un capteur solaire plan à eau.

III.3.1 Élément de construction

III.3.1.1 Absorbeur

L'absorbeur joue le rôle principal dans le capteur solaire plan. C'est généralement un corps noir qui absorbe toutes les rayonnements dans le spectre du visible, de l'ultraviolet et une petite quantité dans l'infrarouge. Il transforme le rayonnement solaire de courtes longueurs d'ondes en chaleur. La fraction du rayonnement solaire incident qui est absorbée par le 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.

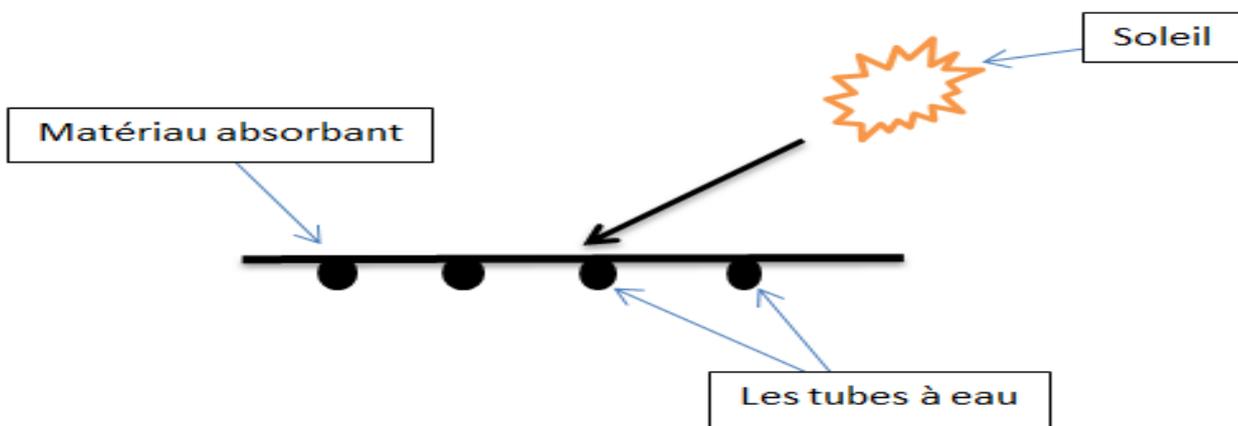


Figure 15 : plaque absorbante d'un capteur solaire.

L'absorbeur en chauffant va rayonner dans l'infrarouge. La fraction d'énergie effectivement rayonné 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 : $E = \varepsilon \sigma T^4$

Où (σ) est la constante de Stefan-Boltzmann : $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \text{K}^4$

Le choix du matériau et le mode de construction à une grande influence sur la qualité du capteur. Le matériau constituant la plaque de l'absorbeur peut être soit métallique soit en matière plastique.

Dans les cas des métaux on utilise le plus couramment, du fait de leurs conductivités élevées, le cuivre, en acier inoxydable ou l'aluminium.

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 7 : 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 8 : Revêtements des surfaces d'absorbeur.

III.3.1.2 le fluide caloporteur

Il est chargé de transporter la chaleur entre deux ou plusieurs sources de température. Il est choisi en fonction de ses propriétés physiques et chimiques, il doit posséder une conductivité thermique élevée, une faible viscosité et une capacité calorifique élevée.

Dans le cas des capteurs plans, on utilise de l'eau à laquelle on ajoute un antigel (généralement de l'éthylène glycol) ou bien de l'air. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants :

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

Cependant il présente certains inconvénients, à savoir :

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

Dans notre cas on utilise l'eau comme fluide caloporteur.

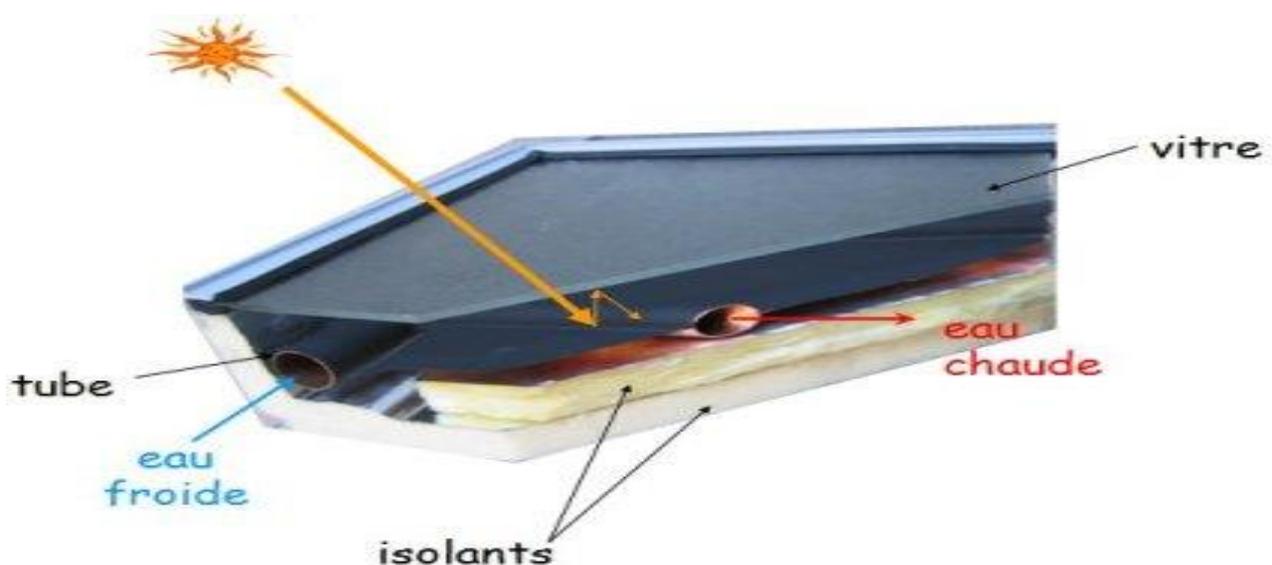


Figure 16 : capteur solaire plan à eau avec son système d'évacuation.

Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire la plus possible la résistance thermique de contact.

III.3.1.3 Le vitrage ou la couverture transparente

Le verre laisse passer entre 84 et 92% du rayonnement solaire (sous l'incidence normale) selon le degré de pureté et l'utilité de recouvrir l'absorbeur par une couverture transparente est de retenir les radiations infrarouges émises par l'absorbeur, tout en laissant passer le maximum de rayonnement solaire.

Il existe deux types de vitrages : vitrage simple et vitrage double. C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement IR, elle est facultative mais peut permettre d'accroître le rendement du convertisseur par effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent.

L'intérêt d'une couverture transparente pour le rayonnement solaire est d'autant plus important que température de fonctionnement du convertisseur est plus élevée. C'est donc pour des températures dépassant 70°C que l'on peut envisager d'installer un double vitrage afin d'accroître le rendement.

Les couvertures transparentes habituelles sont pour la plupart en verre 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 tel que le polycarbonate, le polyméthacrylate, ou bien le polyester armé.

La plupart du temps le vitrage est légèrement structuré et disperse ainsi la fraction réfléchi du rayonnement solaire incident, afin de diminuer un éventuel éblouissement.

Les caractéristiques essentielles d'un vitrage sont :

- ✓ Le coefficient de transmission (τ).
- ✓ L'émissivité (ϵ).

Le coefficient de transmission (τ^*) est essentiellement déterminé par la structure du vitrage (double ou triple, l'épaisseur des vitres, des espaces et la nature du gaz de remplissage).

Les propriétés de divers types de verre sont données au tableau ci-dessous.

Matériau	Nom commercial	Épaisseur (mm)	τ^* %	ρ Kg/m ³	C_p J/Kg.K	λ W/m.K	K_d 10 ⁻⁵ /K
Verre à vitre	-	3	85-92	2700	840	0,93	0,9
Polycarbonate	Lexan	3,2	82-89	1200	1260	0,2	6,6
polyméthacrylate	Plexiglas	3 ,2	89-92	1200	1460	0,2	7
Polyester armé	-	1	77-90	1400	1050	0,21	3,5

Tableau 9 : Caractéristiques optiques des matériaux.

Le vitrage n’absorbe que faiblement le rayonnement solaire d’où il transmet donc un maximum d’énergie vers l’absorbeur.

Au Tableau sont données les caractéristiques optiques des matériaux, utilisés comme couverture transparente.

Matériau	Indice de réfraction	Epaisseur	Transmittivité
Verre	1 ,518	3-4	0,840
Lexan	1,586	3-4	0,840
Téflon	1,343	0,05	0,960
Tedlar	1,460	0,10	0,920
Mylar	1,640	0,10	0,870
Kynar	1,410	0,10	0,930
Marlex	1,50	0,10	0,920

Tableau 10 : Caractéristiques optiques des matériaux.

Actuellement le verre le plus utilisé pour les capteurs solaire plan est le verre prisme. Sa particularité est de diminuer la partie du rayonnement réfléchi (1,5%). Contrairement au verre trompé classique. Lorsque l’angle d’incidence est faible. Ce verre peut atteindre jusqu’à 96%de transmission.

III.3.1.4 Effet de serre

Le phénomène de l'effet de serre rappelle celui de la serre du jardinier : l'atmosphère terrestre Laisse passer la lumière du soleil mais emprisonne la chaleur.

Il y a deux phénomènes :

- ✓ Les rayons ultraviolets du soleil se jettent sur le sol terrestre et la terre en renvoie une partie de cette énergie vers le ciel.
- ✓ Or, une couche de vapeur d'eau et de gaz empêche une partie de cette chaleur de repartir dans l'espace, d'où réchauffement de la planète. Parmi les gaz concernés, la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et d'autres gaz à effet de serre présents dans l'atmosphère.

Alors on peut pratiquer le même principe sur les capteurs vitrés. Les Infrarouges (IR) émis par le soleil ou différents objets ont des propriétés différentes. Des matières telles que le verre ou certaines matières plastiques se laissent traverser (elles sont transparentes) par les IR issus du soleil ou de corps très chauds, mais sont opaques aux IR provenant d'objets dont les températures ne sont pas très élevées.

Dans le cas de la serre, les IR provenant du soleil traversent le verre et chauffent l'absorbeur dans les capteurs solaires, ce dernier émettent en direction de l'extérieur des IR, mais ceux-ci ne peuvent traverser le verre, ils sont absorbés. La vitre s'échauffe donc et émet à son tour des IR, la moitié vers l'intérieur de la serre, et l'autre vers l'espace, c'est une perte de chaleur qui occasionne un refroidissement de la serre, ainsi, la moitié seulement de l'énergie rayonnée par l'absorbeur est perdue,

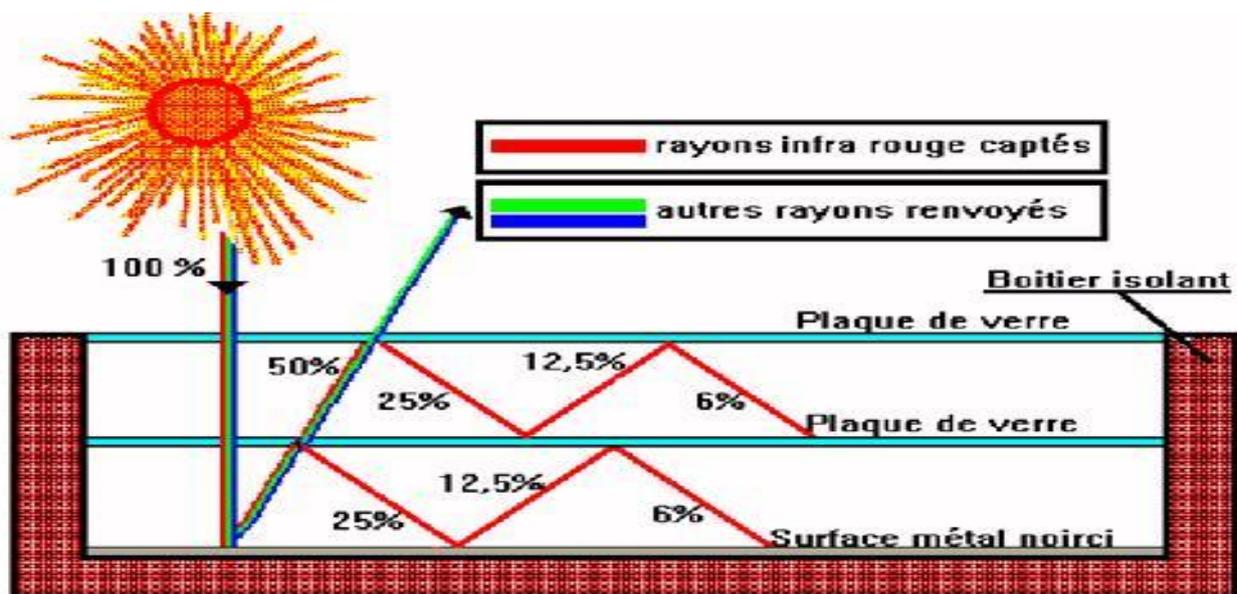


Figure 17 : L'effet de serre dans un capteur solaire thermique.

III.3.1.5 Isolation thermique

Le capteur doit être isolé thermiquement avec des matériaux appropriés. Ceux-ci doivent avoir un faible coefficient de conductivité thermique, afin de limiter les pertes thermiques par conduction à travers les faces postérieures et latérales du capteur plan. L'isolation doit généralement avoir une épaisseur de l'ordre de 5 à 10 cm.

Les matières isolantes utilisées sont soit des laines minérales, soit des matières synthétiques (de laine de verre, mousses expansives de polyuréthane ou polystyrène). Elle doit résister aux hautes températures atteintes à l'intérieur du capteur. Pour choisir un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

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

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

Matériau	Conductivité thermique λ W/m. K	Masse volumique ρ Kg/m ³	Chaleur massique C_p J/Kg. K	Diffusivité $a = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p}$ 10 ⁻⁷ m ² /s]
Laine de verre	0,036	40	840	10,7
Polystyrène	0,040	20	1500	13,3
Mousse	0,029	30	1600	6,0
Laine des roches	0,040	40	840	11,9
Liège expansé	0,048	120	1380	2,9

Tableau 11 : propriétés des quelques matériaux pouvant servir d'isolant.

Note : les valeurs sont données pour une température de 25°C et la variation de la conductivité thermique avec est suffisamment faible dans les problèmes pratiques pour qu'on puisse la négliger.

III.3.2 Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré

Une partie du rayonnement solaire qui arrive sur le vitre la traverse pour atteindre la plaque absorbante. Cette dernière s'échauffe et transfère la chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (essentiellement dans l'infrarouge) qui est réfléchi par la vitre, c'est le principe de « l'effet de serre ». L'isolant a pour fonction de minimiser les déperditions thermiques avec l'extérieur. En effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide, il faut donc minimiser les pertes avec l'environnement proche.

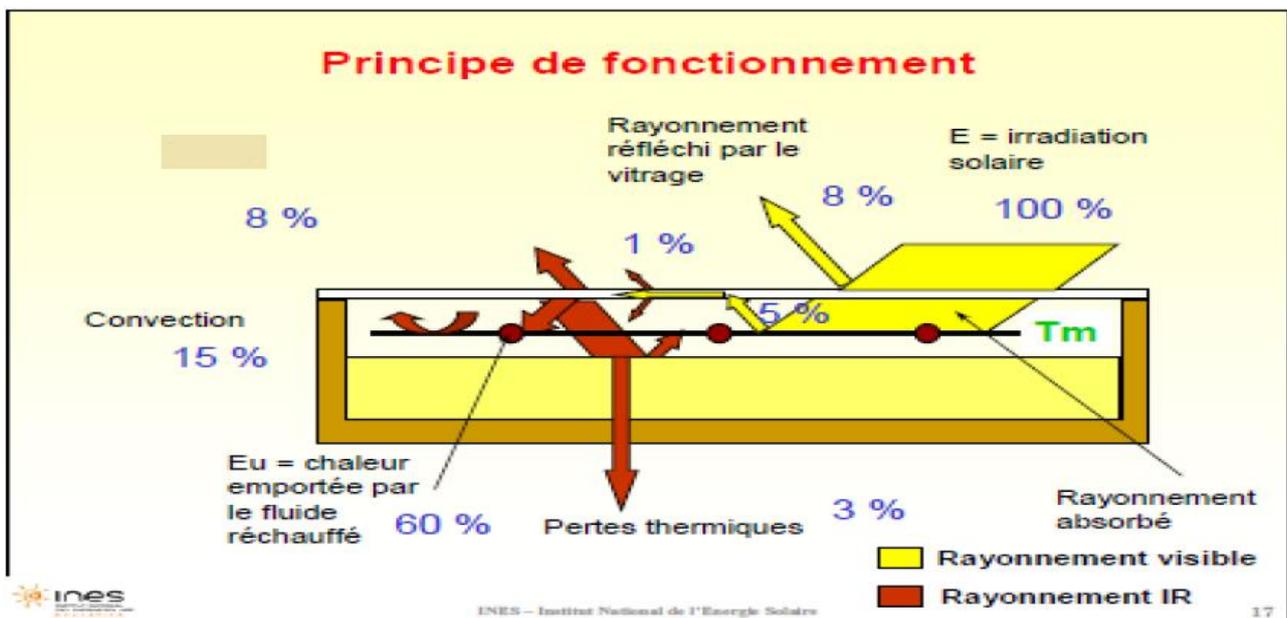


Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré.

➤ Avantages du capteur plan

- 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.

III.3.2.1 caractéristiques de fonctionnement des capteurs solaires

Les paramètres influant le rendement d'un capteur plan peuvent être classés en deux catégories : les paramètres externes et les paramètres internes.

1 : Les paramètres externes

Les principaux paramètres externes qui peuvent intervenir directement sur les performances d'un capteur plan sont :

- ✓ Paramètre d'ensoleillement : le rayonnement solaire, position du soleil, durée d'insolation, ...etc.
- ✓ Température ambiante
- ✓ Vitesse du vent

2 : Les paramètres internes

Paramètres géométriques :

- ✓ Les paramètres de position : angle d'inclinaison, orientation du capteur et emplacement du capteur.
- ✓ La surface du capteur.
- ✓ Les dimensions de différents éléments : épaisseur, longueur et largeur.

Paramètres de fonctionnement :

- ✓ La température d'entrée du fluide caloporteur.
- ✓ Le débit massique du fluide caloporteur.
- ✓ Les températures des différents éléments du capteur.

Paramètres de construction :

Parmi lesquels nous citons :

L'absorbeur :

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

- ✓ La différence de température entre l'absorbeur et l'air ambiant.

La surface sélective :

- ✓ Propriétés optiques.

Couverture transparente :

- ✓ Propriétés optiques et thermo physiques.
- ✓ Epaisseur.
- ✓ Le nombre de vitrage et la forme.

L'isolant :

- ✓ Propriétés thermo physiques et optiques.
- ✓ Epaisseur.

Fluide caloporteur :

- ✓ Régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et le débit.
- ✓ Température d'entrée.
- ✓ Propriétés thermo physiques.

Ces paramètres sont très importants. Ils permettent, en tenant compte du coût, d'avoir une température de sortie du fluide élevée (puissance utile élevée). En d'autres termes ; un meilleur rendement du capteur.

III.4 Rendement d'un capteur plan

Il est nécessaire d'avancer les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ✓ Le régime de l'écoulement est quasi stationnaire.
- ✓ La température du ciel est uniforme.
- ✓ La voûte céleste est assimilée à un corps noir pour de grandes longueurs d'ondes.
- ✓ Les propriétés des matériaux du capteur sont supposées constantes par rapport à la température ;
- ✓ La température du vitrage est uniforme.
- ✓ La vitesse d'écoulement et la distribution de la température sont unidimensionnelles.
- ✓ La construction du capteur est uniforme.
- ✓ L'effet de la température suivant l'axe vertical est négligeable car la plaque est supposée très mince.

- ✓ L'effet d'ombre est négligeable.
- ✓ La couverture transparente est nette de toute poussière ou autre saleté.
- ✓ La température de l'absorbeur est uniforme.
- ✓ La température du sol est supposée égale à la température ambiante.
- ✓ La température de la plaque absorbante est supposée égale à celle des tubes

III.4.1 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. [1]

Energie absorbée par le capteur

Energie perdue par le capteur

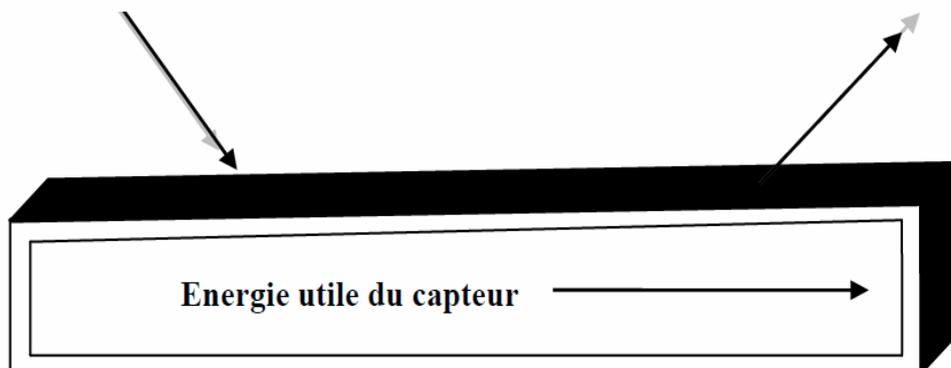


Figure 19 : Bilan thermique d'un capteur solaire plan.

Ainsi le bilan thermique global s'écrit :

$$Q^* = Q_u + Q_a + Q_t \quad (\text{III-1})$$

En termes de puissance on aura :

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

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 :

$$\eta = \frac{\dot{Q}_u}{G^*} \quad (III-3)$$

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.

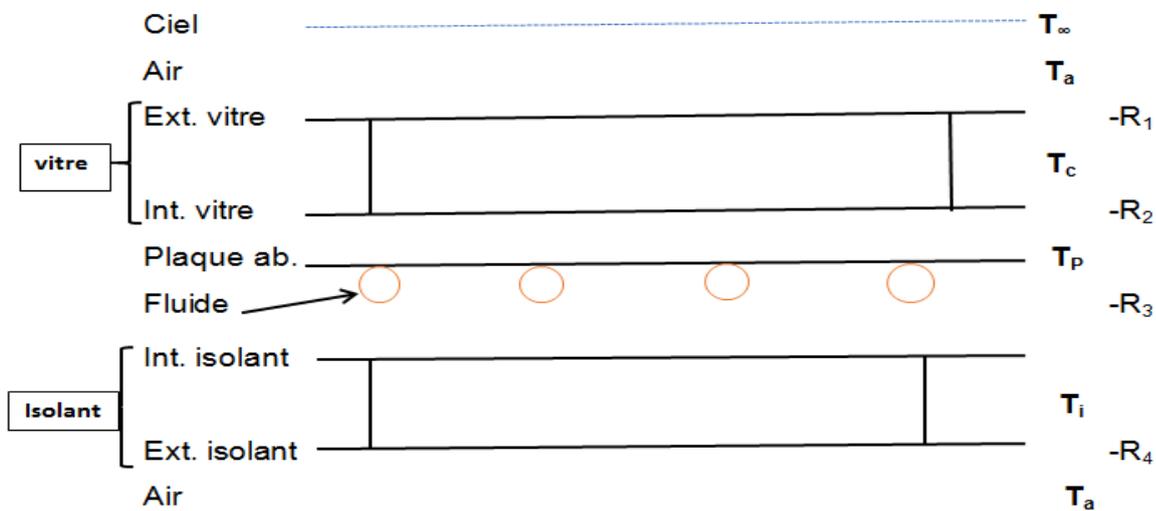


Figure 20 : Différents nœuds et l'analogie électrique équivalent relative du capteur.

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 :

$$R_1 = \frac{1}{h_{c1} \cdot h_{r1}}$$

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 :

$$R_2 = \frac{1}{h_{c2} \cdot h_{r2}}$$

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 :

$$R_3 = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

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 :

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R_3 + R_4} \quad (\text{III-4})$$

Et en utilisant les conductances thermiques :

$$K = K_{av} + K_{ar} \quad (\text{III-5})$$

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

Et

$$K_{ar} = \frac{1}{R_3 + R_4} \approx \frac{1}{R_3}$$

Puisque

$$R_4 \approx 0$$

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

$$\dot{Q}_a = k \cdot (T_p - T_a) \quad (\text{III-6})$$

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.

$$v^* = \tau_c^* \cdot \alpha_p^* \quad (\text{III-7})$$

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

$$\eta = v^* - K \frac{T_p - T_a}{G^*} \quad (\text{III-8})$$

III.4.2 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 :

$$\dot{Q}_u = \dot{M} \cdot C_p (T_{fs} - T_{fe}) \quad (III-9)$$

Posons :

$$F_t = \frac{\dot{M} \cdot C_p}{K} \cdot \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{FK}{\dot{M} \cdot C_p}\right) \right\} \quad (III-10)$$

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 : $\dot{m} = \frac{\rho \cdot \dot{v}}{n_t}$

F : Rendement d'irrigation.

$$F = \frac{1}{\frac{P}{D_e + 2 \cdot w \cdot \eta_w} + \frac{P \cdot K}{\chi \cdot h_c}} \quad (III-11)$$

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

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

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

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

On a donc

$$\dot{Q}_u = F_t \times [\dot{Q}^* - K(T_{fe} - T_a)] \quad (III-12)$$

D'où le rendement instantané :

$$\eta = F_t \times \left\{ v^* - K \frac{T_{fe} - T_a}{G^*} \right\} \quad (III-13)$$

Chapitre IV

Résultats et Interprétation

IV. Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats des calculs effectués sur le capteur solaire plan à eau. Ces calculs ont pour but l'étude de l'influence des paramètres tels que le temps solaire vrais et l'état du ciel sur le rendement de ce dernier. Les courbes théoriques sont présentées par les mêmes graphes. Les résultats sont présentés selon trois (3) cas :

- Ciel très pur (clair),
- Ciel moyennement troublé,
- Ciel trouble.

IV.1 Problématique

Notre travail consiste à déterminer le rendement instantané d'un capteur solaire plan à eau situé à une latitude de 45° pour des différents états du ciel du lever jusqu'au coucher du soleil. La journée choisie est celle du 15 février, elle est caractérisée par une orientation plein sud.

IV.2 Méthode

Les calculs numériques du rendement de notre capteur solaire ainsi que le rayonnement solaire incident sur ce dernier ont été fait à l'aide d'un programme numérique que nous avons développé sous le code de calcul Matlab. Ce dernier nous a permis d'aboutir à un ensemble de résultats théorique.

IV.3 Analyse des données

Le capteur étudié présente les caractéristiques suivantes :

Dimensions	Largeur : 0,5 m ; Longueur : 1,2 m
Températures	$T_a = 10^\circ\text{C}$; $T_{fe} = 35^\circ\text{C}$, $T_f = 40^\circ\text{C}$
Absorbeur	En cuivre ; Epaisseur : 1 mm
Tuyauterie	$n = 14$; $D_i = 10$ mm ; $D_e = 12$ mm ; $P = 35$ mm
Albédo	0,3
Conductance thermique [$\text{w}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$]	$K = 6,15$
Rendement optique [%]	80
Débit d'eau [l/h]	40
Fluide caloporteur	Eau

Tableau 12 : Les caractéristiques du capteur étudié.

IV.4 Interprétation des résultats

IV.4.1 Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global)

1 - Cas d'un ciel très pur :

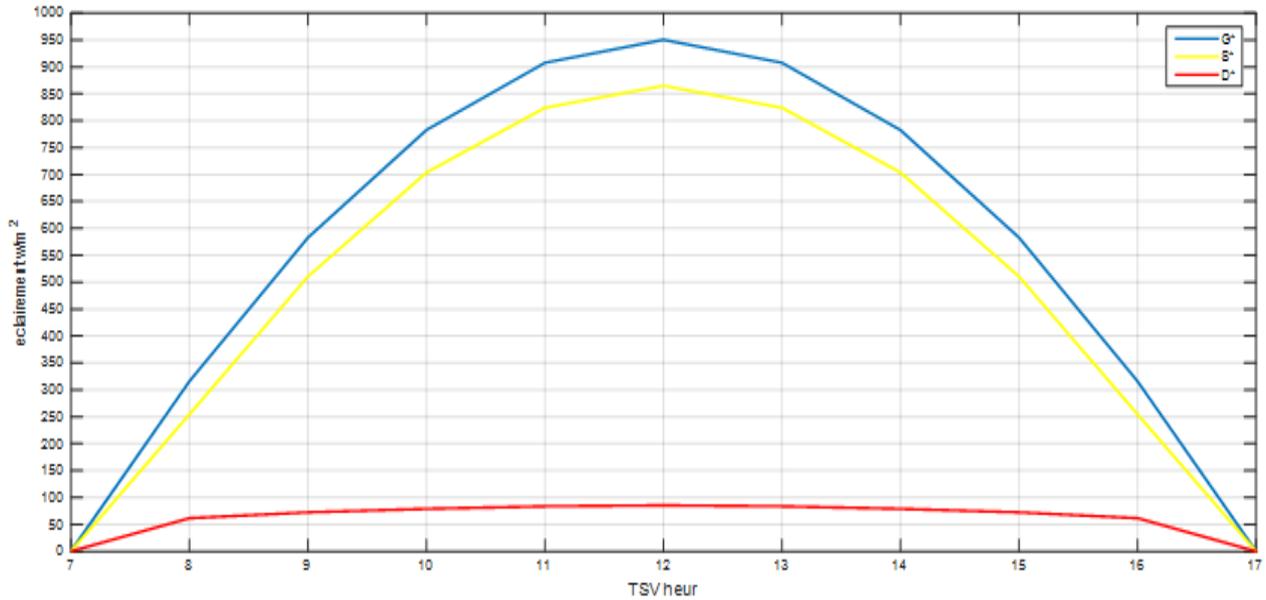


Figure 21 : Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global) pour le Cas d'un ciel très pur.

2 - Cas d'un ciel moyennement troublé :

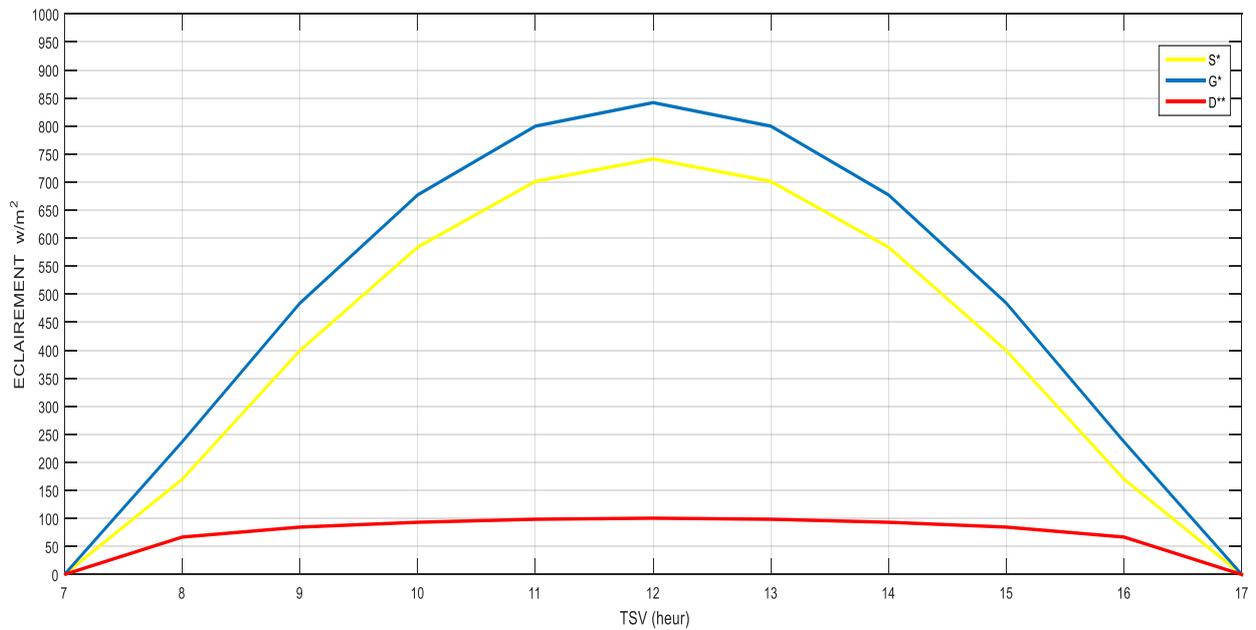


Figure 22 : Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global) pour le Cas d'un ciel moyennement troublé

3 - Cas d'un ciel trouble :

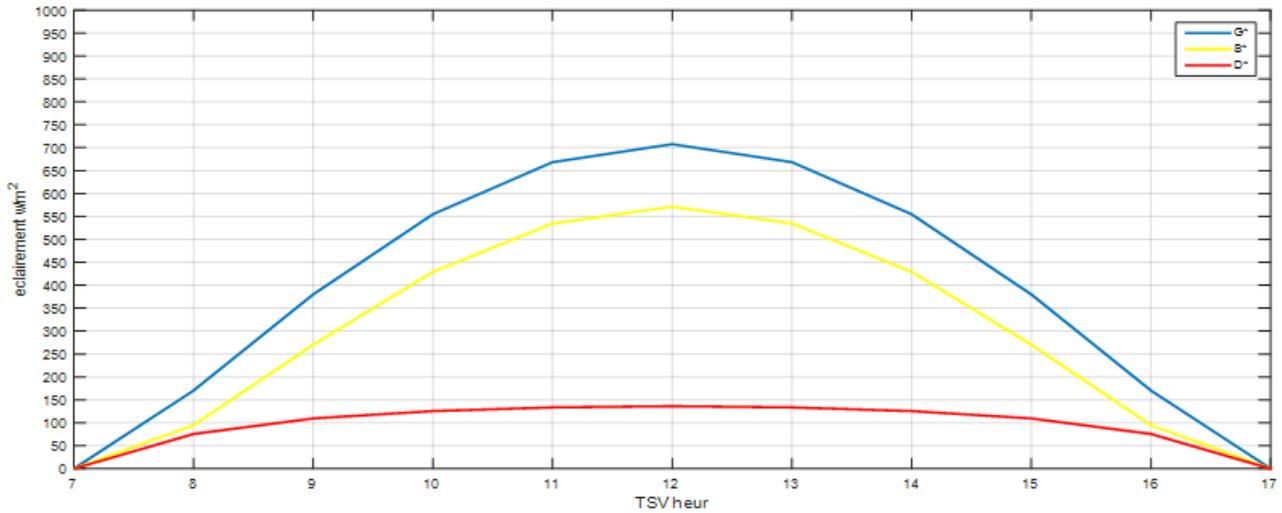


Figure 23 : Evolution de l'éclairement (direct, diffus et global) pour le Cas d'un ciel trouble

IV.4.2 Evolution de l'éclairement global

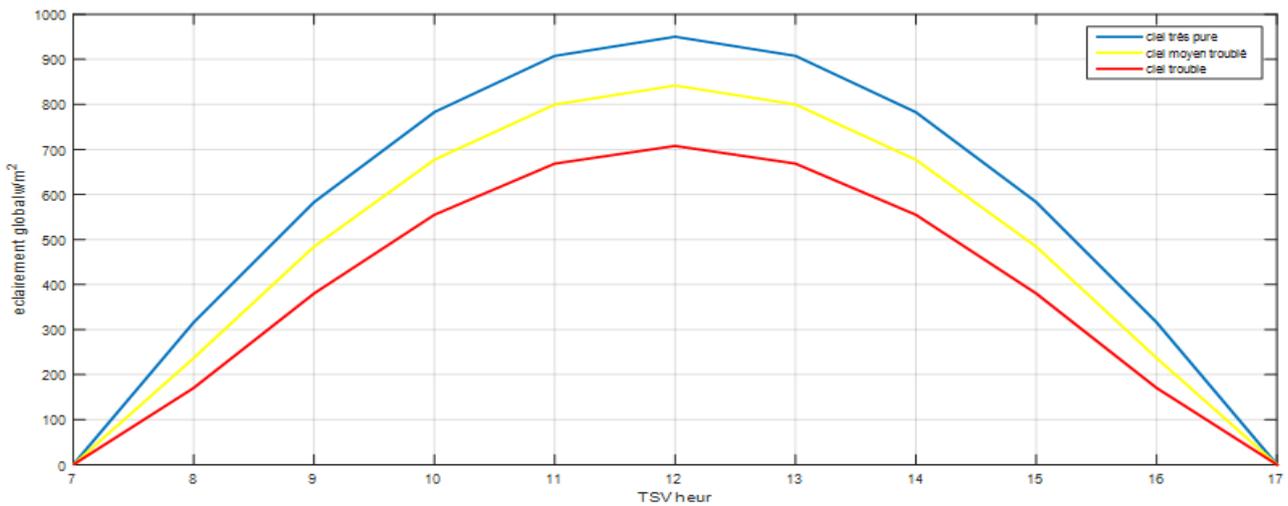


Figure 24 : Evolution de l'éclairement global pour les trois (03) Cas.

En analysant les résultats représentés par les figures ci-dessus, on en déduit ce qui suit :

- ✓ L'allure du rayonnement solaire global a la forme d'une cloche. Il est nul au lever du jour puis il commence à croître avec le temps, il est maximum aux environs de 12h TSV, après il commence à décroître pour atteindre le zéro au coucher du soleil.
- ✓ La composante diffuse commence à augmenter juste après la composante directe mais sa croissance reste modérée pendant la journée, elle dépasse légèrement 100 W/m^2 .
- ✓ La valeur maximale des courbes est environ 950 W/m^2 pour le cas du ciel très pur ; 850 W/m^2 pour le cas du ciel moyennement troublé et 700 W/m^2 pour le cas du ciel trouble

- ✓ Finalement, on constate que l'apport de la composante directe dans l'évolution du rayonnement global est le plus important. Pour un rayonnement global d'une valeur égale à 950 W/m^2 , la valeur de l'éclairement direct est presque égale à 850 W/m^2 .

L'analyse de ces figures nous permet donc de constater que la meilleure manière pour avoir plus d'éclairement incident sur la surface d'un capteur solaire plan est d'opter pour le premier cas, c'est-à-dire le ciel très pur.

Si on considère un ciel très pur à la même latitude du lieu pour une inclinaison fixe et une orientation plein sud, l'éclairement solaire incident peut atteindre 950 W/m^2 .

❖ Discussion

Une puissance de $1,36 \text{ kW/m}^2$ est reçue par la Terre en dehors de l'atmosphère. Cette valeur est appelée constante solaire. Au cours de sa traversée de l'atmosphère terrestre, le rayonnement solaire est affaibli par la réflexion, les diffusions multiples et l'absorption par les particules de poussière et les molécules de gaz.

- ✓ La part du rayonnement qui traverse sans encombre l'atmosphère rencontre directement la surface terrestre : c'est le rayonnement direct.
- ✓ La part du rayonnement solaire réfléchi ou absorbé par des particules solides ou de gaz et rayonné à nouveau rencontre la surface terrestre dans toutes les directions : c'est le rayonnement diffus.
- ✓ La somme des rayonnements direct et diffus est appelée rayonnement global. Il est de 1000 W/m^2 maximum dans des conditions optimales (ciel clair et sans nuages, à midi).

Ce qui permet d'affirmer que plus l'état du ciel est troublé, plus le rayonnement solaire est faible et que nos résultats sont satisfaisants.

VI.4.3 Evolution des températures de sortie du fluide caloporteur

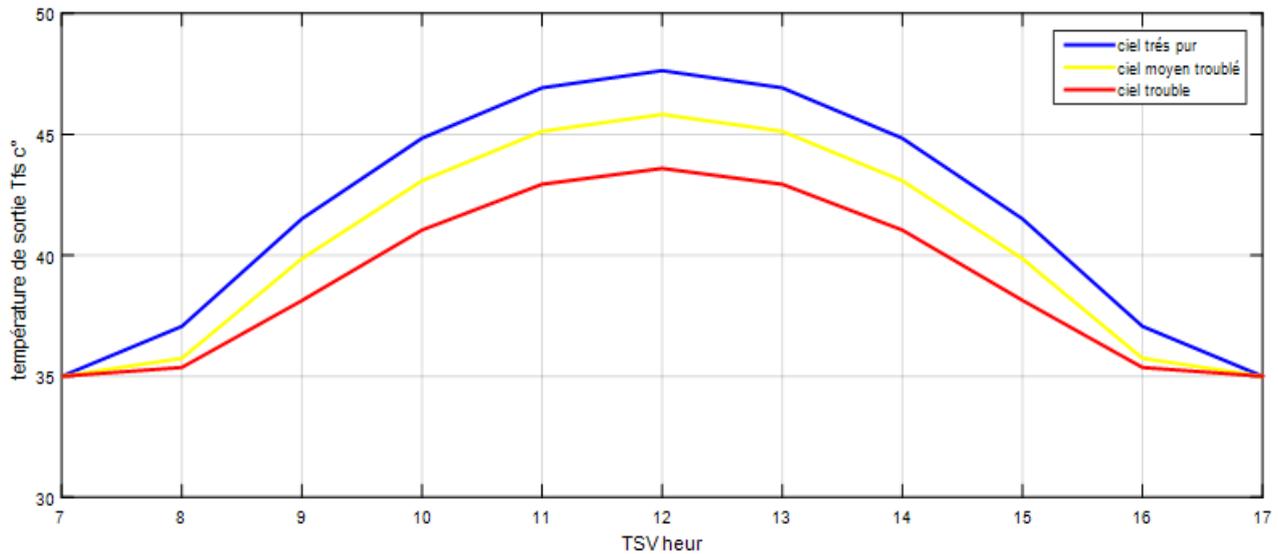


Figure 25 : Evolution de la température de sortie du fluide caloporteur pour les trois Cas.

On constate que les évolutions des courbes représentant les variations de température du fluide caloporteur pour les différents états du ciel s'accordent avec ceux décrivant les évolutions des éclairagements incidents, ce qui veut dire que le profil de la température de sortie du fluide caloporteur suit les variations temporelles de l'éclairage solaire incident. Donc plus l'éclairage solaire absorbé par le capteur est élevé, plus l'augmentation de la température de sortie du fluide caloporteur sera.

L'analyse de la figure représentant les variations des températures de sortie du fluide caloporteur pendant la journée nous renseigne également, d'une manière pratique sur l'évolution du rendement instantané du capteur qui est directement proportionnel à cette dernière.

On trouve les températures de sortie les plus élevées dans le cas du ciel très pur, les moins élevées dans le cas du ciel moyennement troublé et celles du ciel trouble sont faibles.

Par exemple à 9h la température de sortie est aux environs de 43°C pour le cas du ciel très pur, 40°C pour le cas du ciel moyennement troublé, 37°C pour le cas du ciel trouble, il augmente pour atteindre son maximum (respectivement 48, 46 et 43°C) aux alentours de midi solaire, moment qui correspond à un éclairage maximum aussi.

IV.4.4 Evolution du rendement instantané du capteur

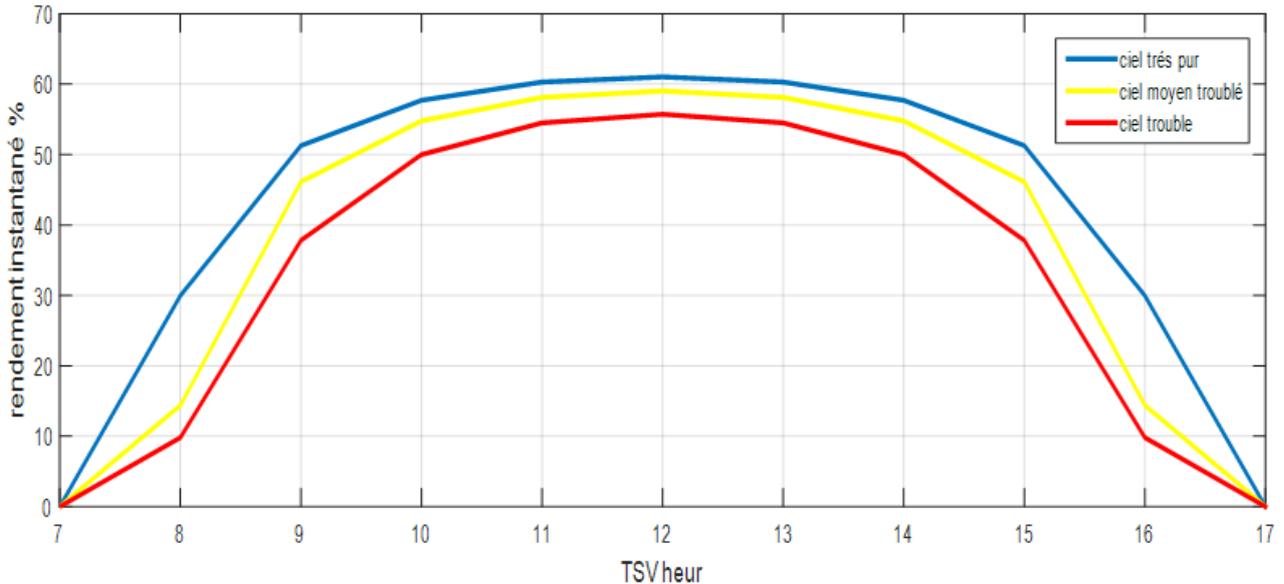


Figure 26 : Evolution du rendement instantané du capteur pour les trois (03) Cas.

Une comparaison des rendements instantanés est donnée par cette figure. On constate une meilleure performance pour le cas du ciel très pur. Le capteur plan exposé à un ciel troublé a le rendement le plus bas malgré qu'il reçoive le plus d'éclairement diffus et ceci s'explique par le fait que l'augmentation du taux du rayonnement solaire diffus entraîne l'augmentation de la température de l'absorbeur, donc l'écart de température entre cette dernière et la température ambiante sera plus important et par conséquent les pertes thermiques vers le milieu ambiant extérieur seront élevées.

Pour l'ensemble des résultats obtenus, on remarque que les courbes des éclaircissements, des températures de sortie, et des rendements des trois (03) cas étudiés présentent une forme Gaussienne, accroissement depuis le lever du soleil en passant par un maximum suivi d'un décroissement jusqu'au coucher.

Conclusion générale

Conclusion Générale

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

Après avoir fait une généralité sur les énergies renouvelables et passé en revue quelques données astronomiques nécessaires à toute étude de dispositifs solaires, nous avons dressé un état de l'art des capteurs solaires plans. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents coefficients d'échanges thermiques par rayonnement entre les différents composants du capteur afin d'établir les équations gouvernant le comportement thermique de ce dispositif en régime permanent et sa performance.

Les résultats auxquels on est arrivé mettent en évidence l'influence des paramètres opérationnels à savoir le rayonnement incident, l'effet du trouble atmosphérique sur le rayonnement global, la température de sortie et sur le rendement instantané d'un capteur solaire plan.

Il apparaît clairement que le rendement instantané est une fonction proportionnelle de l'irradiation solaire globale qui joue un rôle prépondérant. En outre, l'augmentation de la température de sortie du fluide favorise l'amélioration du rendement instantané du capteur.

Les résultats présentés dans ce travail nous permettent de tirer les conclusions suivantes :

- La température de l'eau à la sortie du capteur varie en fonction de l'éclairement sur l'absorbeur.
- Notre étude nous a permis d'obtenir des températures du fluide assez élevées à la sortie surtout dans le cas du ciel très pur quand on peut atteindre des températures de sortie proches de 50°C favorable pour les exploiter dans les applications de chauffe-eau solaire.
- Aux environs de 12h, nous remarquons que le gain de température ($T_{fs} - T_a$) dans le cas du ciel très pur est supérieur que celle dans les deux autres cas, ce qui confirme l'efficacité d'un capteur solaire exposé à un ciel clair et améliore son rendement instantané.

Par ailleurs, un capteur est d'autant plus performant :

- ❖ Qu'il fonctionne à une température d'entrée du fluide caloporteur proche de la température ambiante. => Travail à basse température idéal ;
- ❖ Que l'éclairement est important. => Orientation, état du ciel et inclinaison adaptée

Annexes

Caractéristique de l'eau à des différentes températures :

T (c°)	ρ (kg/m ³)	C_p (j/kg.k)	μ (10 ⁻³ pi)	ν (M ² /s)	λ (w/m.k)	a 10 ⁻⁶ (m ² /s)	Pr
0	1000	4220	1,789	1,79	0,555	0,132	13,60
5	999	4208	1,548	1,55	0,570	0,136	11,42
10	999	4195	1,306	1,31	0,585	0,140	9,37
15	998	4189	1,156	1,16	0,592	0,141	8,18
20	998	4183	1,005	1,01	0,598	0,143	7,03
25	997	4180	0,904	0,91	0,609	0,146	6,21
30	996	4176	0,802	0,81	0,619	0,149	5,41
35	994	4175	0,728	0,73	0,626	0,151	4,86
40	992	4174	0,653	0,66	0,632	0,153	4,31
45	990	4175	0,602	0,61	0,639	0,154	3,93
50	988	4175	0,550	0,56	0,645	0,156	3,56
55	985	4177	0,510	0,52	0,650	0,158	3,28
60	983	4179	0,470	0,48	0,654	0,159	3,00
65	980	4182	0,438	0,45	0,659	0,161	2,78
70	978	4185	0,406	0,42	0,664	0,162	2,56
75	975	4192	0,381	0,39	0,668	0,163	2,39
80	972	4199	0,355	0,37	0,672	0,165	2,22
85	968	4200	0,335	0,35	0,674	0,166	2,09
90	965	4201	0,315	0,33	0,676	0,167	1,96
95	962	4209	0,299	0,31	0,678	0,167	1,85
100	958	4216	0,282	0,29	0,680	0,168	1,75

ρ : Masse volumique

C_p : Chaleur spécifique

μ : Viscosité dynamique

λ : Conduction thermique

a : Diffusivité

Pr : Nombre de Prandtl

Quelques notions en transfert thermique par convection :

On trouvera ci-dessous quelques corrélations empiriques permettant de déterminer le coefficient h d'échange thermique par convection naturelle ou forcée.

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

Nombre de Reynolds : $Re_x = \frac{\rho \cdot c \cdot x}{\mu}$ avec c vitesse en (m/s) avec : $C = \frac{4 \cdot \dot{v}}{\pi \cdot D^2}$;

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

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

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

Convection naturelle :

Entre deux plaques planes définissant un volume fermé :

La longueur caractéristique est b (épaisseur de la lame d'air)

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

$Gr < 1700 + 47,8 i$ $Nu = 1,013$

$Gr > 80000$ $Nu = 2,5 + 0,0133(90 - i)$

Autrement $Nu = [0,06 + 3.10^{-4} . (90 - i)]. Gr^{0,33}$

Convection forcée :

Écoulement laminaire dans une conduite :

La couche limite est supposée complètement développée

La paroi du tube est soumise à flux d'énergie constant : $h = 4,36 \frac{\lambda}{D}$

La paroi du tube à température constante : $h = 3,66 \frac{\lambda}{D}$

Écoulement turbulent dans une conduite

$$h = 0,023 . \frac{\lambda}{D} . Re^{0,8} . Pr^{0,4} \quad (\text{Formule utilisable avec l'air ou l'eau})$$

Références Bibliographiques

Ouvrage

- [1] : J. BERNARD. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipses Edition Marketing. (2004).
- [2] : PIERRE HENRI Communay : Héliothermiques ; Le gisement solaire Méthodes et calculs. Groupe de Recherche et d'Édition-2002.
- [3] : R. BERNARD, G. MERGUY, M. SCHWARTZ, Le rayonnement solaire : conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième Édition-1980.
- [4] : A, SFEIR ; G, GUARRACINO. Ingénierie des systèmes solaires, Technique et Documentation, Paris. (1981).
- [5] : Y. JANNOT. Thermique solaire. 2007.

Article

- [6] : Mme BOUHEDIBA MALIKA. Simulation thermique d'une maison solaire pour la Production d'eau chaude sanitaire (ECS). <<Master Simulation Mécanique et Energétique>>. Université Hassiba Ben Bouali de Chlef.
- [7] : AGHILAS BRAHIMI. Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau. <<Master Mécanique et Energétique>>. UNIVERSITE DE LORRAINE, Faculté des sciences et technologies Nancy 1.
- [8] : BENKHELIFA, A. Optimisation d'un capteur solaire plan. <<Master Génie des procédés >> Université Kasdi Merbah Ouargla (2012).
- [09]: S. A. HAKEM, N. KASBADJI-MERZOUK, M. MERZOUK. Performances journalières d'un chauffe-eau solaire, Revue des Energies Renouvelables (2008).
- [10] : Atlas d'Algérie énergie solaire.

Site web

- [11] : tpe de si. [En ligne],2011, [consulté le 14 avril 2017]. Disponible sur : <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/>
- [12] : énergie bits. [En ligne], 2011[consulté le 8/04/2017]. Disponible sur : www.2020energy.eu/sites/default/files/pdf/sources_d_energie_renouvelable.pdf
- [13] : Énergie renouvelable 101. [En ligne]. Livane N'san-Bouedy,2016[consulté le 8/04/2017]. Disponible sur : <https://fr.linkedin.com/pulse/le-renouvelable-livane-n-bouedy>

Références Bibliographiques

[14] : TPE photovoltaïque. [En ligne]. Van Ooteghem Claire, 2017 [Consulté le 05/05/2017]. Disponible sur : <http://tpe.photovoltaïque.free.fr/>

[15] : Futura planète. [En ligne]. Janlou Chaput, Futura 2017[consulté le 25/04/2017]. Disponible sur :

<http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/climatologie-atmosphere-850/>

[16] : albédo. [En ligne], 16 avril 2017 [consulté le 20/04/2017]. Disponible sur :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Alb%C3%A9do>

[17] : TPE photovoltaïque. [En ligne]. Novembre 2010. [Consulté le 05/05/2017]. Disponible sur :

http://document.environnement.brussels/opac_css/electfile/IF%20ENERGIE%20Mod3%20Fonctionnement%20technologies%20PV%20FR.

[18] : AIE. [En ligne]. 2010. [Consulté le 09/05/2017]. Disponible sur :

www.enr.fr/.../2010171642_Fichessolairethermodynamiqueintegralemai2010.pdf

[19] : Pyrhéliomètre. [En ligne]. 2015. [Consulté le 02/05/2017]. Disponible sur :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/Pyrh%C3%A9liom%C3%A8tre>

[20] : L'héliographe. [En ligne]. 2016. [Consulté le 02/05/2017]. Disponible sur :

<https://fr.wikipedia.org/wiki/H%C3%A9liographe>

Résumé

Le but de ce travail est d'étudier les performances d'un capteur solaire plan à eau en régime permanent caractérisé par une orientation pleine sud. Notre choix est porté sur un site quelconque à une latitude de 45° , dans les distinctions suivantes :

- L'état du ciel est variable,
- La durée d'insolation est grande,
- Le rayonnement solaire est gratuit,
- On choisit comme typique le 15 février.

Dans cette étude théorique, on a commencé par une étude comparative des trois modèles du rayonnement solaire et leur influence sur le rendement de capteur et la température de sortie de fluide caloporteur. On remarque de cette étude que pour avoir un rendement optimum il faut que l'irradiation solaire globale reçu par le capteur soit optimale ainsi la température de sortie et pour cela il faut opter pour le ciel très pur (950 W/m^2 et 48°C dans notre cas).

Mots-clefs : Energie solaire, capteur solaire plan, état du ciel, rendement instantané.

ملخص

الهدف من هذا العمل هو دراسة أداء اللاقط الشمسي لتسخين الماء بنظام ثابت ذات التوجه جهة الجنوب. وتركز خيارنا على موقع عادي على خط عرض 45 درجة بالموصفات التالية :

← حالة الجو متقلبة

← مدة اشعاع الشمس طويلة

← اشعاع الشمس مجاني

← اخترنا كنموذج للدراسة يوم 15 فيفري

في هذه الدراسة النظرية. قمنا بدراسة مقارنة بين النماذج الثلاثة من الإشعاع الشمسي وتأثيرها على مردود اللاقط ودرجة حرارة المائع الخارج من اللاقط الشمسي.

لاحظنا من هذه دراسة انه من أجل أداء أفضل لللاقط الشمسي يجب ان تكون اشعة الشمس الممتصة من طرف اللاقط وكذلك حرارة المائع اكبر ومن أجل هذا يجب اختيار السماء النقية (950 واط/م^2 و 48° درجة في حالتنا).

الكلمات الرئيسية : الطاقة الشمسية, اللاقط الشمسي, حالة الجو, الكفاءة لحظية.

Abstract

The purpose of this work is to study the performance of a water planar solar collector in steady state, characterized by a south-facing orientation. Our choice is made on any site at a latitude of 45° , in the following distinctions:

- The weather is volatile,
- The duration of Insolation is great,
- Solar radiation is free,
- It is chosen as typical on 15 February.

In this theoretical study, we began with a comparative study of the three models of solar radiation and their influence on the collector productivity and the heat transfer fluid outlet temperature. In order to obtain an optimum efficiency, the total solar irradiation received by the sensor must be optimized so that the outlet temperature is optimum and for this it is necessary to opt for the very pure sky (950 W / m^2 and 48° C in our case).

Keywords: Solar energy, solar collector, weather condition, Instant productivity