



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



UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU

X • Θ Λ • Δ Δ Σ X [: // : V • X [• Λ [• O

FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

*En vue de l'obtention du Diplôme de Master
 académique En génie mécanique*

Option: énergétique

THEME

Bilan thermique d'un chauffe-eau solaire

Réalisé par :

DRIF Idir

Proposé et dirigé par :

Mr. MOHELLEBI. H

2012-2013

REMERCIEMENTS

Ce travail a été mené à la raffinerie d'Alger, pour cela nous souhaitons exprimer notre gratitude à Monsieur le Directeur de la raffinerie de nous avoir accueilli ainsi qu'à tous les opérateurs pour avoir assuré le bon déroulement du stage.

Nous tenons à remercier Monsieur BEN AHMED pour avoir accepté de nous diriger dans ce projet et pour toute l'aide qu'il nous a apporté ;

Nous remercions aussi tous les enseignants de l'IAP de Skikda ; en particulier ceux qui ont contribué à la réussite de notre formation;

Nous remercions les membres de jury qui nous feront l'honneur d'examiner ce travail et de l'enrichir de leurs propositions.

Enfin nous remercions toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicaces

C'est avec beaucoup de joie que j'ai l'honneur de dédier ce travail à :

- + A mes très chers parents.*
- + A mes grand-mère Hammama et Tassadit.*
- + A la mémoire de mon grand père.*
- + A mes sœurs Souhila, Lynda, Dihya et Tiziri.*
- + A mes oncles en particulier khali Boualem et khali Achour*
- + A toute la famille Naroun, Houes, hadjir et charrid.*
- + A Malika et sa famille.*
- + A tous mes amis (es) et en particulier Roza ,
Fraxene, Amirouche Malik, Amine et Aziz.*
- + A toute ma famille de près ou de loin sans exception.*

SOMMAIRE

Introduction générale.....1

Chapitre I : Synthèse bibliographique

1. Introduction :.....2
2. Eclairement solaire :.....2
3. Température ambiante :.....2
4. Capteur solaire plan :.....3
5. Chauffe eau solaire à thermosiphon :.....3

Chapitre II : gisement solaire

1. Introduction :.....5
2. Données géométriques :.....5
2.1. Description de soleil :.....5
2.2. Mouvement de la terre autour de soleil :.....6
2.3. Mouvement apparent de soleil :.....7
3. Sphere celeste :.....8
4. Coordonnées célestes :.....9
4.1. Coordonnées géographiques (terrestres) :.....9
a. La latitude (φ) :.....9
b. La longitude (L) :.....10
c. L'altitude :.....10
d. L'inclinaison du plan (β) :.....10
4.2. Coordonnées équatoriale :.....10
a. la déclinaison (δ) :.....11
b. l'angle horaire (ω) :.....12
4.3. Coordonnées horizontales (h, a) :.....13

a. Hauteur angulaire (h) :.....	13
b. L'azimut (a) :.....	13
5. Paramètres de temps :.....	15
5.1. Le temps solaire vrai :.....	15
5.2. Le temps solaire moyen :.....	15
5.3. L'équation du temps :.....	15
5.4. Le temps universel :.....	16
5.5. Le temps légal :.....	16
5.6. Temps civil :.....	17
5.7. Durée du jour :.....	17
6. Diagramme solaire:.....	17
7. Caractéristiques du rayonnement solaire :.....	19
7.1. Le spectre solaire :.....	19
7.2. Insolation :.....	21
a. Insolation potentielle (théorique) SS_0 :.....	21
b. Durée d'insolation SS :.....	21
c. La fraction d'insolation σ :.....	21
d. La constante solaire :.....	21
7.3. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère :.....	22
a. Composition de l'atmosphère :.....	22
b. Masse d'air :.....	22
c. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :.....	23
➤ Absorption :.....	23
➤ Diffusion :.....	23
➤ Énergie reçue par le sol :.....	24
7.4. Différents types de rayonnement solaire :.....	24
a. Le rayonnement solaire direct :.....	24
b. le rayonnement solaire diffus :.....	26
c. Rayonnement global :.....	27
8. Instruments de mesure :.....	27
8.1. Le pyréliomètre :.....	27
8.2. Le pyranomètre :.....	28
8.3. L'héliographe :.....	29

9. Logiciels de dimensionnement solaire :.....	30
10. Conclusion :.....	30

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation du projet.

1. Introduction :.....	31
2. Principes des Capteurs solaires thermiques :.....	31
3. Les différents capteurs solaires thermiques :.....	31
2.1 Les capteurs à eau :.....	31
2.1.1 Les capteurs non vitrés :.....	31
2.1.2 les capteurs à tubes sous vide :.....	32
a. Le capteur à tube sous vide à circulation directe :.....	33
b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc" :.....	34
c. Les capteurs à tube sous vide à effet "Thermos" :.....	34
d. Les capteurs à tube sous vide "Schott" :.....	35
e. Les capteurs CPC :.....	35
2.1.3les capteurs plans vitrés :.....	36
2.2 Les capteurs à air :.....	37
3. Comparaison des différents capteurs :.....	38
4. Systèmes de chauffe-eau solaire :.....	38
5.1. Le chauffe-eau solaire monobloc :.....	38
5.2. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés :.....	39
5.2.1.à circulation forcée :.....	39
5.2.2.à thermosiphon :.....	39
5. Les différents systèmes existants :.....	39
5.1.Chauffe-eau Solaire Individuel :.....	39
5.2.Le système solaire combiné :.....	39
6.Installation des capteurs solaires :.....	40
7.1.Au sol :.....	40
7.2. En façade / en pignon :.....	40
7.3. Sur le toit :.....	40
8. Association des capteurs solaires :.....	40

9. Le fluide caloporteur :.....	41
10. Energie d'appoint :.....	42
11. L'effet thermosiphon :.....	42
12. Chauffe-eau solaire étudié :.....	44
12.1. Présentation de l'entreprise :.....	44
12.2. Chauffe-eau solaire objet d'étude :.....	45
12.3. Le capteur solaire :.....	46
12.4. La cuve de stockage :.....	48
12.5. Orientation du capteur :.....	49
13. Conclusion :.....	49

Chapitre IV : bilan thermique

1.Introduction :.....	50
2. Rappel de transfert de chaleur :.....	50
➤ Conduction :.....	50
➤ Convection :.....	50
➤ Rayonnement :.....	50
3. Bilan thermique:.....	51
3.1 Bilan thermique global de la vitre :.....	51
3.2. Bilan thermique de capteur plan :.....	51
4. Calcul des coefficients d'échange par convection :.....	55
5. Bilan thermique global :.....	57
6. Calcul de coefficient de pertes thermique global K :.....	58
7. Rendement de capteur :.....	59
8. Les besoins thermiques en eau chaude sanitaire :.....	61
9. Influence de l'épaisseur de la vitre:.....	63
10. Amélioration de rendement de chauffe-eau solaire :.....	64
a. Contact tube-surface absorbante :.....	64
b. Couche d'air entre l'absorbeur et l'isolant :.....	65

Sommaire

c. Couche de peinture :.....	65
d. Le vitrage :.....	65
e. Distance entre les tubes :.....	66
11. Conclusion:.....	67

Conclusion générale :.....	68
----------------------------	----

LISTE DES FIGURES

Figure	Intitulée	Page
I.1	Image du soleil	5
I.2	Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil	7
I.3	mouvement apparent du soleil observé d'un point de latitude θ	8
I.4	La sphère céleste imaginaire	9
I.5	les coordonnées géographiques	10
I.6	La déclinaison de la direction du terre-soleil et équateur	11
I.7	angle horaire ω du soleil	13
I.8	Coordonnées horizontales (h, a)	14
I.9	Variations annuelles de l'équation du temps	16
I.10	L'organigramme permettant la construction de diagramme solaire	18
I.11	exemple d'un diagramme solaire pour une latitude 45°N	19
I.12	répartition en longueur d'onde des ondes électromagnétique	20
I.13	La structure de l'atmosphère	22
I.14	Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse	23
I.15	La géométrie d'un plan incliné d'un angle β_1 par rapport à l'horizontale	26
I.16	Pyrhéliomètre permettant la mesure du rayonnement solaire direct	28
I.17	Pyranomètre donnant le rayonnement solaire global	29
I.18	Héliographe permettant de mesurer la durée d'insolation	29
II.1	le capteur moquette	32
II.2	couche argentée de baryum	32
II.3	Capteur à tube sous vide à circulation directe	33
II.4	Le capteur à tube sous vide à " Caloduc	34
II.5	Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"	34
II.6	Le capteur CPC	35
II.7	la coupe d'un capteur plan vitré	36
II.8	Le capteur à air	37
II.9	Schéma montrant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.	37
II.10	Le chauffe-eau solaire monobloc	38

II.11	le chauffe-eau solaire à élément séparé	38
II.12	les capteurs en série et les capteurs en parallèle	40
II.13	Image de chauffe-eau solaire de GTP	44
II.14	Plan général du capteur	45
II.15	La coupe A-A de capteur GTP	46
II.16	structure de la cuve de stockage	47
III.1	répartition de rayonnement solaire à travers la vitre	51
III.2	schéma donnant les températures des différents niveaux d'un capteur plan	51
III.3	Flux de chaleur qui atteint l'absorbeur	53
III.4	les différents flux réagissant sur le capteur	57
III.5	Pertes et rendement de capteur pour la journée de 13/06/2012	60
III.6	Pertes et rendement de capteur pour la journée de 14/06/2012	60
III.7	Pertes et rendement annuelles de capteur	61
III.8	Les besoins thermiques en eau chaude sanitaire	63
III.9	figure illustrant la variation de l'épaisseur de la vitre	64
III.10	Contact tube-surface absorbante	64
III.11	La couche d'air entre l'absorbeur et l'isolant	6
III.12	La couche de peinture qui couvre l'absorbeur	65
III.13	L'influence de vitrage sur les rayons solaires	66
III.14	L'influence de double vitrage sur les rayons solaires	66
III.15	Evolution du rendement des capteurs en fonction de la distance entre les tubes	67

LISTE DES TABLEAUX

Tableau	Intitulée	Page
II.1	caractéristiques principales du soleil	6
II.2	Numéro du jour de l'année	12
II.3	répartition en longueur d'onde des ondes électromagnétique.	20
II.4	Les valeurs de la puissance surfacique	24
II.5	albédo solaire de différentes surfaces	14
II.6	Coefficients de trouble du ciel	15
II.7	Quelques logiciels de dimensionnement solaire	30
III.1	Valeurs de la masse volumique de l'eau en fonction de la température	42
III.2	caractéristiques dimensionnelles du capteur	46
III.3	caractéristiques des matériaux de chauffe-eau solaire étudié.	47
IV.1	Besoins thermiques en eau chaude sanitaire	62
IV.2	Influence de l'épaisseur de la vitre	63

NOMENCLATURE

Liste des caractères alphabétiques

Lettres	Désignation	unités
a	L'azimut	-
alb	Albédo du sol	-
G	Rayonnement global	w/m ²
S	Rayonnement direct	w/m ²
D	L'éclairement diffus	w/m ²
SS ₀	Durée maximale d'insolation	heure
SS	Durée d'insolation	heure
C	correction de la distance terre-soleil	-
C*	constante solaire	-
Z	Distance zénithale	°
h	Hauteur angulaire	degré
dj	Durée de jour	heure
TSM	Temps solaire moyen	heure
TL	Temps l'égale	heure
TSV	Temps solaire vrais	heure
ET	Equation de temps	-
TU	Temps universel	heure
d	Diamètre	m
S	Surface de l'absorbeur	m ²
Lc	Désigne la longueur du capteur	m
e _i	Epaisseur de l'isolant	m

e	Distance entre la plaque absorbante et le vitrage	m
m	Masse d'air	-
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
C _p	Chaleur massique	Kj/kg°C
\dot{m}	Débit massique	Kg/s
R _e	Nombre de Reynolds	-
N _U	Nombre de Nusselt	-
G _r	Nombre de Grashof	-
P _r	Nombre de Prantl	-
Ra	Nombre de rayleigh	-
h _c	Coefficient d'échange par convection	w/m ² k
hr	Coefficient d'échange par rayonnement	w/m ² k
T _a	Température de la lame de l'air	°C
T _{abs}	Température de l'absorbeur	°C
T _v	Température de la vitre	°C
T _c	Température de la voûte céleste	°C
T _s	Température de l'eau à la sortie des tubes de l'absorbeur	°C
T _e	Température de l'eau à l'entrée des tubes de l'absorbeur	°C
v	Vitesse de vent	m/s
F	Facteur de forme	-
k	Coefficient global d'échange	w/m ² °c
R	Résistance thermique	m ² °c/w
Q	Flux de chaleur	w
Q _t	énergie de démarrage	w

Q_a	énergie perdue vers l'extérieur	w
Q_u	énergie emmagasinée	w

Liste des caractères grecs

Symbole	désignation	unités
ρ_{air}	Masse volumique de l'air	Kg/m ³
λ_{air}	Conductivité thermique de l'air	w/m°C
μ_{air}	Viscosité dynamique de l'air	Pa.s
ρ_{eau}	Masse volumique de l'eau	Kg/m ³
ρ_0	Masse volumique à T=0°C	Kg/m ³
λ_{eau}	Conductivité thermique de l'eau	w/m°C
μ_{eau}	Viscosité dynamique de l'eau	Pa.s
λ	Conductivité thermique	w/m°C
τ	coefficients de transmission	-
α	coefficients de l'absorption	-
ρ	coefficients de réflexion	-
ε	émissivités	-
β	Inclinaison de capteur	degré
β'	Coefficient de dilatation	°C ⁻¹
δ	Déclinaison du solaire	degré
ω	Angle horaire	degré
φ	latitude	degré
σ	Fraction d'insolation	-
σ	Constante de STEFAN- BOLTZMAN	w/m ² °c
Δ	Décalage horaire	heure
Ψ_0	Longitude Greenwich	-

Liste des notations indicielles

Symbole	Désignation
<i>f</i>	froid
<i>c</i>	chaud
<i>i</i>	intérieur
<i>e</i>	extérieur
<i>p</i>	Plaque absorbante
<i>r</i>	rayonnement
<i>cv</i>	Convection
<i>cd</i>	conduction
<i>abs</i>	absorbeur
<i>ref</i>	réfléchie
<i>tran</i>	transmise
<i>inc</i>	incidente
<i>abs</i>	absorbée
<i>v</i>	vitre
<i>vc</i>	la voûte céleste
<i>i</i>	isolant

Introduction
Générale

Introduction générale

Le monde connaît depuis plus d'un siècle un important développement socio-économique et l'énergie constitue le vecteur qui véhicule ce développement, de fait elle devient un enjeu important pour toutes les nations développées ou en voie de développement. La croissance industrielle a générée une très grande augmentation de la demande sur les énergies fossiles et cette demande ne cesse de se croître. Les émissions des gaz à effet de serre (CO₂, NO_x), le caractère limité des réserves fossiles et les tensions et les guerres provoquées pour assurer l'indépendance énergétique des nations, sont les conséquences de surexploitation des réserves fossiles. Dans ce contexte, une nouvelle direction pour la recherche scientifique a été créée et elle s'est dirigée vers d'autres sources d'énergie plus abondantes et inépuisables, c'est ce qu'on appelle les énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable telle que le soleil, le vent, les vagues de la mer,etc.

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

Cette énergie peut être exploitée dans plusieurs domaines tels que, le séchage des produits agricoles et du bois, distillation de l'eau de mer, climatisation des locaux, production de l'électricité, la réfrigération solaires, production de l'eau chaude,etc.

L'Algérie, qui recèle de grandes potentialités dans ce domaine, a mis en place un programme de développement des énergies renouvelables avec son engagement dans plusieurs projets notamment le projet « desertec » qui prévoit l'installation de plusieurs centrales thermiques et photovoltaïques dans notre désert mais aussi le projet de développement des chauffe-eau solaire 100% Algériens qui est attribué à l'Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers (ENGTP) d'ailleurs un prototype a été réalisé comme une première étape de ce projet.

Notre travail consiste à étudier ce chauffe-eau solaire et contribuer à son amélioration.

Chapitre I

Synthèse bibliographique

1. Introduction :

Un capteur solaire thermique (ou capteur héliothermique) est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie provenant du Soleil et la transmettre à un fluide caloporteur. Son comportement dans le temps est fortement lié aux paramètres externe, la nature et dimensionnement de ses composante qui conditionnent ses performances. Le présent chapitre porte sur la recherche bibliographique en rapport avec les travaux sur le chauffe-eau solaire et ses principales parties.

2. Eclairement solaire :

L'éclairement solaire est une donnée importante dans toute étude solaire si pour cela plusieurs travaux ont été faits :

En 1962, Close a présenté un modèle mathématique où l'irradiation solaire est une fonction sinusoïdale du temps [15]. Mais le modèle le plus connu est celui de *Hottel et Lui Jordan* [1] établi en 1976, qui estime l'éclairement direct reçu sur un plan horizontal en fonction de la hauteur du soleil. Le modèle de *P. Brichambaut* [2], publié en 1982, est basé quant à lui sur l'estimation de l'clairement global par la sommation de l'clairement direct et diffus. Par ciel variable, l'estimation du rayonnement solaire passe par le calcul de l'irradiation moyenne en fonction de la fraction d'insolation ou de l'indice de clarté suivant des relations du type de *Angström- Black* [1]. Pour l'Algérie, *M. Capderou* [2] en 1987 propose, les moyennes mensuelles du rayonnement solaire et les relations tablés à l'échelle du jour en fonction du mois et du lieu considéré. Pour l'estimation du rayonnement global, en exploitant les données mesurées à Bouzaréah et en utilisant les relations de type *Angström-Black*, *A. Mefti* [3] propose des coefficients de troubles d'Angström-Black, établis pour le site d'Oran, alors que *Mr. A. Khireddine* [4] a donné les différentes approches permettant l'estimation correcte de flux d'irradiation solaire à partir des données d'insolation à savoir l'équation d'Angström. De leurs coté, *M^r K. Gairaa* et *S. Benkaciali* [5] proposent des modèles de régressions linéaires de l'indice de clarté K_t déterminés par la méthode des moindres carrés écrits en fonction de la fraction d'insolation pour un plan horizontal et quelques plan inclinés dans le cadre d'une modélisation numérique des irradianations globale et diffuse au site de Ghardaïa. Par contre, *M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi* [6] ont élaboré une confrontation entre des valeurs mesurées sur deux sites algériens (Bouzaréah et Ghardaïa) et des valeurs estimées par des modèles théoriques proposés dans la littérature par divers scientifiques et qui ont prouvé leur validité sur plusieurs sites dans le monde (*le modèle de Sasamori et al., le modèle de Bird and Hulstrom, le modèle de G.W. Padridge et al., et celui de Ashrae*).

3. Température ambiante :

J.L Scartezini [7], a utilisé les chaînes de Markov pour modéliser la température ambiante moyenne journalière et l'clairement en fonction du temps pour simuler une cellule test, une unité solaire à gain direct et une serre. *D.L Loveday* [7] utilise la méthode *Box-Jenking* pour estimer l'influence de la température ambiante sur une pompe à chaleur.

Des données mesurées sur une période de deux semaines sont utilisées pour la validation des résultats de la simulation. *Julien Chiquet [7]* utilise des techniques markoviennes pour l'estimation des températures ambiantes journalières à l'aide de données mesurées sur une période de vingt-cinq années.

4. Capteur solaire plan :

Les premiers travaux portant sur la théorie du capteur plan ont été établis par *Hottel et Woertz* en 1942 [7]. Depuis, d'autres études ont été faites sur différentes configurations de capteurs plans, notamment celle de *Bliss [7]* en 1959, qui a déterminé le rapport des résistances thermiques représentant les échanges thermiques entre le fluide, l'absorbeur et l'extérieur et ceci pour un fluide circulant entre deux plaques parallèles. Les travaux de *A. Whillier [7]* en 1959, se sont intéressés à la détermination de la fixation la plus appropriée entre le tube et la plaque absorbante. Pour l'Algérie, *N. Kasbadji [8]* en 1986 a établi une étude théorique et expérimentale des performances instantanées de trois capteurs plans à eau, à savoir le capteur plan classique, le capteur plan entièrement en plastique et le capteur plan à fibres de verre. Elle déduit que le capteur à fibres de verre affiche des performances meilleures que les deux autres. De son côté, *N. Younsi [9]* en 1989, porte sur une étude expérimentale d'un capteur plan en régime permanent en comparant sa courbe de rendement avec celle du capteur plan réalisé au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Dans ce même centre une étude de dimensionnement de chauffe-eau solaires individuels a été faite en élaborant un programme informatique basé sur l'utilisation d'une base de données des capteurs plans, le test de ce logiciel est indispensable et le relevé des résultats est nécessaire pour la validation de ce travail [10]. *M^r B. Chaouachi et S. Gabsi [11]* ont procédé à une étude expérimentale d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré où les résultats ont montré des performances thermiques acceptables malgré la simplicité du capteur.

5. Chauffe-eau solaire à thermosiphon :

La chauffe-eau solaire, avec ses constituants, a fait l'objet de nombreuses études, notamment celle rapportées par *J.A Duffie et W.A Beckman [1]* depuis les années soixante. *R. Lazzarin [7]* en 1981 a récapitulé les différentes méthodes de *Lunde* et les méthodes stochastiques. *D.J Close [7]* a développé un modèle analytique pour la prédiction quotidienne d'un système à thermosiphon par temps clair et sans soutirage. Il développe une équation différentielle décrivant la variation de la température moyenne de stockage en fonction du temps par ciel clair. *C.L Gupta et H.P Garg [7]* modifient le modèle de *Close* en tenant compte de l'efficacité de l'échange de chaleur de l'absorbeur et en considérant le cas du ciel variable en utilisant les séries de Fourier. Ces travaux ont été repris par *K.S Ong [7]* qui utilise la méthode des différences finies pour la résolution des équations. *G.L Morisson et D.B.J Ranatunga [7]* étudient les réponses des systèmes à thermosiphon à la variation du rayonnement en mesurant le débit à l'aide d'un débitmètre. *A. Mertol [7]* a analysé les performances d'un chauffe-eau à thermosiphon

avec échangeur de chaleur immergé dans un réservoir de stockage. *S. Kalogirou* [7] a modélisé un chauffe-eau solaire à thermosiphon en utilisant le logiciel TRNSYS. Il a fait varier les données météorologiques toutes les 10 mn et a simulé la température de stockage sur une journée. Les résultats ont été validés par comparaison avec les données mesurées sur vingt-cinq jours répartis sur six mois. Pour l'Algérie, *T. Akeblersane* et *M. Boutouil* [12] ont étudié les performances thermo hydrauliques d'un chauffe-eau solaire. En comparant, les résultats de la simulation avec les données enregistrées sur un chauffe-eau solaire placé à l'hôpital de Béni-Messous. Dans le cadre de son ingénierat *N. Rahni* [13] a estimé les performances mensuelles moyennes à long terme d'un chauffe solaire à thermosiphon à l'aide de la méthode *F-charte* pour différents sites algériens. De leur côté, *Said BENNACEUR, Belkacem DRAOUI et Lyes BENNAMOUN* [14] mené une étude expérimentale pour mesurer les variations de températures de la vitre, la plaque absorbante pour deux positions bien définies ainsi que celle du rayonnement, la température ambiante et les températures d'entrée et de sortie du capteur solaire effectuée au niveau du site d'Adrar durant une journée précise. Les résultats obtenus sont présentés sous formes de courbes montrant ainsi les bonnes performances que peut présenter un chauffe-eau solaire à thermosiphon dans la région sud-ouest algérien.

Chapitre II

Gisement solaire

1. Introduction :

La dimension et la gestion optimale des systèmes énergétiques passent impérativement par la connaissance des conditions météorologiques pour évaluer et modéliser le potentiel solaire en vue d'un bon dimensionnement des installations solaires. Cette étape nous permet la détermination des différents paramètres astronomiques, et plus précisément la position exacte du soleil quel que soit le moment de l'année.

2. Données géométriques :

2.1. Description de soleil :

Le soleil est une étoile résultant de la condensation d'un nuage interstellaire sous l'effet de la gravité, c'est une sphère gazeuse. Il est essentiellement composé d'hydrogène, d'hélium et dans une moindre mesure de carbone, d'azote et d'autres éléments. Sa température du cœur est de l'ordre de 10^7 k, les réactions de fusion nucléaire y transforment l'hydrogène en hélium en libérant 4.10^9 kg/s d'énergie de masse.

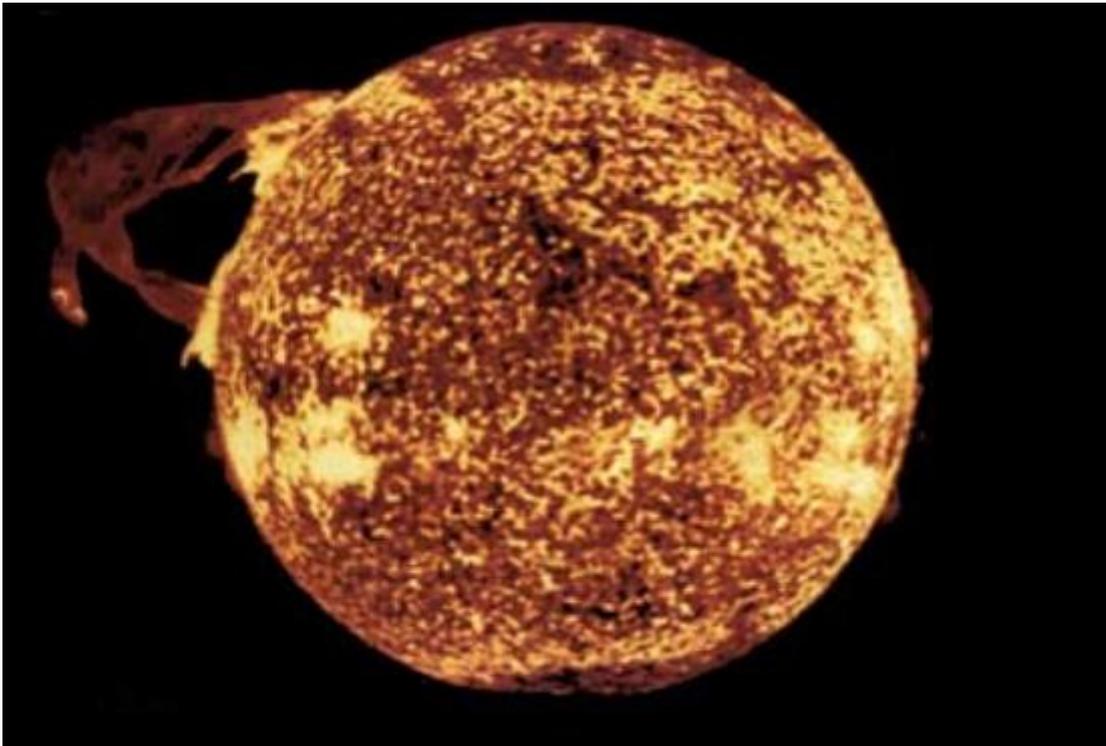
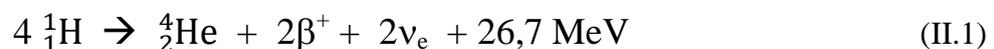


Figure II.1 : Image du soleil. [17]

On peut résumer les cycles de la fusion par l'équation globale suivante : [15]



Quatre protons fusionnent pour donner naissance à un noyau d'hélium avec émission de deux positons β^+ , de deux neutrinos ν_e , accompagnés d'une énergie égale à 26,7 MeV en omettant le rayonnement γ .

Caractéristique	Valeur
Masse	$1,989 \cdot 10^{30}$ kg
Diamètre	$1,392 \cdot 10^9$ m
masse volumique moyenne	1410 kg/m ³
magnitude absolue	+4,83
magnitude apparente	-26,74
puissance rayonnée	$3,83 \cdot 10^{26}$ w
température superficielle	5770 k

Tableau II.1 : caractéristiques principales du soleil.

2.2. Mouvement de la terre autour de soleil :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre-Soleil ne varie que $\pm 1,7\%$ par rapport à sa valeur moyenne qui est de $1,49675 \cdot 10^8$ km. Cette distance est minimale au début de janvier et maximale au début de juillet.

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Cet axe passant par le centre de la terre est appelé l'équateur terrestre. L'angle que fait le plan de ce dernier avec la direction terre-soleil est appelé la déclinaison. Il varie tout au long de l'année de façon symétrique de $-23^{\circ}26'$ à $+23^{\circ}26'$, comme il est schématisé sur la figure : [15]

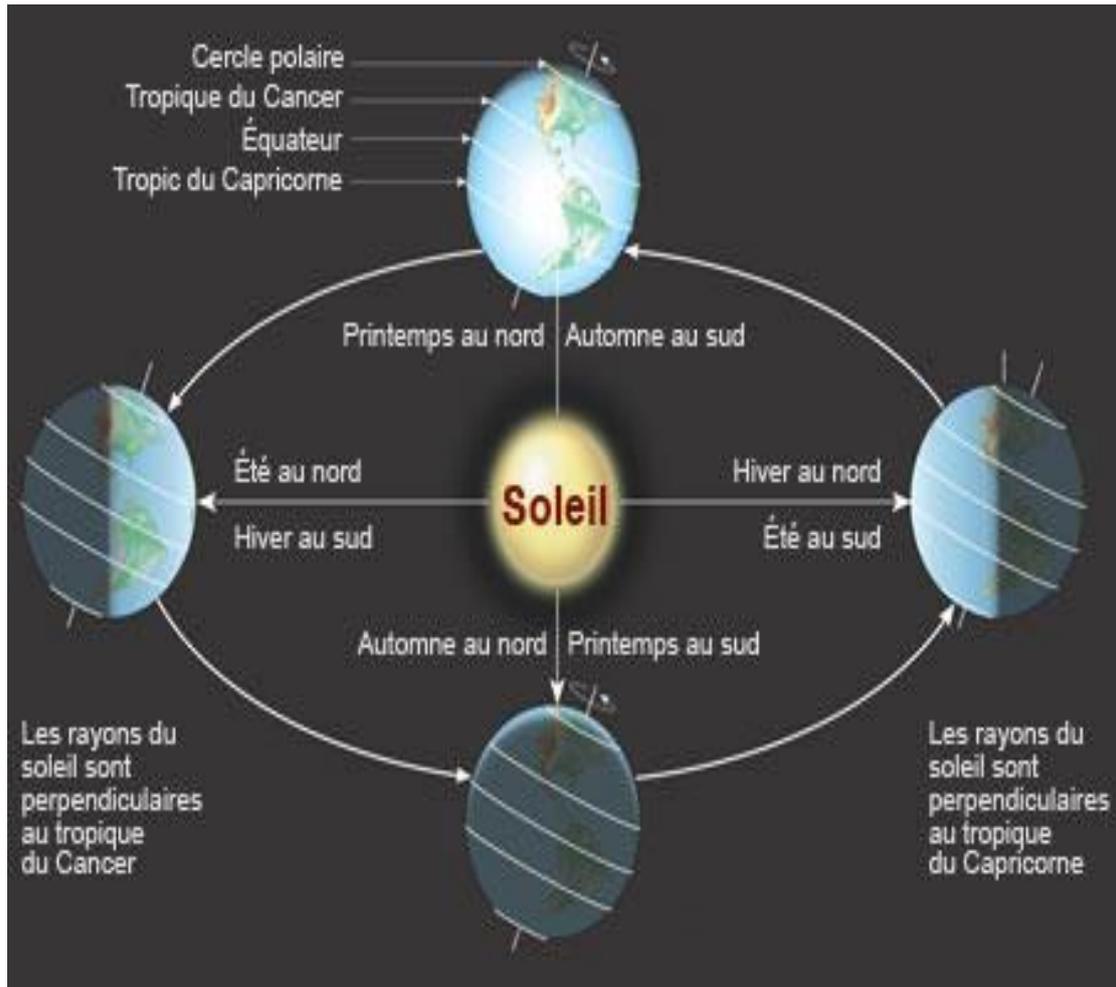


Figure II.2 : Schématisation des mouvements de la terre autour du soleil.

2.3. Mouvement apparent de soleil :

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre.

En un point de latitude φ au Nord de l'équateur, le soleil décrit un arc de cercle variable chaque jour à raison de 15° par heure. L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté Z . Elle varie quotidiennement et annuellement entre : $\varphi - 23,27^\circ \leq Z \leq \varphi + 23,27^\circ$ [4]

- Aux équinoxes $Z = \varphi \rightarrow$ Les journées ont une durée de 12h.
- Au solstice hiver $Z = \varphi + 23,27^\circ \rightarrow$ Les journées ont une durée inférieure à 12h.
- Au solstice été $Z = \varphi - 23,27^\circ \rightarrow$ Les journées ont une durée supérieure à 12h.

- En un point de l'équateur $-23,27^\circ \leq Z \leq 23,27^\circ$ ($\varphi = 0$) \rightarrow La durée des jours est de 12h = constante.
- En un point de latitude φ , le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

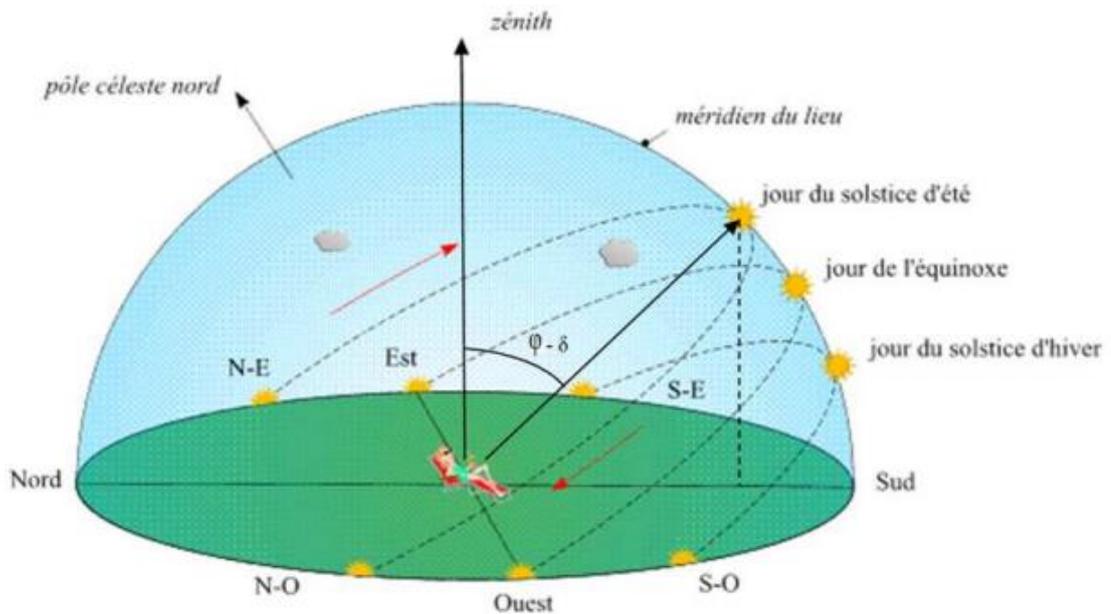


Figure II.3 : mouvement apparent du soleil observé d'un point de latitude θ

3. Sphère céleste :

La sphère céleste est une sphère imaginaire de rayon indéfini, établie dans les cieux et ayant comme centre l'œil d'un observateur terrestre. La sphère est la base du système de coordonnées employé pour déterminer les positions des astres. Elle est également utilisée pour désigner les intervalles de temps.

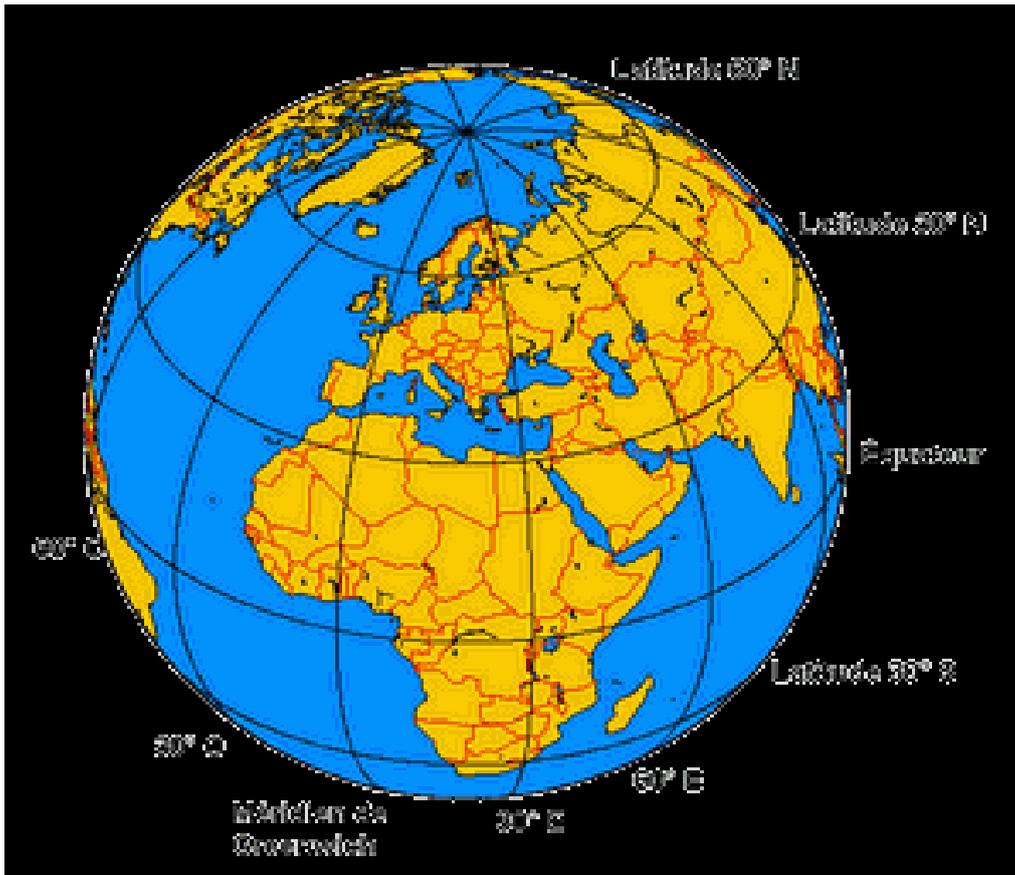


Figure II.4 : La sphère céleste imaginaire.

- **Méridien :**

Grand cercle de la terre passant par les pôles. Tous les points d'un même méridien ont évidemment la même longitude ; le méridien pris pour origine (0°) des longitudes est celui de Greenwich. Le plan méridien en un lieu est déterminé par ce lieu et par l'axe des pôles. Le temps solaire vrai est identique, à un instant donné, pour tous les points d'un même méridien.

4. Coordonnées célestes :

4.1. Coordonnées géographiques (terrestres) :

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

a. La latitude (φ) :

Est l'angle formé par la verticale d'un lieu donné avec le plan équatorial terrestre. Elle est comptée à partir de l'équateur de 0 à 90° , positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud.

b. La longitude (L) :

Est l'angle formé par le méridien local du lieu avec le méridien de référence (méridien de Greenwich), comptée positivement de 0 à $+180^\circ$ vers l'est et négativement de 0 à -180° vers l'ouest.

c. L'altitude :

L'altitude d'un point correspond à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer), elle est exprimée généralement en mètre.

d. L'inclinaison du plan (β) :

C'est l'angle formé entre le plan lui-même et l'horizontal.

- $\beta = 0$: pour un plan horizontal tourné vers le haut.
- $\beta = 90^\circ$: pour un plan vertical.
- $\beta = 180^\circ$: pour un plan horizontal tourné vers le bas.

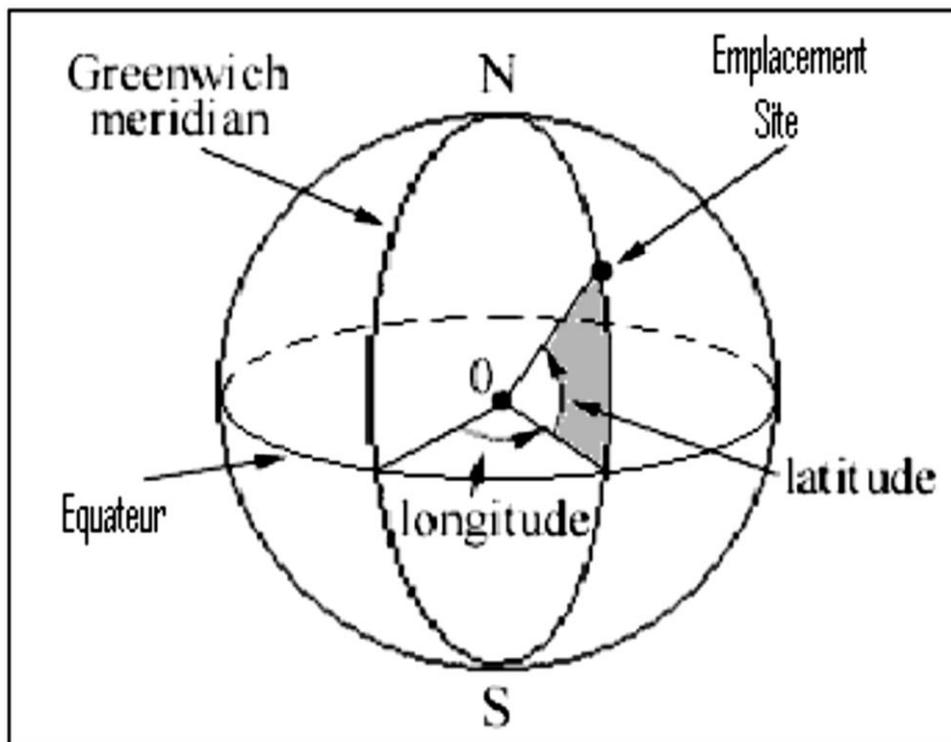


Figure II.5 : les coordonnées géographiques.

4.2. Coordonnées équatoriale : [19]

Les deux coordonnées utilisées sont la déclinaison (δ) et l'angle horaire (ω), leurs plan de référence est l'équateur céleste.

a. la déclinaison (δ) :

C'est l'angle formé par la direction du terre-soleil et le plan équatorial terrestre. Elle est due à l'inclinaison de l'axe des pôles terrestre par rapport au plan écliptique, ce qui est traduit par les différentes saisons. Cet angle varie au cours de l'année de $-23^{\circ}27'$ à $+23^{\circ}27'$.

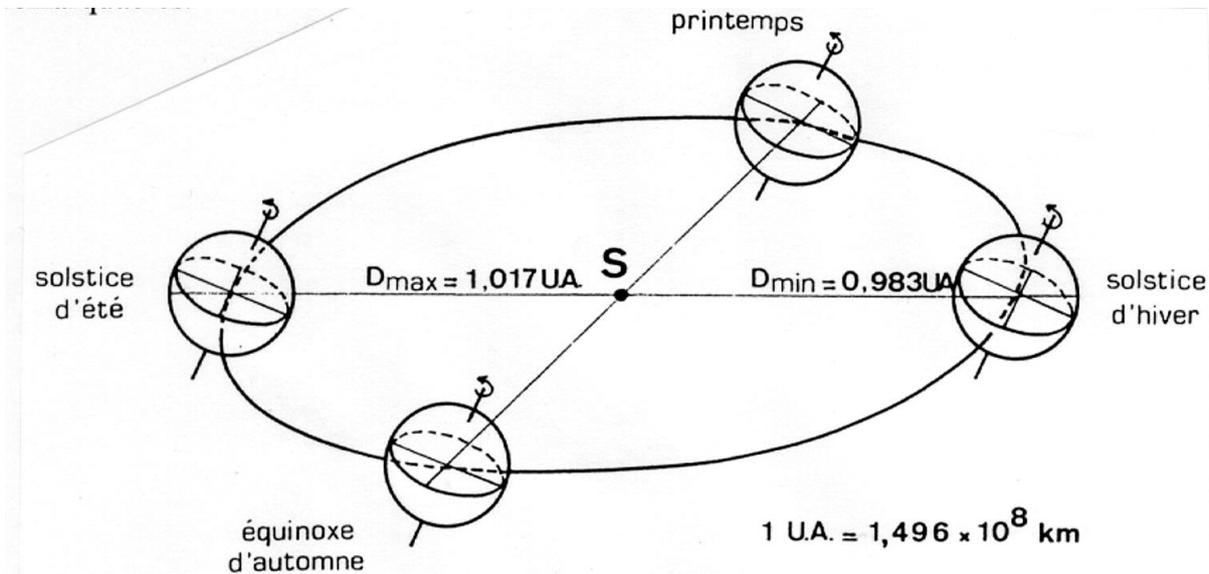


Figure II.6 : La déclinaison de la direction du terre-soleil et équateur.

- Equinoxe de printemps (21 Mars) $\rightarrow \delta = 0$
- Solstice d'été (22 Juin) $\rightarrow \delta = + 23^{\circ} 27'$
- Equinoxe d'automne (23 Septembre) $\rightarrow \delta = 0$
- Solstice d'hiver (22 Décembre) $\rightarrow \delta = - 23^{\circ} 27'$

Entre ces 4 points remarquables, prend toutes les valeurs intermédiaires qui peuvent se calculer par la relation :

$$\delta = 23,45 \sin [0,980(j + 284)] \quad (\text{II.2})$$

J, le numéro du jour de l'année qui varie de 1 à 366

Ou encore :

$$\delta = 23,45 \sin [360/365(n - 81)] \quad (\text{II.3})$$

n : c'est le numéro du jour de l'année.

Chapitre II : Gisement solaire

Mois	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
Numéro du Premier jour du mois (n)	0	31	59	90	120	151	181	212	243	273	304	334

Tableau II.2 : Numéro du jour de l'année. [15]

b. l'angle horaire (ω) :[19]

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

$$\omega = 15^\circ(\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.4})$$

Avec :

ω : en degrés.

TSV: temps solaire vrai.

Ou encore :

$$\omega = \frac{\pi}{12} (\text{TSV} - 12) \quad (\text{II.5})$$

ω : en radians ;

TSV : en heures.

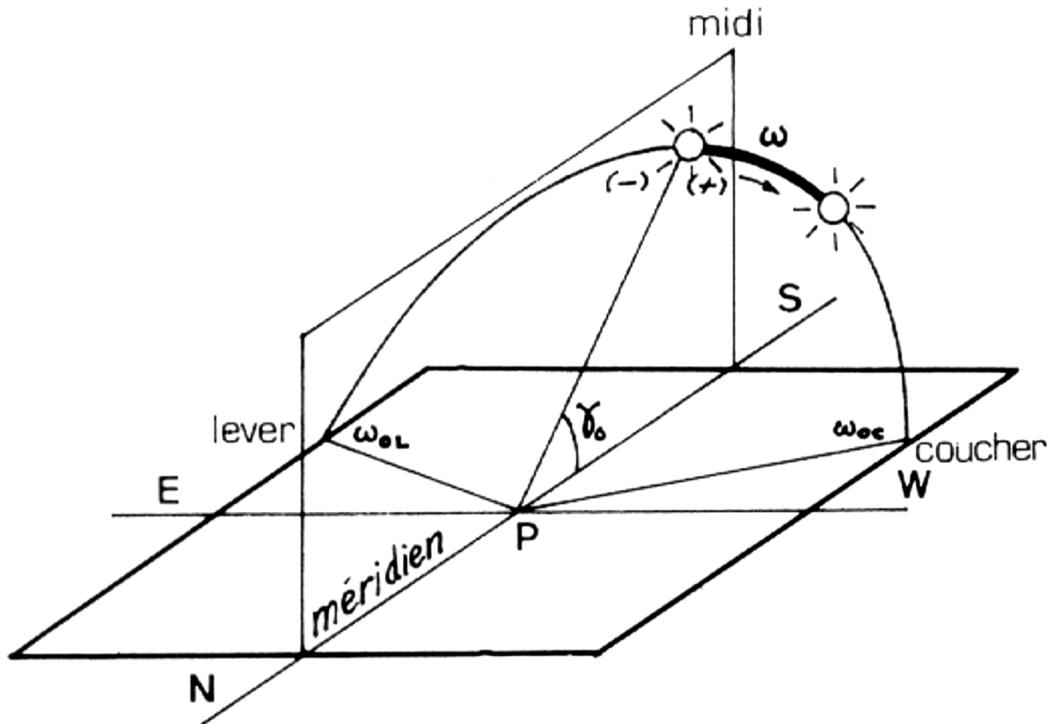


Figure II.7 : angle horaire ω du soleil.

4.3. Coordonnées horizontales (h, a) : [21]

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste. Ces coordonnées dépendent du lieu d'observation et c'est pour cela qu'elles sont appelées aussi coordonnées locales. Le plan de référence est l'horizon astronomique.

a. Hauteur angulaire (h) :

C'est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontale (c'est-à-dire le tangent au sol), Elle est comptée positivement de 0 à +90° vers le zénith et négativement de 0 à -90° vers le nadir.

- $h > 0$ le jour.
- $h < 0$ la nuit.
- $h = 0$ aux lever et coucher.

b. L'azimut (a) :

C'est l'angle entre la direction de soleil et la direction de sud. On peut le compter positivement de 0 à +180° vers l'ouest et négativement de 0 à -180° vers l'est.

- $a > 0 \rightarrow$ vers l'ouest.
- $a < 0 \rightarrow$ vers l'est.
- $a = 0 \rightarrow$ direction du sud.

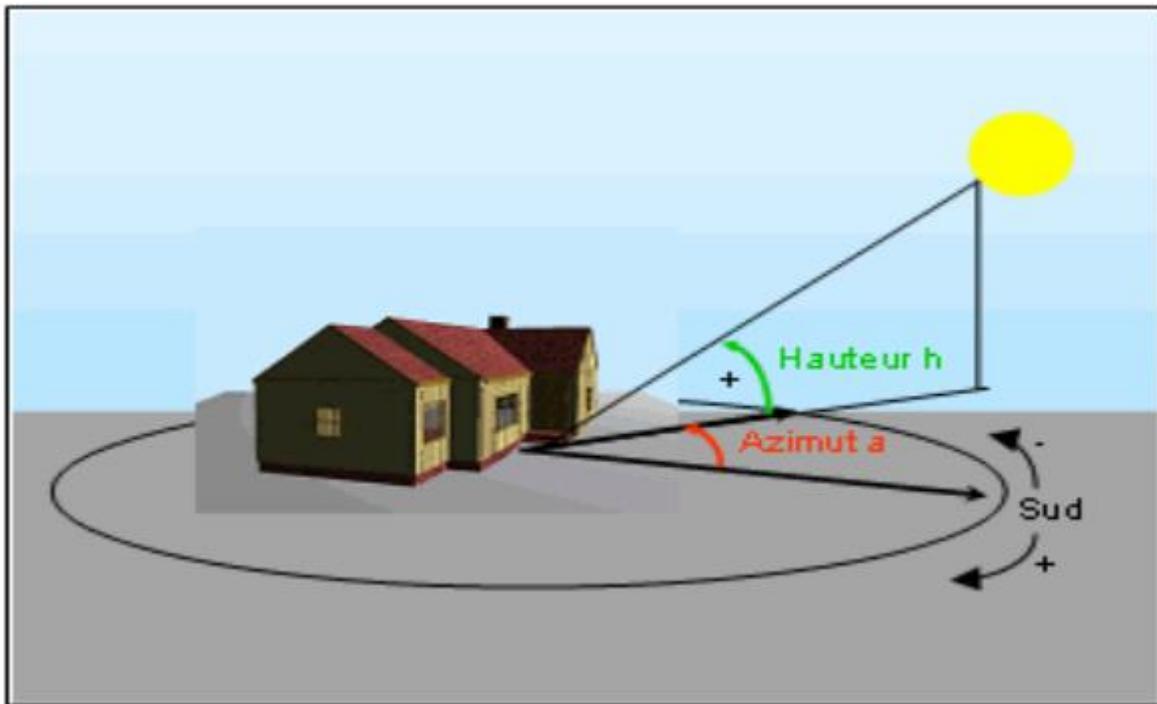


Figure II.8 : Coordonnées horizontales (h, a).

- **formules de Gauss :**

En énergétique solaire on utilise préférentiellement les coordonnées locales qui sont la hauteur h et l'azimut a . Il est donc nécessaire de déterminer des relations permettant de passer des coordonnées horaires (ω , δ) aux coordonnées horizontales (a , h), c'est relations sont les formules de Gauss reliant entre elles les quatre coordonnées a , h , ω et δ , pour une latitude ϕ donnée :

$$\sin(a) \cdot \cos(h) = \cos(\delta) \cdot \sin(\omega) \quad (\text{II.6})$$

$$\cos(a) \cdot \cos(h) = \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) \cdot \sin(\phi) - \cos(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.7})$$

$$\sin(h) = \cos(\phi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) + \sin(\phi) \cdot \sin(\delta) \quad (\text{II.8})$$

Ces formules sont très importantes puisqu'elles permettent de déterminer l'azimut a et la hauteur h du soleil dès que l'on connaît la déclinaison et l'angle horaire.

5. Paramètres de temps :

5.1. Le temps solaire vrai :

La position de soleil dans le ciel nous renseigne sur le temps solaire vrai. C'est le temps donné par les cadrans solaires, il traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre sur elle-même et son mouvement autour du soleil. Il est donné par la relation suivante : [15] [19]

$$TSV = TSM + ET \quad (II.9)$$

TSM : temps solaire moyen.

ET : équation de temps.

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

$$TSV = 12 + \frac{\omega}{15} \quad (II.10)$$

5.2. Le temps solaire moyen :

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

$$TSM = TSV - ET \quad (II.11)$$

5.3. L'équation du temps :

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

$$ET = TSV - TSM \quad (II.12)$$

Ou encore :

$$E = 229,2 \left(0,000075 + 0,001868 \cdot \cos B - 0,032077 \cdot \sin B - 0,014615 \cdot \cos 2B - 0,04089 \cdot \sin 2B \right) \quad (II.13)$$

Avec :

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

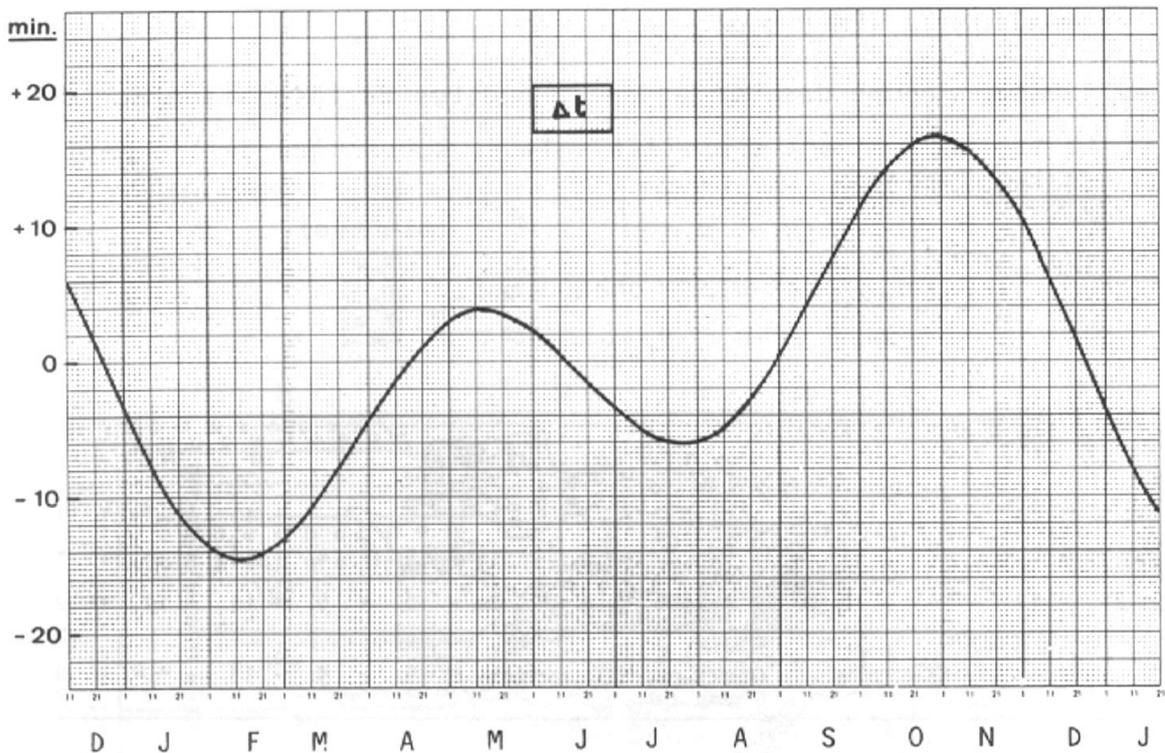


Figure II.9 : Variations annuelles de l'équation du temps. [19]

5.4. Le temps universel :

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

$$TU = TSM - \frac{L}{15} \quad (\text{II.14})$$

Avec L la longitude exprimé en degré et les temps en heures.

- $L < 0$: Pour les sites situés à l'Est de Greenwich.
- $L > 0$: Pour les sites situés à l'Ouest de Greenwich.
- $L = 0$: Pour les sites situés au méridien de Greenwich.

5.5. Le temps légal :

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

$$TL = TU + \Delta H \quad (\text{II.15})$$

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

5.6. Temps civil :

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

5.7. Durée du jour :

Pour qu'on puisse déterminer la durée du jour, il faut connaître deux instants de la journée, qui sont le lever et le coucher du soleil. Ces deux instants ont lieu quand les rayons solaires sont confondus avec l'horizontale, c'est-à-dire $\sin h = 0$, dans la formule (II.7). La résolution de cette équation nous donne :

$$\omega_l = -\omega_c = -\arccos(-\operatorname{tg}\varphi \cdot \operatorname{tg}\delta) \quad (\text{II.16})$$

Avec :

φ : C'est la latitude du lieu.

l et c : désignent respectivement le lever et le coucher du soleil.

La durée du jour solaire est donnée par la formule suivante :

$$D_j = \frac{1}{15} (\omega_c - \omega_l) = 2 \frac{\omega_l}{15} \quad (\text{II.17})$$

D_j : en heures.

6. Diagramme solaire: [15]

Il est toujours intéressant de connaître rapidement les coordonnées horizontales de l'astre en fonction de la journée choisie et de l'heure désirée. Pour cela on trace un diagramme circulaire appelé diagramme solaire, sur lequel sont représentés l'azimut a par des rayons issus du centre et la hauteur angulaire h par des cercles concentriques. Un réseau de courbes représente la trajectoire du soleil pour différentes journées. Ce réseau est limité par les courbes relatives aux solstices d'hiver et d'été. L'organigramme simplifié ci-dessous permet suivre la construction d'un tel diagramme :

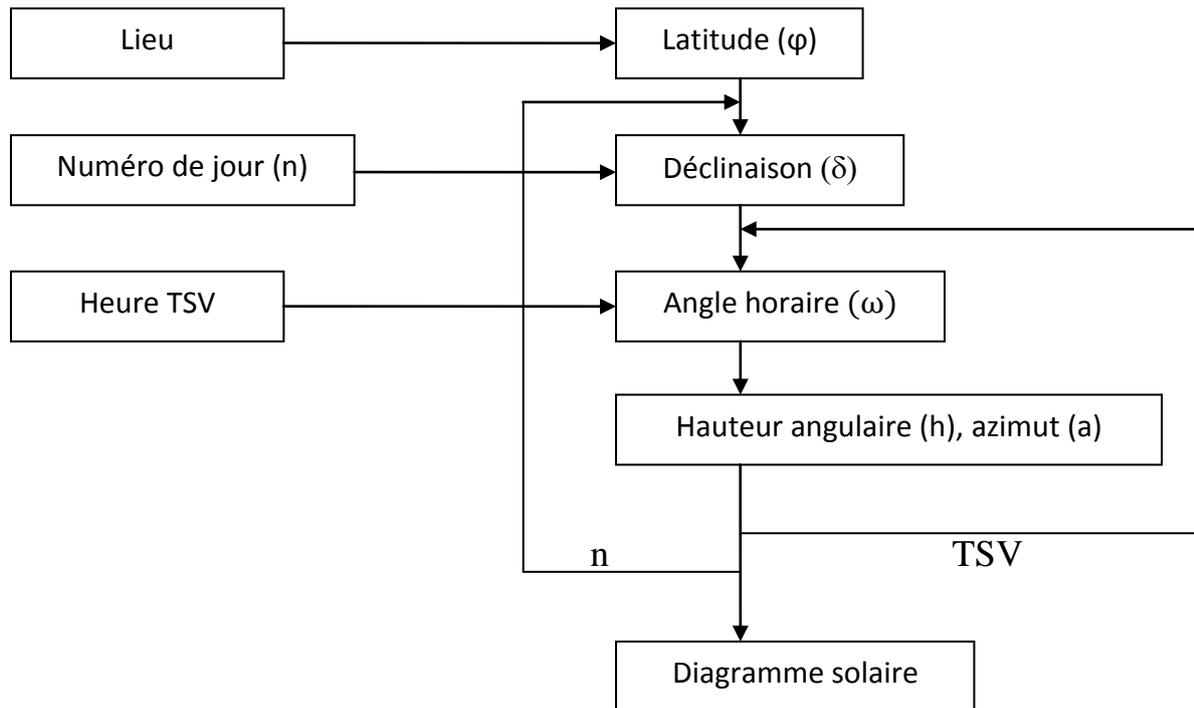


Figure II.10 : L'organigramme permettant la construction de diagramme solaire.

La figure (II.11) représente un exemple de diagramme circulaire établi pour la latitude 45°N , ce genre de diagramme solaire est très utilisée, il présente la projection stéréographique des trajectoires apparentes du soleil sur le plan horizontal. On peut avoir facilement l'azimut et la hauteur du soleil en un jour donné de l'année et à une heure solaire précise de la journée :

- les hauteurs sont lues sur l'axe N-S.
- les azimuts sont lus sur le grand cercle.

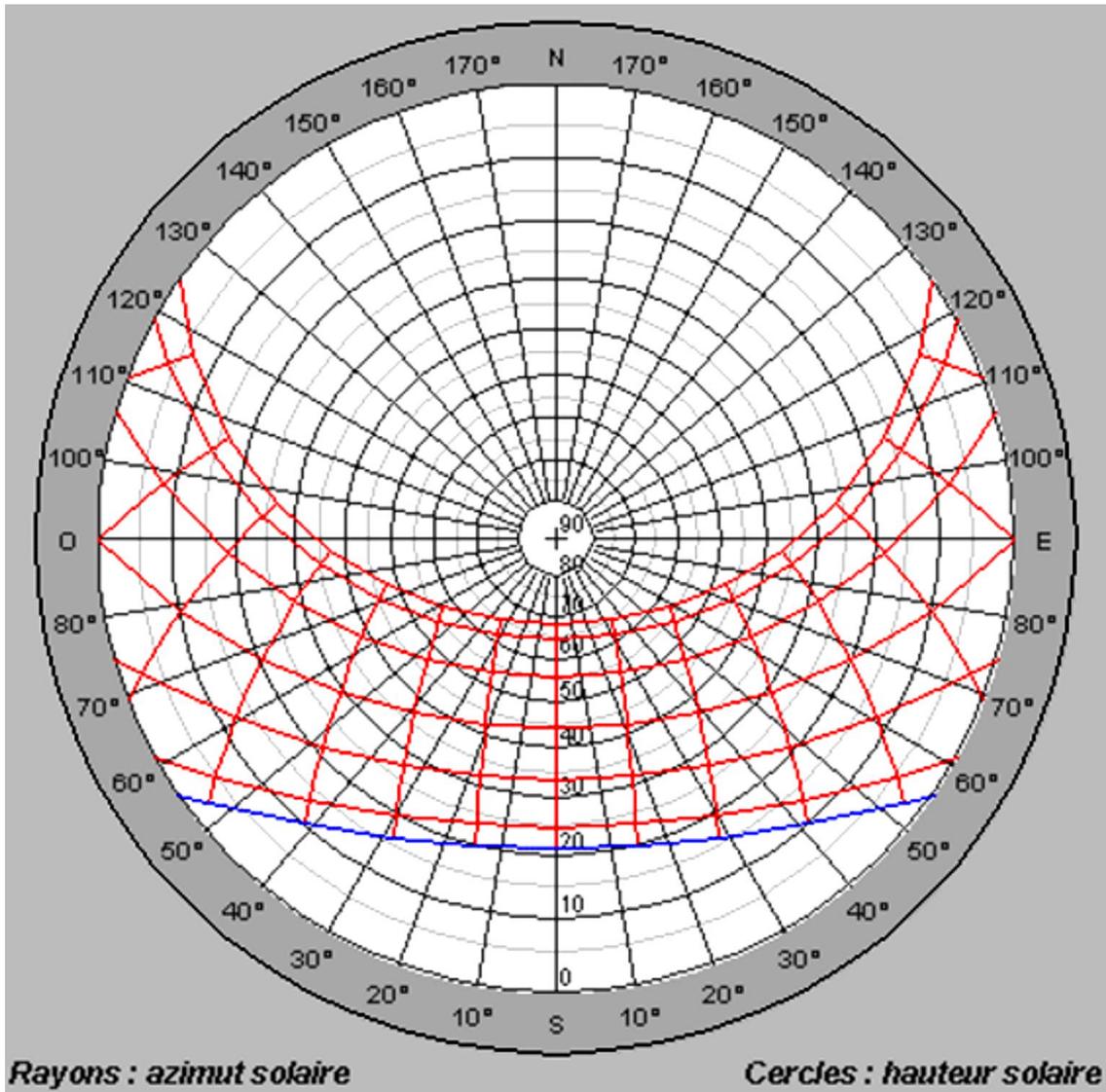


Figure II.11 : exemple d'un diagramme solaire pour une latitude 45°N.

7. Caractéristiques du rayonnement solaire :

7.1. Le spectre solaire : [22]

On appelle répartition spectrale ou spectre la répartition des ondes selon leur longueur d'onde. Pour la lumière visible, cela se manifeste par le fait que la lumière blanche est en fait composée de plusieurs couleurs, visibles par décomposition à travers un prisme ou dans l'arc-en-ciel. Or les ondes électromagnétiques ne se réduisent pas à la seule lumière visible, qui ne représente en réalité qu'une infime portion de tous les rayonnements électromagnétiques connus. Evidemment le terme de lumière est plutôt adapté à cette partie visible par l'homme, mais par extension, il est souvent appliqué à tout le spectre solaire qui va de l'ultraviolet proche (250 nm) au proche infrarouge (10 μ m).

Chapitre II : Gisement solaire

	Longueur d'onde	Fréquence	Exemple d'applications
Rayons γ	<0,01 nm		
Rayons X	0,01-10 nm		Radiographie
Ultraviolet	10 -400 nm		Bronzage, purification de l'eau
Visible	400-800 nm		Vision diurne, photosynthèse
Proche infrarouge	800 nm-10 μm		Vision nocturne
Infrarouge thermique	10 μm -1 mm		Chauffage, cuisson
Micro-onde	1 mm-10 cm		Fours de cuisine
Ondes radar	10 cm-1 m	3GHz-300MHz	Téléphone portable, détection de vitesse
Ondes radio	> 1 m	< 300 MHz	Radio, TV, télécoms

Tableau II.3 : répartition en longueur d'onde des ondes électromagnétique.

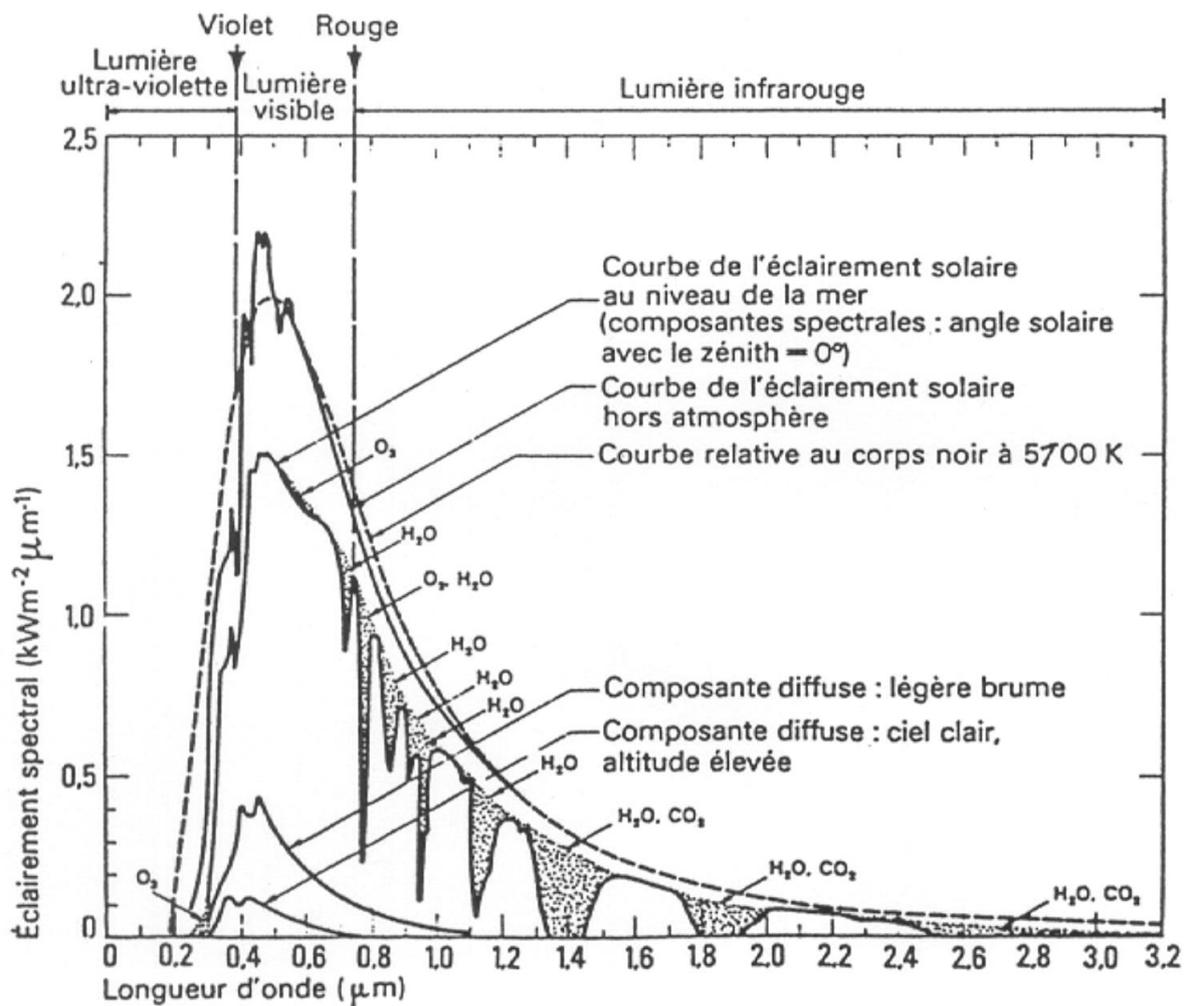


Figure II.12 : répartition en longueur d'onde des ondes électromagnétique. [19]

7.2. Insolation : [6]

a. Insolation potentielle (théorique) SS_0 :

L'insolation potentielle est définie comme étant la valeur de l'insolation de la journée considérée en l'absence de l'atmosphère, elle ne dépend que de la position géographique du lieu considéré, sa formule est comme suit :

$$SS_0(n) = \frac{2}{15} \text{ arc cos } (-\text{tg}\varphi \text{ tg}\delta) \quad (\text{II.18})$$

b. Durée d'insolation SS :

La durée d'insolation est définie comme étant un paramètre temporel caractérisant le rayonnement solaire. Pour une journée donnée, elle représente la somme des intervalles de temps pour lesquels l'intensité du rayonnement solaire dépasse un seuil de 100w/m^2 .

c. La fraction d'insolation σ :

C'est un paramètre qui dépend des conditions climatiques de nébulosité du ciel. La nébulosité est le rapport entre la surface du ciel couverte par les nuages et la surface totale du ciel au-dessus du territoire correspondant. On relie à la fraction d'insolation qui est une grandeur mesurable par la connaissance des durées d'insolation enregistrées par les héliographes qui sont déduits par le rapport suivant :

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} = \frac{\text{durée d'insolation}}{\text{durée insolation maximale}} \quad (\text{II.19})$$

d. La constante solaire :

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre - Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 W/m^2 par C. FROHLICH et C. WEHRLI du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse). La relation ci-dessous donne la valeur corrigée de la constante solaire :

$$C^* = 1367 [1 + 0,034 \cos (0,986n - 2)] \quad (\text{II.20})$$

Avec :

n: numéro du jour de l'année.

Date le 1 ^{er}	Janv	fevr	mar	avr	mai	jui	juil	aou	sep	oct	Nov	dec
Puissance surfacique w/m^2	1399	1394	1379	1354	1333	1312	1308	1312	1329	1350	1373	1392
Ecart relatif en% /C*	+3,40	+3,03	+1,92	+0,07	-1,48	-3,03	-3,33	-3,03	-1,77	-0,22	+1,48	+2,88

Tableau II.4 : Les valeurs de la puissance surfacique. [15]

7.3. Rayonnement solaire à travers l'atmosphère :

a. Composition de l'atmosphère :

La composition de l'atmosphère est à peu près la même pour les trois premières couches: 78 % d'azote, 21 % d'oxygène, 0.9 % d'argon, 0.03 % de CO₂ et des traces d'autres gaz, avec de la vapeur d'eau dans la troposphère et une mince couche d'ozone dans la stratosphère dont le rôle est si important dans l'absorption des rayons ultraviolets les plus durs. L'essentiel des modifications subies par le rayonnement solaire se fait dans la troposphère par diffusion, diffraction, absorption, réfraction par des gaz de température et de densité croissante. La masse gazeuse totale traversée est de 10 tonnes /m²; elle équivaut à 7.8 km d'atmosphère ramenée aux conditions de température et de pression dites normales: T=0°C; p=1 013 mbar. Si ces gaz étaient tous ramenés aux conditions normales, on aurait 6.2 km d'azote, 1.7 km d'oxygène, 74 m d'argon, 30m de vapeur d'eau, 24 m de CO₂, 14 cm de Néon, 4 cm d'Hélium, quelques mm de Krypton, de méthane de NO et de NO₂ et seulement 5 mm d'ozone.

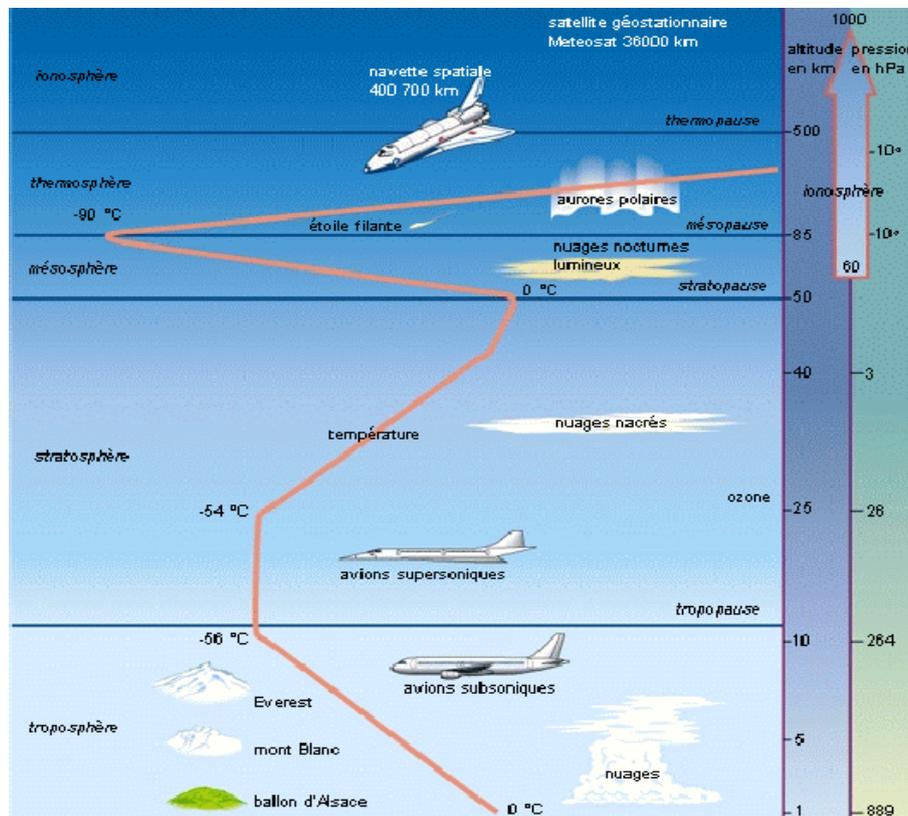


Figure II.13 : La structure de l'atmosphère. [15]

b. Masse d'air : [15]

On appelle « masse d'air », m, la masse d'atmosphère traversée par le rayonnement direct pour atteindre le sol (par ciel clair), par rapport à une traversée verticale au niveau de la mer (voir figure (II.14)). Cela dépend de la hauteur angulaire du soleil (h) .à l'aide des points O, A et M, on écrit la longueur du trajet du soleil travers l'atmosphère :

$$OM = \frac{OA}{\sin h} \quad (\text{II.21})$$

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

$$m = \frac{P}{1013 \cdot \sin h} \exp\left(-\frac{z}{7,8}\right) \quad (\text{II.22})$$

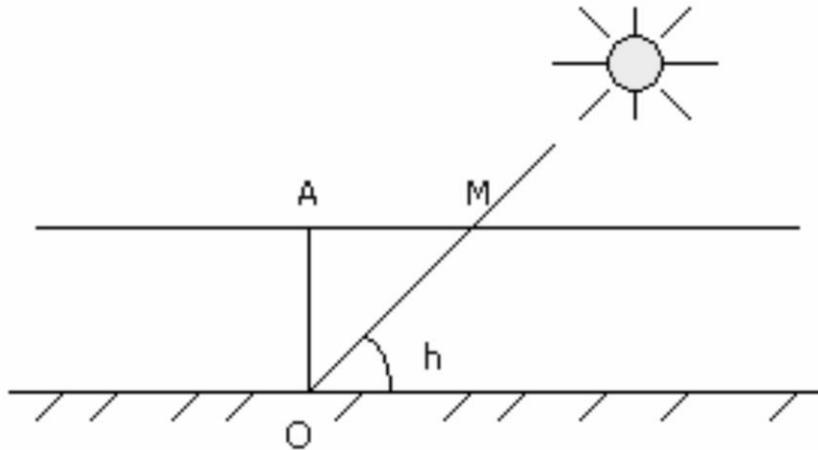


Figure II.14: Le rayonnement solaire et le nombre masse d'air.

Exemple :

- Soleil au zénith (au niveau de la mer) on obtient les conditions : AM_1 ($m = 1/\sin$)
- Avec un soleil à 30° sur l'horizon, on obtient les conditions : AM_2 ($m = 1/\sin 30^\circ$)
- Par convention AM_0 , désigne le rayonnement solaire hors atmosphère.

c. Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

L'irradiation solaire perd son intensité en traversant l'atmosphère terrestre.

Deux phénomènes atténuent ce rayonnement, il s'agit de l'absorption et de la diffusion.

➤ Absorption : [15]

Elle est sélective et dépend principalement de :

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

➤ Diffusion : [20]

En plus de l'absorption sélective liée aux gaz atmosphériques, le rayonnement solaire est soumis à la diffusion lors de sa traversée de l'atmosphère, il s'agit d'une redistribution spectrale du rayonnement par

des particules matérielles. On distingue trois types de diffusion atmosphériques :

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

Avec :

r = le rayon moyen de la particule diffusante.

➤ **Energie reçue par le sol : [15]**

Une partie de l'énergie reçue par notre planète est réfléchiée par l'atmosphère mais aussi par le sol terrestre. Pour caractériser l'importance du phénomène de réflexion du rayonnement incident par une surface on définit une quantité appelé albédo. L'albédo d'une surface est le rapport de l'énergie réfléchiée sur l'énergie totale reçue par la surface sous forme de rayonnement. C'est l'équivalent du facteur de réflexion. Les valeurs de l'Albédo sont consignées dans le tableau suivant, selon la nature des surfaces :

Nature des surfaces	Valeurs			Valeurs moyennes
Sable sec	0,1	A	0,4	0,25
Déserts	0,2	A	0,4	0,30
Terre labourée	0,1	A	0,25	0,20
Prairies, Herbages	0,2	A	0,3	0,25
Champs cultivés	0,1	A	0,2	0,15
Neige fraîche	0,7	A	0,8	0,80
Neige ancienne	0,5	A	0,7	0,60
Sol ciment, Gravier	0,2	A	0,4	0,25
Bitume	0,1	A	0,2	0,15
Cailloux, Pierres	0,1	A	0,3	0,20
Forêts	0,1	A	0,2	0,15
Lac, Mer calme : $h > 30^\circ$	0,05			
$h \approx 20^\circ$	0,15			
$h \approx 10^\circ$	0,35			

Tableau II.5 : albédo solaire de différentes surfaces.

7.4. Différents types de rayonnement solaire :

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

a. Le rayonnement solaire direct :

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

$$S = C^* \cdot C \cdot e \cdot \exp \left[-\frac{F}{\sin h} \right] \quad (\text{II.23})$$

Avec:

C^* : constante solaire

C : correction de la distance terre-soleil.

$$C = 1 + 0,034 \cos \left[\frac{360}{365} (n - 3) \right] \quad (\text{II.24})$$

h : hauteur du soleil.

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

	Ciel dégagé très pur	Conditions normales	Zone industrielle
e	0,87	0,88	0,91
F	0,17	0,26	0,43

Tableau II.6 : Coefficients de trouble du ciel.

➤ **Rayonnement solaire direct sur un plan horizontal :**

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

$$S_1 = S. \sin h \quad (\text{II.25})$$

➤ **Rayonnement solaire direct dans un plan incliné :**

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

$$S = S_1. \cos \theta \quad (\text{II.26})$$

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

$$\cos \theta = \cos \beta_1. \sin h + \sin \beta_1. \cos h. \cos (a - \beta_2) \quad (\text{II.27})$$

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

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

a : c'est l'azimut du soleil.

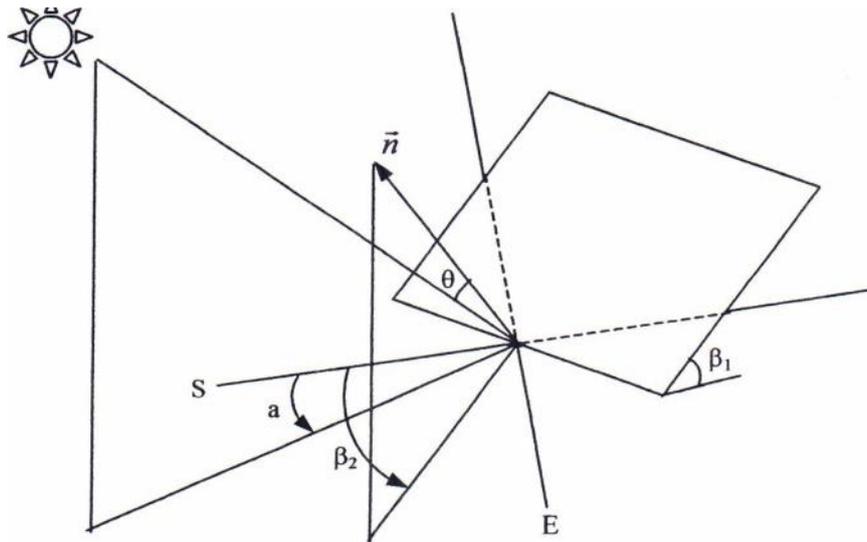


Figure II.15 : La géométrie d'un plan incliné d'un angle β_1 par rapport à l'horizontale.

b. le rayonnement solaire diffus :

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

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

➤ Rayonnement diffus provenant de la voûte céleste :

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

$$D_{1h} = C^* \cdot C \cdot \sin h \left[0,271 - 0,2939 \cdot e \cdot \exp\left(\frac{-F}{\sin h}\right) \right] \quad (\text{II.28})$$

Pour un plan quelconque, l'éclairement diffus est :

$$D_1 = D_{1h} \left[\frac{1 + \cos \beta_1}{2} \right] \quad (\text{II.29})$$

Avec :

β_1 : C'est l'inclinaison du plan.

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

➤ Rayonnement diffusé par les sols :

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

$$D_{2h} = a (S_1 + D_{1h}) \quad (\text{II.30})$$

Avec:

a : c'est l'albédo.

Pour un plan quelconque cette composante est :

$$D_2 = D_{2h} \left[\frac{1 - \cos \beta_1}{2} \right] \quad (\text{II.31})$$

Avec :

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

Enfin, le rayonnement diffus global est :

$$D = D_1 + D_2$$

c. Rayonnement global :

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

$$G = S + D \quad (\text{II.32})$$

Avec :

S : l'éclairement direct.

D : l'éclairement diffus.

8. Instruments de mesure :

Les mesures du rayonnement solaire sont en général du domaine de la météorologie. Mais la technique de l'énergie solaire a besoin de ces mesures. Pour déterminer la capacité et le rendement d'un capteur solaire, il faut mesurer l'intensité du rayonnement solaire incident. Pour cela, on utilise des appareils de mesure que les services de la météorologie étalonnent régulièrement.

8.1. Le pyréliomètre :

Mesure de l'éclairement énergétique direct. Rayonnement solaire provenant de l'angle solide limité au disque solaire parvenant sur une surface unité perpendiculaire à l'axe de cet angle solide.

➤ Principe :

L'élément sensible (thermopile) du Pyréliomètre est constitué de thermocouples montés en série, exposés au rayonnement solaire et dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction. Il délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident. La géométrie de l'appareil limite le rayonnement incident au rayonnement solaire direct et au rayonnement provenant du ciel.

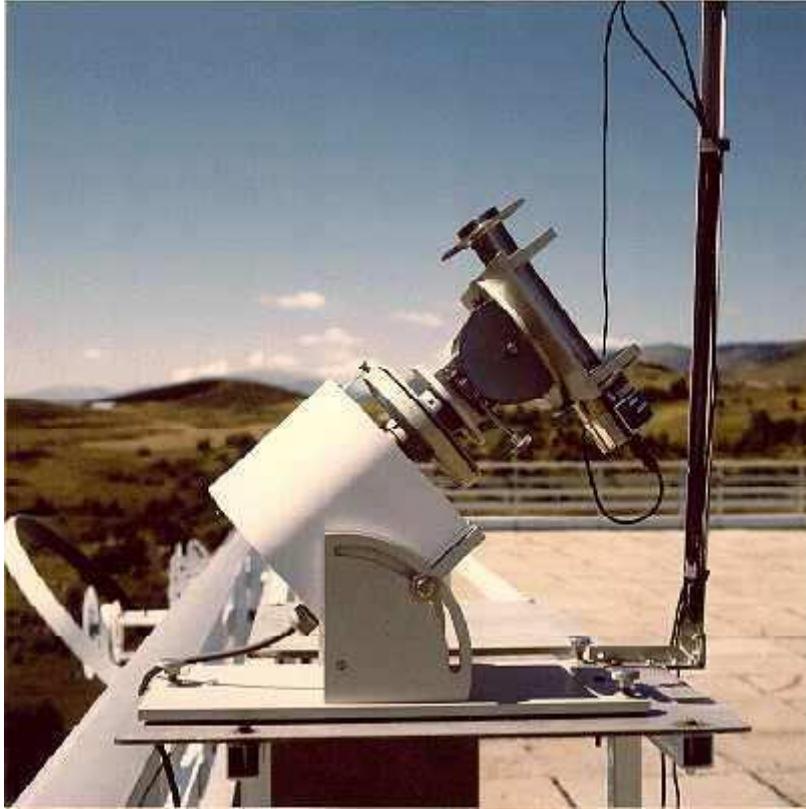


Figure II.16 : Pyrhéliomètre permettant la mesure du rayonnement solaire direct.

8.2. Le pyranomètre :

Cet instrument enregistre toute l'énergie solaire qu'il reçoit aussi bien par rayonnement direct que par rayonnement diffus.

➤ Principe :

L'élément sensible (thermopile) du Pyranomètre est une série de thermocouples exposés au rayonnement solaire, dont les soudures froides sont maintenues à la température de l'air par conduction et qui délivre une différence de potentiel proportionnelle au flux incident.

Un pare-soleil constitué par une bande circulaire centrée sur la thermopile et parallèle au plan équatorial, occulte le Pyranomètre du rayonnement solaire direct pour permettre la mesure du rayonnement solaire diffus.



Figure II.17 : Pyranomètre donnant le rayonnement solaire global.

8.3. L'héliographe :

La durée d'insolation SS , quant à elle, est mesurée par un héliographe, boule de verre qui concentre le rayonnement solaire en un point d'un papier thermosensible. Au fil du temps une trace apparaît. La longueur de cette trace donne la durée d'ensoleillement. Notons toutefois que le seuil de sensibilité du papier est de 120 W/m^2 .



Figure II.18 : Héliographe permettant de mesurer la durée d'insolation.

9. Logiciels de dimensionnement solaire :

Logiciels	Utilisation
CalSol (INES)	Ce logiciel conçu par l'INES, il permet d'apprécier le potentiel en énergie solaire pour une quinzaine de villes en France suivant l'inclinaison et l'orientation et d'effectuer une pré-étude énergétique, économique et environnementale pour une installation PV connectée au réseau électrique (à venir : PV en site isolé, eau chaude sanitaire solaire, chauffage solaire et solaire passif).
EERE (USA)	Energy Efficiency and Renewable Energy de US Department of Energy données climatiques et solaires sur 230 villes dans 85 pays.
S@tel-light (EU)	S@tel-light permet (à partir d'observations satellite 1996-2000) de générer des cartes sur l'irradiation solaire en Europe.
RETScreen (CAN)	Logiciels téléchargeables gratuits sur les données solaires, simulation de systèmes photovoltaïques, thermiques, passifs et sur l'émission GES.
GetSolar (GR)	Simulations d'installations solaires thermiques (allemand, anglais et français).
LOGICLIP (FR)	LogiClip est un logiciel de dimensionnement des installations d'Eau Chaude Solaire. La version 1.0 de LogiClip est disponible auprès de CLIPSOL.
SOLO (FR)	Logiciel de dimensionnement sur internet sur le site de Tecsol faire "calculs eau chaude" et "dimensionnement Solo". Calcule la couverture en eau chaude sanitaire en fonction du lieu, des besoins, du type et du volume de stockage, de la surface de capteurs avec son inclinaison et l'orientation.

Tableau II.7: Quelques logiciels de dimensionnement solaire. [19]

10. Conclusion :

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

Chapitre III

Généralités sur les Capteurs thermiques et présentation de projet

1. Introduction :

Les panneaux solaires thermiques contiennent des capteurs thermiques qui transforment l'énergie du soleil en chaleur. Ce système consiste à chauffer de l'eau à partir de l'énergie solaire. Cette eau chaude sera ensuite utilisée de trois façons possibles:

- en tant qu'eau chaude sanitaire.
- dans un système de chauffage central à eau chaude.
- dans un système combiné associant eau chaude sanitaire et chauffage central.

2. Principes des Capteurs solaires thermiques :

Les capteurs solaires thermiques constituent le cœur des installations destinées à transformer l'énergie transmise par le soleil en chaleur. Le rayonnement solaire est absorbé par une surface noire, parcourue par un fluide caloporteur qui extrait l'énergie thermique et la transfère vers son lieu d'utilisation ou de stockage. La plupart des capteurs sont munis d'une couverture transparente qui laisse passer la plus grande partie du rayonnement solaire et évite le refroidissement de l'absorbeur. Les échanges par convection entre celui-ci et la couverture transparente sont réduits, de même que l'émission du rayonnement infrarouge de l'absorbeur. C'est le principe de « l'effet de serre ». Une isolation thermique est disposée à l'arrière et sur la périphérie du capteur pour limiter les déperditions par conduction.

3. Les différents capteurs solaires thermiques :

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

3.1 Les capteurs à eau : La chaleur est absorbée par un liquide caloporteur, qui circule dans des tubes munis d'ailettes. Ce sont ces ailettes qui captent la chaleur. Il existe plusieurs types de capteurs à eau :

3.1.1 Les capteurs non vitrés :

Un capteur solaire non vitré, aussi appelé capteur "moquette", est composé :

- d'un absorbeur revêtu d'une peinture sombre et sélective,
- d'un faisceau de tubes cylindriques résistants aux rayonnements ultraviolets et aux variations de température.

Les tubes sont parcourus par de l'eau (fluide caloporteur). Cette eau se réchauffe au fil de l'écoulement dans les tubes. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage de l'eau des piscines.



Figure III.1 : le capteur moquette.

3.1.2 les capteurs à tubes sous vide :

Comme son nom l'indique les capteurs à tube sous vide sont composés de tubes en verres. A l'intérieur de ces tubes se trouve un autre tube dont on intègre un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur. Le gros avantage de cette technique est qu'elle permet un meilleur rendement en hiver pour cause d'emprisonnement de la chaleur dans l'espace sous vide. Elle permet de chauffer l'eau entre 100 et 120°C. Le gros inconvénient est qu'elle coûte beaucoup plus chère que les autres capteurs.

Pour être efficace le vide doit être poussé $< 10^{-3}$ Pa. Un tube devient inutile s'il n'est pas totalement hermétique et il faut le changer pour préserver la performance du capteur. Afin de visualiser cette éventualité, les tubes sont munis d'un témoin (getter) en baryum, qui dépose une couche métallisée sur l'intérieur du tube pendant la fabrication. Cette couche argentée de baryum devient blanc en contact avec l'air et ainsi sert de témoin à la perte de vide.



Figure III.2 : couche argentée de baryum.

Il y a 4 familles de capteurs sous vide, et chacun dépend d'une technique spécifique :

a. Le capteur à tube sous vide à circulation directe :

Dans ce type de capteurs, la conception de l'absorbeur et les tuyaux de circulation du fluide caloporteur sont comme un capteur plan. Sauf, l'ensemble est suffisamment étroit pour être glissé à l'intérieur d'un tube en verre. Un rendement élevé est obtenu par ce transfert thermique direct. On peut par ailleurs orienter l'absorbeur par rapport au soleil au moment de l'installation, ce qui en fait un très bon capteur pour les implantations en façade par exemple. Les tubes sous vide à flux direct ont un second avantage par rapport aux tubes sous vide classiques : on peut les monter directement en toitures terrasses, mais seulement dans des régions à faible enneigement. Cela signifie que les coûts du support de fixation peuvent être réduits au minimum.



Figure III.3 : Capteur à tube sous vide à circulation directe.

b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc" :

Dans ces systèmes, la chaleur est transférée depuis l'ailette jusqu'à un collecteur situé en partie haute du capteur grâce à un caloduc. C'est un échangeur qui utilise les mécanismes de transfert de chaleur par évaporation et condensation d'un fluide placé dans un tube fermé. Le fluide s'évapore en captant la chaleur fournie par l'ailette, s'élève jusqu'en partie haute, cède sa chaleur par condensation au fluide caloporteur qui circule en partie haute, et retourne par gravité en bas du tube. Pour permettre ce retour, les tubes doivent être installés avec une inclinaison. Ce type de montage permet le remplacement d'un tube en cas de bris, sans devoir purger toute l'installation.



Figure III.4 : Le capteur à tube sous vide à " Caloduc".

c. Les capteurs à tube sous vide à effet "Thermos" :

C'est le principe d'enveloppe sous vide utilisée pour garder les boissons chaudes dans une bouteille Thermos. Le tube intérieur sert d'absorbeur car la surface est traitée pour être absorbante et sélective. Cela veut dire que cette surface capte le rayonnement solaire, mais en chauffant, elle émet très peu de rayonnement infrarouge. La chaleur est transmise hors de l'enveloppe sous vide du tube par la circulation d'un fluide en contact avec l'absorbeur ou par un caloduc.

Le principe est simple : l'eau contenue dans les tubes sous vide se réchauffe grâce au revêtement sélectif dont les tubes sont revêtus et vient remonter dans le ballon de stockage pour le chauffer. L'eau froide descend immédiatement pour se réchauffer à son tour.



Figure III.5 : Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos".

d. Les capteurs à tube sous vide "Schott" :

Le tube sous vide fabriqué par l'entreprise Schott-Rohrglas en Allemagne utilise le principe "thermos" avec plusieurs perfections techniques.

D'abord, une partie de la paroi intérieure du tube extérieur est un réflecteur cylindrique et ensuite, le tube intérieur sert comme absorbeur aussi bien qu'échangeur de chaleur avec le fluide caloporteur. L'utilisation des métaux est réduite à des traitements de surface du tube et les différentes pièces du collecteur. Cette technique peut servir pour plusieurs applications.

Avec un tube pour le retour du caloporteur enfilé dans le tube sous vide, chaque tube et l'ensemble du capteur peuvent fonctionner en thermosiphon. Et si le tube intérieur est traversant, ce capteur peut servir comme foyer d'un capteur à concentration à haute température.

e. Les capteurs CPC :

Les capteurs sous vide à concentration combinent l'effet de concentration des miroirs paraboliques (CPC = Concentrateur Parabolique Composé) avec des capteurs sous vide. Ils capturent les rayons du soleil quel que soit l'angle d'incidence et l'orientation grâce aux concentrateurs paraboliques positionnés sous chacun des tubes, ce qui permet l'obtention de hautes températures avec des surfaces de captage réduites.

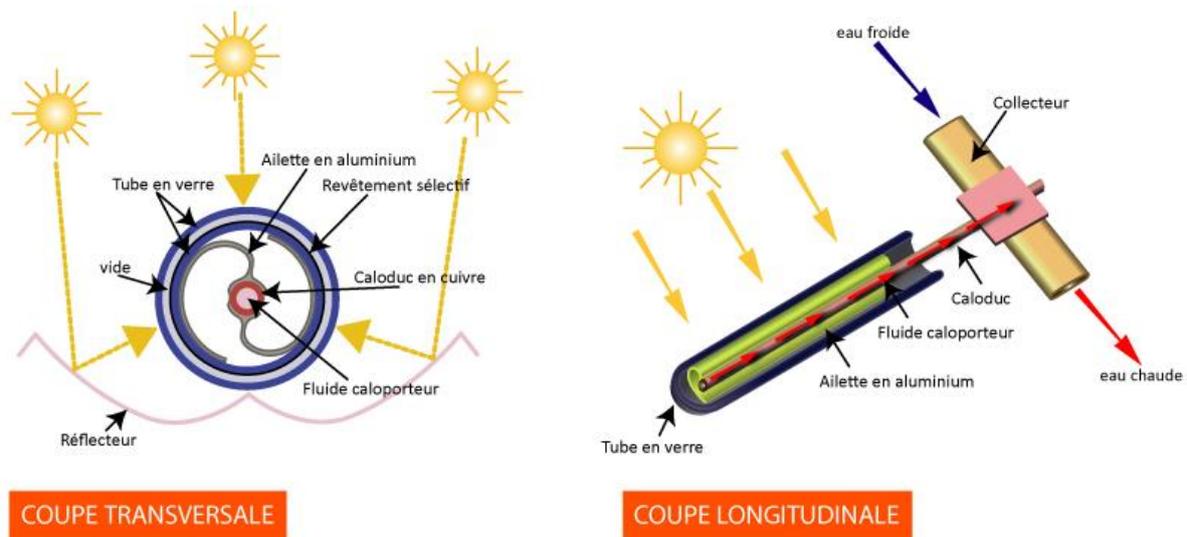


Figure III.6 : Le capteur CPC.

3.1.3 les capteurs plans vitrés :

Ils sont composés d'une plaque et de tubes en cuivre constituant l'absorbeur. Le rayonnement solaire est accentué par la plaque qui chauffe les tubes dans lesquelles de l'eau passe. L'eau est donc chauffée par les tubes. Elle est ensuite acheminée vers un ballon de stockage et sera par la suite redistribuée dans la maison soit pour la chauffer soit pour sortir directement de notre robinet. Cette technique est très avantageuse du fait qu'elle coûte beaucoup moins cher que les capteurs à tube sous vide mais aussi du fait qu'elle s'intègre très bien à une toiture. Elle permet de chauffer l'eau entre 50 et 80°C. L'inconvénient est qu'elle a un rendement diminué en hiver pour cause de manque d'ensoleillement.

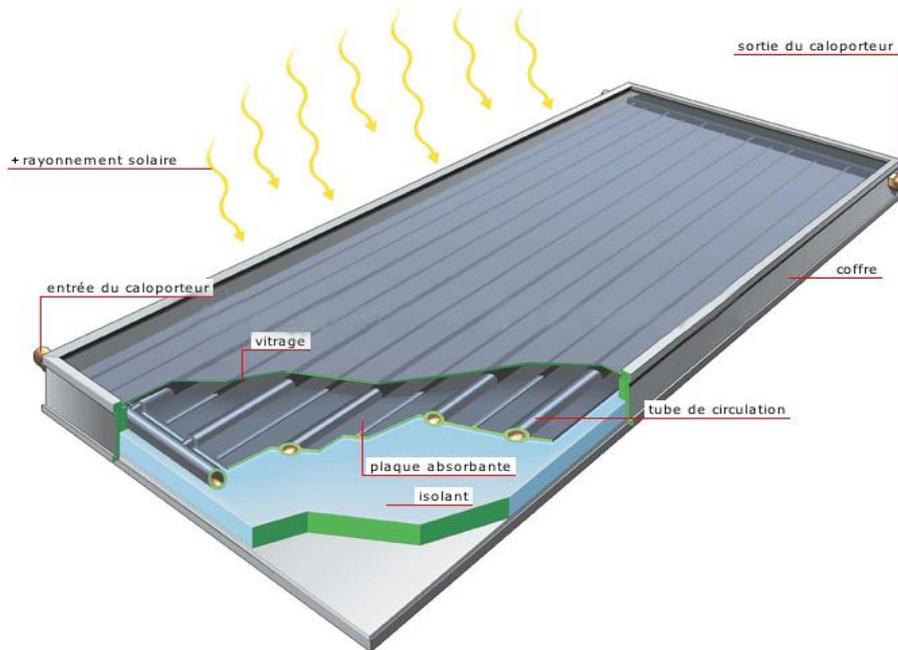


Figure III.7 : la coupe d'un capteur plan vitré.

3.2 Les capteurs à air :

C'est de l'air qui est chauffé lorsqu'il circule dans les tubes. Il permet ensuite de chauffer le logement, mais est aussi utilisé à des fins industrielles. La toiture d'une grange peut constituer un excellent capteur pour réchauffer l'air nécessaire au séchage des produits agricoles. Cet air est collecté dans une lame d'air aménagée entre la toiture et un isolant rigide placée en-dessous, puis soufflé par un ventilateur grâce à un réseau de gaine jusqu'à le fourrage à sécher placé sur un caillebotis.

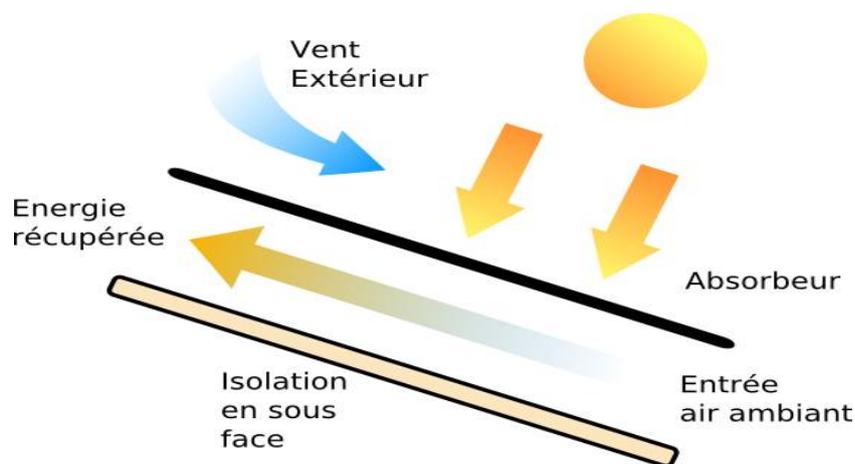


Figure III.8 : Le capteur à air.

4. Comparaison des différents capteurs :

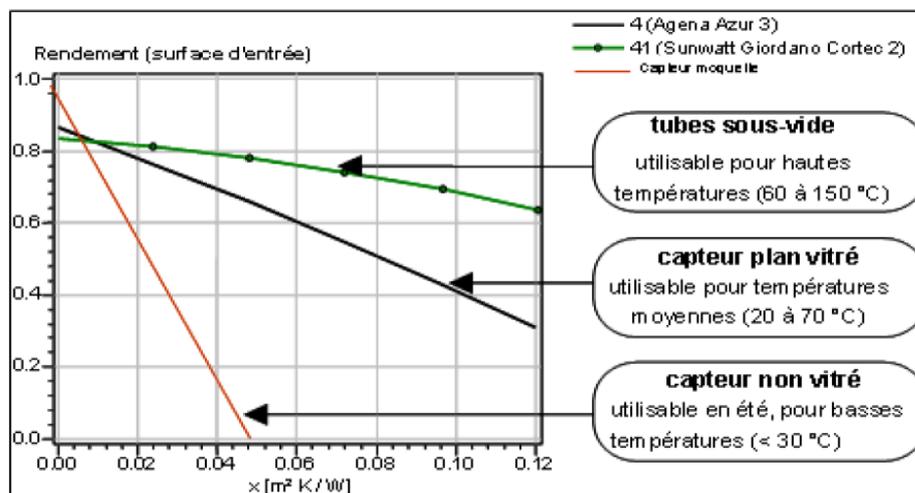


Figure III.9 : Schéma montrant les performances comparées des différents types de capteurs solaires thermiques.

5. Systèmes de chauffe-eau solaire :

5.1. Le chauffe-eau solaire monobloc :

Les capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et sont placés à l'extérieur. Ce système a l'avantage d'être simple et peu coûteux. Il s'installe généralement sur une terrasse ou dans un jardin mais plus difficilement en toiture fortement inclinée. Son principal inconvénient : les pertes thermiques sont importantes même si le ballon est bien isolé. En outre, son intégration architecturale est plus difficile. Ce système est souvent recommandé pour un usage uniquement en été.

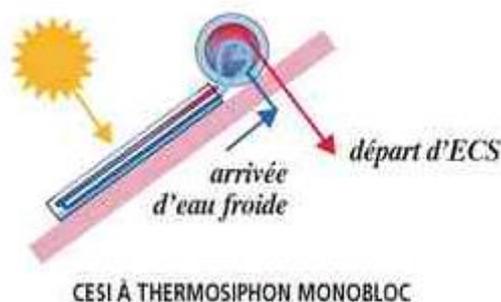


Figure III.10 : Le chauffe-eau solaire monobloc.

5.2. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés :

Dans ce cas, le ballon est à l'abri dans une pièce de la maison ou dans un bâtiment annexe. Il permet d'éviter les pertes thermiques et peut être efficace quasiment toute l'année.

5.2.1 à circulation forcée :

Les modèles les plus couramment employés sont à circulation forcée, c'est-à-dire qu'une pompe électrique met en mouvement le liquide caloporteur lorsqu'il est plus chaud que l'eau sanitaire du ballon. Un régulateur électronique met en marche et arrête la pompe aux moments opportuns grâce à une sonde de température.

5.2.2 à thermosiphon :

Le modèle à éléments séparés à thermosiphon laisse le liquide circuler librement des capteurs au ballon sans pompe ou autre dispositif, et ce, grâce à la différence de température. Dans ce cas, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs.

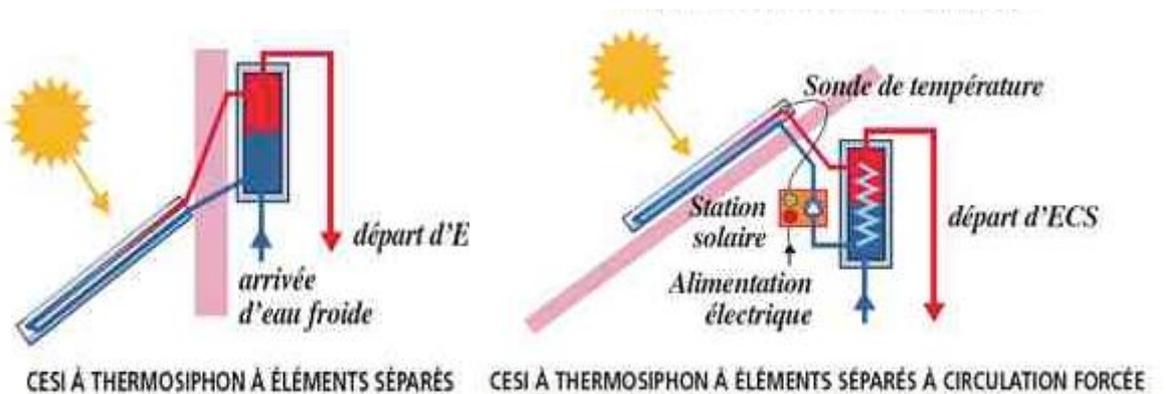


Figure III.11 : le chauffe-eau solaire à élément séparé.

6. Les différents systèmes existants :

6.1 Chauffe-eau Solaire Individuel :

Il est conçu pour chauffer eau Sanitaire seulement.

6.2 Le système solaire combiné :

Associe chauffage de l'eau sanitaire et chauffage de l'habitat. Dans ce cas, le ballon dispose de deux sorties, l'une pour l'eau chaude sanitaire et l'autre pour le chauffage. Le liquide caloporteur circule le plus souvent dans une dalle au sol, système appelé planché solaire direct.

7. Installation des capteurs solaires :

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

7.2. En façade / en pignon : peu esthétique, choix par défaut lorsque le toit ne peut accueillir les panneaux.

7.3. Sur le toit : solution plébiscitée car elle permet :

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

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

8. Association des capteurs solaires :

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

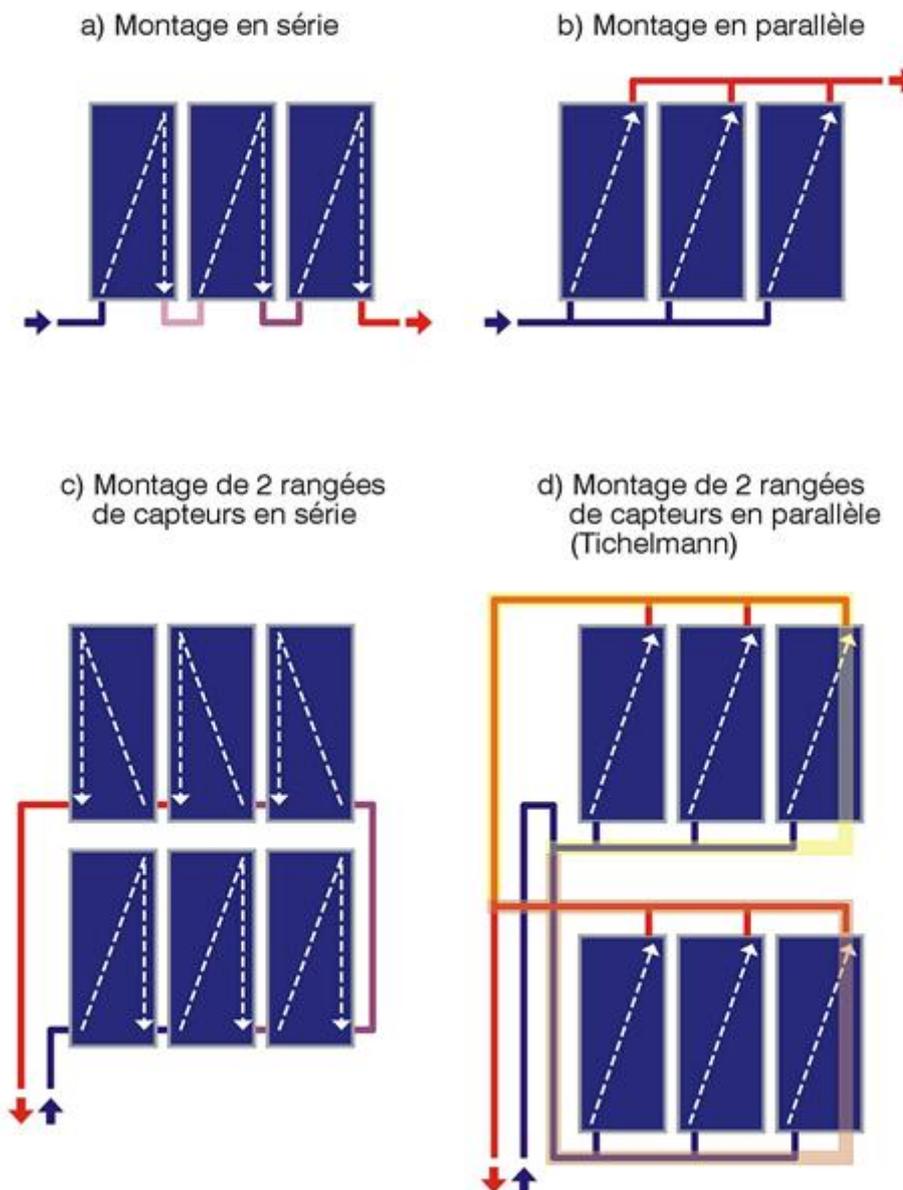


Figure III.12 : les capteurs en série et les capteurs en parallèle.

9. Le fluide caloporteur :

Le circuit primaire relatif à l'installation sous pression est totalement rempli d'un fluide caloporteur résistant au gel. On utilise généralement du propylène glycol. Il existe aussi des mélanges complets qui contiennent un agent inhibiteur de corrosion, un agent anti-mousse, un agent anti-algue et un colorant.

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation de projet

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'air, soit l'eau. Par rapport à l'eau, l'air a les avantages suivants:

- Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été lorsque le soleil "tape" fort.
- Avec de l'air sec, il n'y a pas de problème de corrosion.
- Toute fuite est sans conséquence,
- Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux.
- Le système à mettre en œuvre est plus simple et plus fiable.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux.
- Le produit de la masse volumique ρ par la chaleur spécifique C_p est faible :
 $\rho \cdot C_p = 1225 \text{ J/m}^3 \cdot \text{K}$ 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.
- compte tenu du point précédent, Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

10. Energie d'appoint :

Une source d'énergie d'appoint est nécessaire pour couvrir la totalité des besoins de l'eau chaude sanitaire dans des périodes défavorables (période de mauvais temps). Pour ce faire, il faut équiper le ballon d'un dispositif d'appoint qui relais en cas de besoin, et restitue le stock d'eau chaude, il peut s'agir :

- d'une résistance électrique, souvent placée à mi-hauteur du ballon.
- D'un serpentin (gaz, fuel, bois) située en aval du ballon.

11. L'effet thermosiphon :

La circulation de l'eau dans le chauffe-eau solaire est provoquée par l'effet thermosiphon. Lorsque le fluide d'un circuit est soumis à une différence de température, il se meut par variation de sa densité entre les parties chaudes et froides le fluide chaud étant moins dense que le fluide froid). Cette différence de densité entraîne la création d'une charge équilibrée par la somme des pertes de charges linéaires et singulières du réseau considéré.

Quand le CES est exposé au soleil, au contact de l'absorbeur, le fluide caloporteur s'échauffe et un gradient de température apparaît le long du capteur. Les variations de la densité du fluide engendrent l'effet thermosiphon.

11.1. Variations effectives de pression qui génèrent l'effet thermosiphon :

Les variations de pression effectives (ΔP_e) qui génèrent l'écoulement d'eau comportent deux contributions. La première représente les pertes de pression à travers le capteur (ΔP_1) et la seconde (ΔP_2) les pertes de pression dans la cuve.

a. Variations de pression dans le capteur :

$$\Delta P_1 = g \sin \beta \int_0^{L_c} (\rho_e - \rho(x)) dx$$

L_c : désigne la longueur du capteur.

β : étant l'inclinaison du capteur.

L'évolution de la densité de l'eau en fonction de la température peut être estimée par la relation suivante :

$$\rho(T) = \rho_0 (1 - \beta' T)$$

ρ_0 : est la densité à $T = 0^\circ\text{C}$

β' : est le coefficient de dilatation de l'eau.

On donne dans le tableau suivant quelques valeurs de la masse volumique de l'eau ρ (en kg/m^3) selon la température T (en $^\circ\text{C}$) :

T ($^\circ\text{C}$)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
ρ (kg/m^3)	999,73	998,23	995,67	992,2	988,1	983,2	977,8	971,8	965,3

Tableau III.1 : Valeurs de la masse volumique de l'eau en fonction de la température.

La température de l'eau augmente linéairement le long des tubes de l'absorbeur :

$$T(x) - T_e = \frac{T_s - T_e}{L_c} x$$

En remplaçant $\rho(T)$ et $T(x)$ et après intégration on arrive à :

$$\Delta P_1 = \rho_0 g \beta' (T_s - T_e) \left[\frac{L_c \sin \beta}{2} + h \right]$$

b. Variations de pression dans la cuve :

$$\Delta P_2 = (\rho_e - \rho_s)gh$$

h : différence de hauteur entre le milieu du capteur et le milieu du ballon (m).

12. Chauffe-eau solaire étudié :

Avec la croissance de la demande en énergie et dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre notamment le CO₂ dans l'atmosphère, en plus d'un gisement solaire dépassant les 3000h d'ensoleillement par an, l'Algérie a décidé de mettre en place une stratégie pour développer les différentes applications des énergies renouvelables. Parmi les applications les plus prometteuses on trouve les chauffe-eau solaires. Un premier prototype a été conçu par l'Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers « ENGTP ». Elle envisage de le développer pour se lancer dans la fabrication et la commercialisation ensuite.

12.1. Présentation de l'entreprise :

L'Entreprise Nationale de Grands Travaux Pétroliers « ENGTP » a été créée par décret n° 80-103 du 06 avril 1980. Elle hérite principalement de tous les biens meubles et immeubles, moyens humains et matériels détenus par l'ex-société « ALTRA » filiale de Sonatrach des années 60. GTP est une Société par Actions créée depuis le 19 février 1989, ses actions étaient détenues d'une part par la société mère Sonatrach à 51% et d'autre part par la Société de Gestion de participation à 49% jusqu'au 13 Décembre 2005 où toutes ses actions sont détenues à 100 % par Sonatrach. Son capital social est actuellement de 2.790.000.000 DA. L'objet de GTP est :

- l'étude et la réalisation des projets d'installation matérielle notamment dans les domaines des hydrocarbures, de l'hydraulique, de l'énergie, de l'agroalimentaire, des matériaux de construction et des industries s'y rapportant, à l'intérieur du territoire et à l'étranger.
- La maintenance d'installations industrielles en exploitation.
- La formation dans ce domaine.
- Etudes générales industrielles, résolution des problèmes technico-économiques et expertise.
- Contrôle et réception de tous matériaux, matériels et installations industrielles.
- La réalisation des grands ensembles industriels dans le domaine des Hydrocarbures et des industries se rapportant à son objet.
- Réalisation de réseaux de collectes et désertes d'Hydrocarbures liquides et gazeux et des installations de surfaces y afférents.

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation de projet

Son siège social est fixé à : BP 38, zone industrielle de Réghaia, Alger. Elle est implantée sur le territoire national d'est en ouest et du nord au sud, notamment à Skikda, Arzew, Hassi R'mel, Hassi Messaoud et In Amenas où elle est représentée par des directions régionales.

12.2. Chauffe-eau solaire objet d'étude :

Le chauffe-eau solaire à thermosiphon tel que développé par GTP est constitué de deux parties reliées par un groupe de transfert, qui assure la circulation :

- un capteur qui transforme le rayonnement solaire en chaleur.
- une cuve de stockage.



Figure III.13 : Image de chauffe-eau solaire de GTP.

12.3. Le capteur solaire :

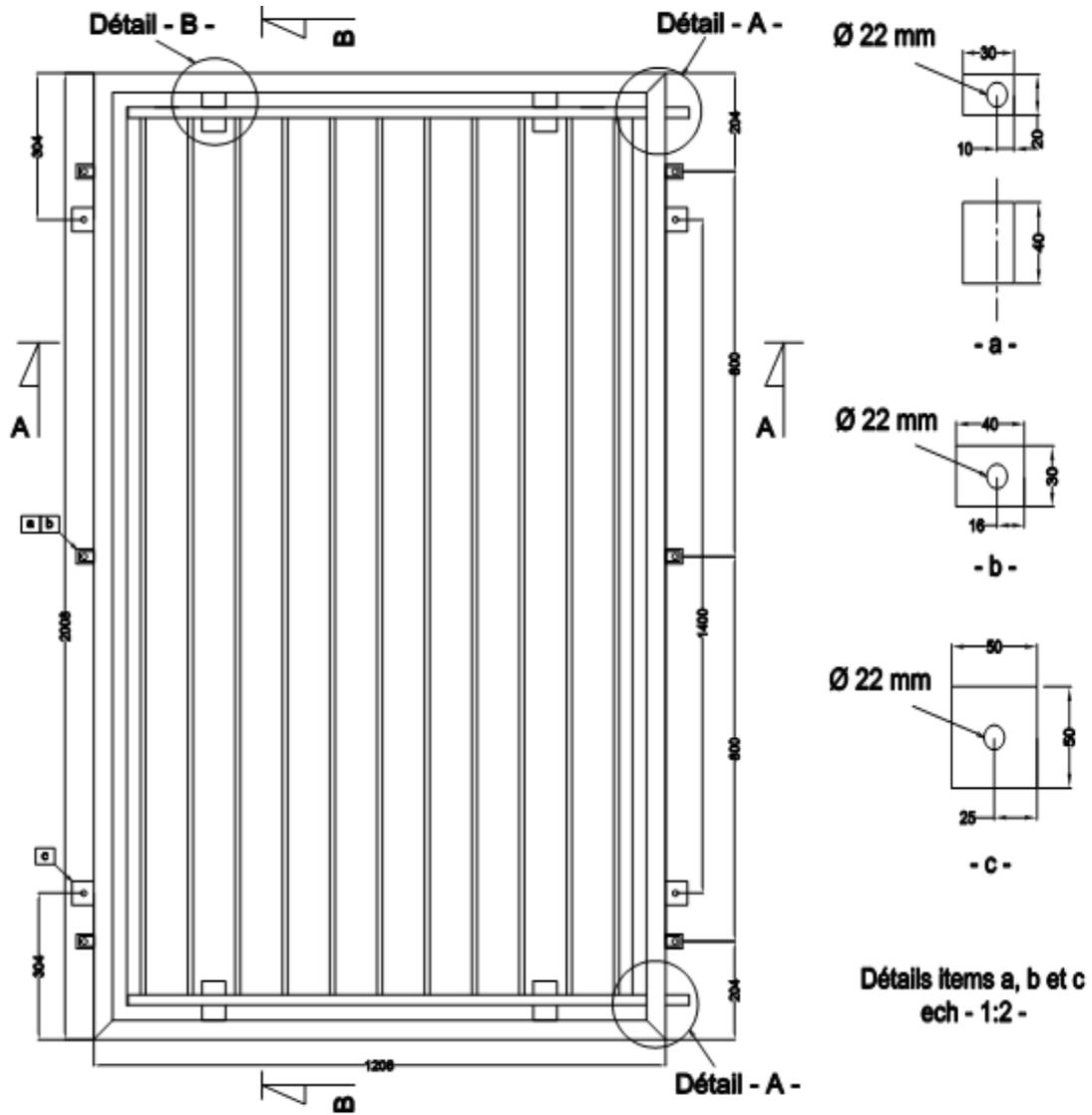


Figure III.14 : Plan général du capteur.

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation de projet

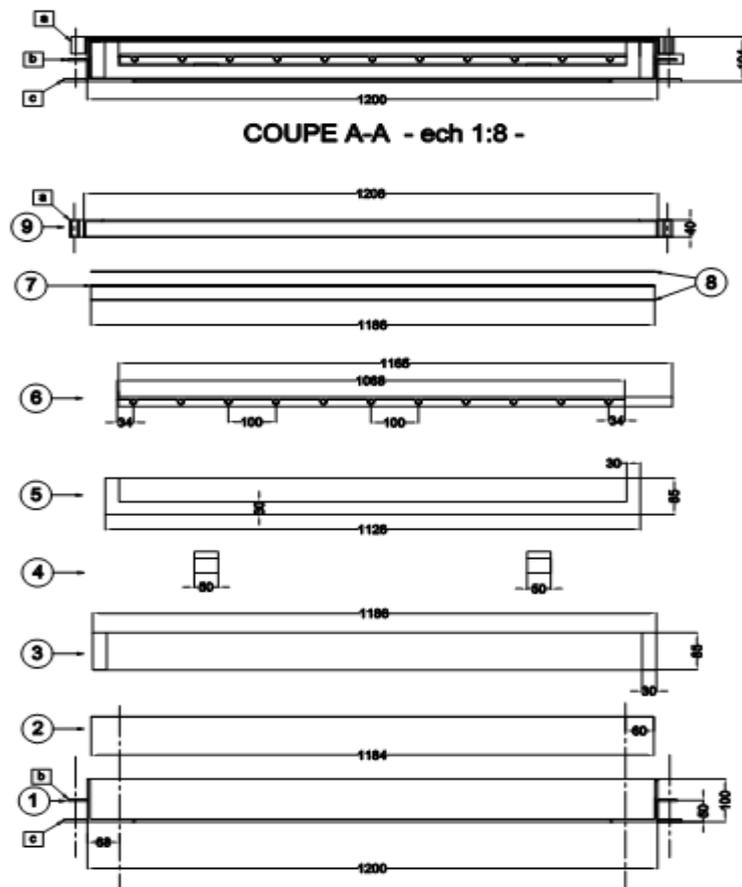


Figure III.15 : La coupe A-A de capteur GTP.

1	Boîtier en cornière 100 x 100 x 6 mm avec une traverse 50 x 6 mm.
2	Tôle galvanisé épaisseur 1 mm.
3	Cadre en bois avec une traverse 34 x 20 mm protégée par une couche fine de laine de roche.
4	Supports de collecteurs (22 mm) en bois protégés par une fine couche de laine de roche.
5	Isolation avec la laine de roche épaisseur 30 mm et film E16 en alum. pour le fond et surfaces latérales.
6	Absorbeur composé de tôle en aluminium ép. 0.3 mm et des tubes en cuivre Ø 12 et 22 (l'ensemble peint en noire mat).
7	Vitre trempé, prismatique à faible teneur en fer épaisseur 4 mm.
8	Joint d'étanchéité largeur 20 mm avec une épaisseur de 3 mm.
9	Couvercle en cornière en acier galvanisé (ou aluminium) 40 x 40 x 3 mm.
10	Tube en cuivre Ø 22 mm, épaisseur 1 mm.
11	Tube en cuivre Ø 12 mm, épaisseur 1 mm.
12	Tôle en aluminium épaisseur 0.3 mm.
a	Ensemble de fixation couvercle / boîtier avec boulon Ø 10 mm x 70 mm.
b	boulon Ø 10 mm x 70 mm.
c	Plaque de fixation du panneau sur support épaisseur 6 mm.

Tableau III.2 : caractéristiques dimensionnelles du capteur.

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation de projet

Les caractéristiques des matériaux constituant le chauffe-eau solaire étudié sont regroupées dans le tableau suivant :

vitrage	Epaisseur = 4 mm Transmittivité : 80 --> 90% Réflexibilité: 8%
aluminium + couche peint en noire mat	Epaisseur = 1 mm Conductivité thermique: 204 w/m.°c Absorption : 95 % Emission : 5 %
cuivre + couche peint en noire mat	Absorption : 95 % Emission : 5 % Conductivité thermique: 386 w/m.°c
la laine de roche	Epaisseur = 30 mm Conductivité thermique: 0,038 w/m.°c

Tableau III.3 : caractéristiques des matériaux de chauffe-eau solaire étudié.

12.4. La cuve de stockage :

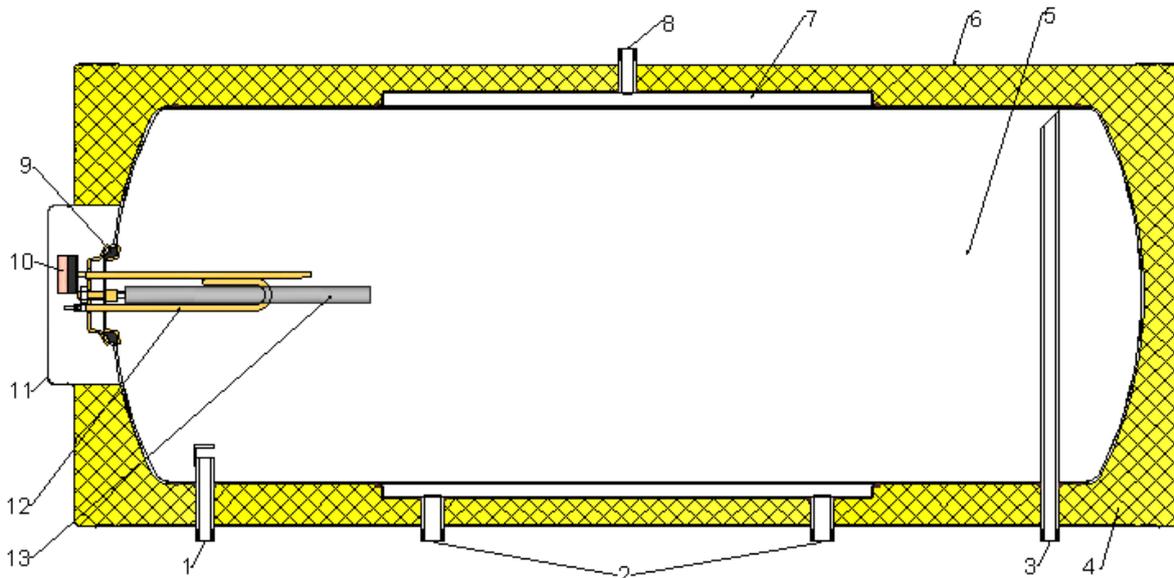


Figure III.16 : structure de la cuve de stockage.

Chapitre III : Généralités sur les capteurs thermiques et présentation de projet

- 1) entrée d'eau froide.
- 2) entrée – sortie de fluide caloporteur (circuit fermé).
- 3) sortie d'eau chaude produite.
- 4) isolation :
 - Matériau : Polyuréthane à réaction écologique.
 - Epaisseur : 50mm.
 - Densité : 43 - 45kg/m³.
- 5) Cuve de stockage :
 - Matériau : Acier galvanisé.
 - Epaisseur : 3mm.
 - Traitement intérieur : Emailage Vitrifié Duroplastic selon la norme internationale D1N 4753-4.
- 6) Enveloppe Extérieure :
 - Matériau : Acier galvanisé - Epaisseur : 0.5mm.
 - Revêtement : électrostatique en Polyester pur.
- 7) Echange thermique :
 - Mode de fonctionnement : circuit fermé.
 - Type : Jacket.
 - Matériau : Acier galvanisé - Epaisseur : 2 mm.
- 8) soupape de sécurité de circuit fermé.
- 9) Joint d'étanchéité imperméable à haute résistance thermique.
- 10) thermostat.
- 11) couverture de la résistance.
- 12) appoint : résistance électrique de type thermoplongeur.
- 13) protection anodique : anode de magnésium

12.5. Orientation du capteur :

Le capteur est orienté plain sud avec une inclinaison de 40° par rapport à l'horizontal. Ce positionnement permet une bonne réception des rayons du soleil et assure un rendement optimal quelle que soit la journée ou la saison de l'année.

13. Conclusion :

Ce chapitre a permis de présenter en détail les différents capteurs thermiques, leur utilisation, et le principe de fonctionnement de ces éléments. Ainsi on a fait la présentation du projet objet d'étude.

Chapitre IV

Bilan thermique de chauffe-eau solaire

1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré au calcul de bilan thermique de chauffe-eau solaire et l'évolution de son rendement le long de l'année. Le bilan est établi par la quantité d'énergie reçue moins les différentes pertes dues au gradient de température existant entre le capteur et le milieu ambiant.

2. Rappels sur les transferts de chaleur :

On appelle transfert de chaleur, les processus par lesquels de l'énergie est échangé sous forme de chaleur entre des corps ou des milieux à des températures différentes T_1 et T_2 .

La chaleur peut être transmise par conduction, convection ou rayonnement. Bien que les trois processus puissent avoir lieu simultanément, l'un des mécanismes est généralement prépondérant. Par exemple, la chaleur est principalement transmise par conduction à travers les murs d'une maison, l'eau dans une casserole placée sur une cuisinière est surtout chauffée par convection et la terre reçoit sa chaleur du soleil en grand partie par rayonnement.

➤ Conduction :

L'échange de chaleur par conduction est défini par la relation de loi de FOURIER (1822) [22]. L'expression de la densité de chaleur q pendant le temps dt pour un cas unidirectionnel s'écrit sous la forme suivante :

$$q = \frac{dQ}{dS} = - \lambda \frac{dT}{dx} \quad (IV.1)$$

➤ Convection :

Le transfert de chaleur par convection apparait lorsqu'il existe une différence de température entre un fluide et un solide. Le flux échangé est donné par la loi de NEWTON [22] :

$$Q_{cv} = h S (T_s - T_f) \quad (IV.2)$$

➤ Rayonnement :

Le rayonnement thermique est un transfert de chaleur par mode électromagnétique. Le flux est donné par la relation issue de la loi de Stefan BOLTEZMAN [22] :

$$Q_{ray} = S \sigma \varepsilon (T_1^4 - T_2^4) \quad (IV.3)$$

3. Bilan thermique:

3.1 Bilan thermique global de la vitre :

Lorsqu'un rayonnement frappe le vitrage (à une température T), l'énergie de ce rayonnement se répartie ainsi une partie de l'énergie incidente est réfléchiée, une autre est absorbée, et enfin une troisième est transmise.

On introduit les pouvoirs réfléchissant, absorbant et filtrant nommés aussi coefficients de transmission, de réflexion et d'absorption:

$$\Phi_{inc} = \Phi_{tran} + \Phi_{ref} + \Phi_{abs} \quad (IV.4)$$

$$\text{Soit : } 1 = \frac{\Phi_{tran}}{\Phi_{inc}} + \frac{\Phi_{ref}}{\Phi_{inc}} + \frac{\Phi_{abs}}{\Phi_{inc}}$$

Ce qui permet d'introduire les coefficients :

$$\tau = \frac{\Phi_{tran}}{\Phi_{inc}} \quad ; \quad \rho = \frac{\Phi_{ref}}{\Phi_{inc}} \quad ; \quad \alpha = \frac{\Phi_{abs}}{\Phi_{inc}} \quad (IV.5)$$

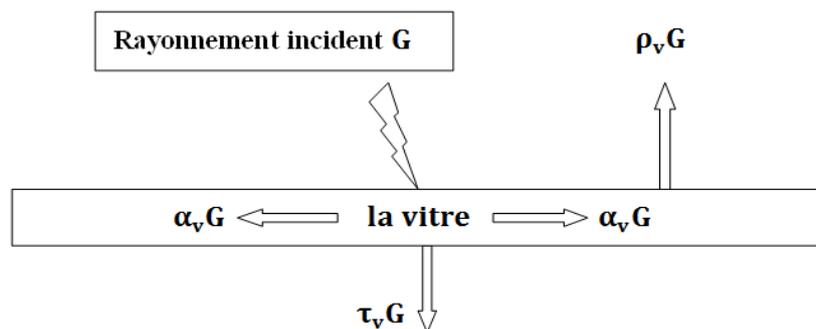


Figure IV.1: répartition de rayonnement solaire à travers la vitre.

3.2. Bilan thermique de capteur plan :

Pour avoir le bilan thermique il faut calculer tous les flux de chaleur et fixer tous les éléments intervenants dans la détermination de rendement de capteur solaire.

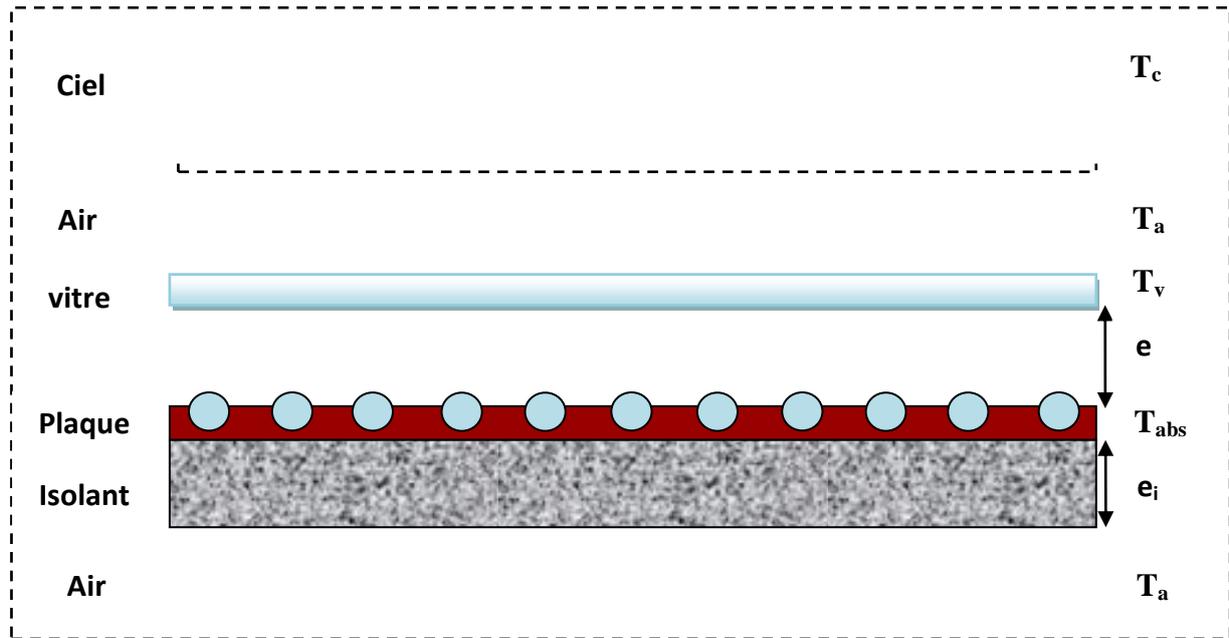


Figure IV.2 : schéma donnant les températures des différents niveaux d'un capteur plan.

➤ **Flux solaire qui a atteint la vitre :**

$$Q_v = \alpha_v \cdot S \cdot G \quad (IV.6)$$

Avec :

\$\alpha_v\$: absorptivité de la vitre.

\$G\$: éclairement solaire globale.

➤ **Flux échangé par rayonnement entre la vitre et la voûte céleste :**

$$Q_{r/v-vc} = S \cdot h_{r/v-vc} \cdot (T_v - T_c) \quad (IV.7)$$

Avec :

\$h_{r/v-vc}\$: coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et voûte céleste.

\$T_v\$: température moyenne de la vitre.

\$T_c\$: température de la voûte céleste ; avec \$T_c = 0,0552 \cdot (T_a)^{1,5}\$

\$T_a\$: température ambiante (k).

Où

$$h_{r/v-vc} = \frac{\sigma(T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2)}{\left(\frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v}\right) + \frac{1}{F_{vc}} + \left(\frac{1-\epsilon_c}{\epsilon_c}\right) \cdot \left(\frac{S}{S_c}\right)} \quad (IV.8)$$

Avec :

ε_c , ε_v : Les émissivités respectivement de la voûte céleste et la vitre.

s_c : Surface de la voûte céleste.

F_{vc} : Facteur de forme entre la vitre et la voûte céleste.

* Le rapport $\frac{s}{s_c} \approx 0$ puisque $s_c \gg s$.

* Tout le flux rayonné par la vitre est reçu par la voûte céleste : $F_{vc} = 1$

$$\begin{aligned} \text{Donc : } h_{r/v-vc} &= \frac{\sigma(T_v+T_c).(T_v^2+T_c^2)}{\left(\frac{1-\varepsilon_v}{\varepsilon_v}\right)+1} \\ &= \frac{\sigma(T_v+T_c).(T_v^2+T_c^2)}{\left(\frac{1}{\varepsilon_v}\right)} \end{aligned}$$

$$\text{En fin: } h_{r/v-vc} = \varepsilon_v . \sigma(T_v + T_c) . (T_v^2 + T_c^2) \quad (\text{IV.9})$$

➤ **Flux échangé par convection entre la vitre et le milieu ambiant :**

$$Q_{cv/v-amb} = S . h_{cv/v-amb} (T_v - T_a) \quad (\text{IV.10})$$

$h_{cv/v-amb}$ = coefficient d'échange par convection entre la vitre et le milieu ambiant.

➤ **Flux échangé par rayonnement entre l'absorbeur et la vitre:**

$$Q_{r/abs-v} = S . h_{r/abs-v} . (T_{abs} - T_v) \quad (\text{IV.11})$$

Avec :

T_{abs} : température de l'absorbeur.

$h_{r/abs-v}$: coefficient d'échange par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur.

$$\text{Où } h_{r/abs-v} = \frac{\sigma(T_v+T_{abs}).(T_v^2+T_{abs}^2)}{\left(\frac{1-\varepsilon_v}{\varepsilon_v}\right) + \frac{1}{F_{v,ab}} + \left(\frac{1-\varepsilon_{abs}}{\varepsilon_{abs}}\right) \cdot \left(\frac{S_{abs}}{S_v}\right)} \quad (\text{IV.12})$$

Avec :

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

$F_{v,ab}$: Facteur de forme entre la vitre et l'absorbeur.

* Tout le flux rayonné par l'absorbeur est reçu par la vitre : $F_{v,ab} = 1$

Donc :

$$h_{r/abs-v} = \frac{\sigma(T_v + T_{abs})(T_v^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v}\right) + 1 + \left(\frac{1-\epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}}\right)} \quad (IV.13)$$

➤ **Flux échangé par convection entre l'absorbeur et la lame d'air:**

$$Q_{cv/abs-lam} = S \cdot h_{cv/abs-lam} (T_{abs} - T_{lam-air}) \quad (IV.14)$$

Puisque la température de la lame d'air est très proche de celle de vitrage on prend $T_{lam-air} = T_v$:

$$Q_{cv/abs-lam} = S \cdot h_{cv/abs-lam} (T_{abs} - T_v) \quad (IV.15)$$

$h_{cv/abs-lam}$ = coefficient d'échange par convection entre la lame d'air et l'absorbeur.

➤ **Flux de chaleur qui atteint l'absorbeur:**

Lorsqu'un rayon de soleil traverse le vitrage, une fraction de l'énergie transmise est réfléchiée par l'absorbeur vers la couverture transparente. Les rayons incidents subissent alors une série de réflexions et transmissions illustrées en figure :

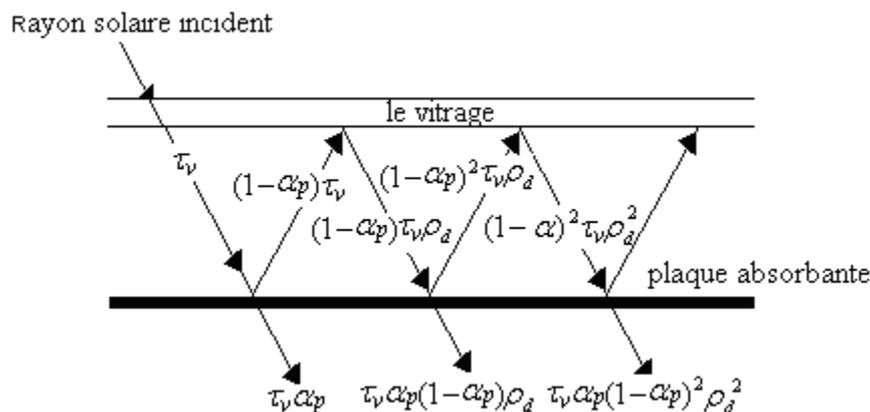


Figure V.3 : Flux de chaleur qui atteint l'absorbeur.

La fraction d'énergie totale transmise et absorbée s'écrit alors :

$$\left(\tau_v \alpha_p\right)_e = \tau_v \alpha_p \sum_{n=0}^{\infty} \left[(1 - \alpha_p) \rho_v \right]^n = \frac{\tau_v \alpha_p}{1 - (1 - \alpha_p) \rho_v} \quad (IV.16)$$

Avec :

τ_v : transmittivité du vitrage.

ρ_v : réflectivité du vitrage.

α_p : absorptivité de la plaque absorbante.

θ : angle d'incidence du rayonnement solaire.

chapitre IV : Bilan thermique de chauffe-eau solaire

En première approximation on écrit l'expression de la puissance solaire absorbée par le capteur :

$$Q = G \cdot \tau_v \cdot \alpha_{\text{abs}} \quad (\text{IV.17})$$

τ_v : coefficient de transmission de la vitre.

α_{abs} : coefficient d'absorption de la plaque absorbante.

En négligeant l'énergie solaire absorbée par la vitre, en toute rigueur elle n'est pas nulle puisque l'on peut écrire :

$$\rho_v + \tau_{\text{abs}} + \alpha_v = 1 \quad (\text{IV.18})$$

ρ_v : coefficient de réflexion de la plaque absorbante.

➤ Flux échangé par conduction à travers l'isolant de la face arrière de capteur :

$$Q_{\text{cd-isol}} = \frac{\lambda_i}{e_i} S (T_{\text{abs}} - T_a) \quad (\text{IV.19})$$

λ_i : conductivité thermique de l'isolant.

e_i : épaisseur de l'isolant.

4. Calcul des coefficients d'échange par convection :

➤ Coefficient d'échange entre la vitre et le milieu ambiant :

$$h = 5,67 + 3,86 v \quad (\text{IV.20})$$

avec :

v : vitesse de vent.

➤ Coefficient d'échange à travers la lame d'air :

La relation liant le flux de chaleur transféré par convection dépend des nombres adimensionnels : $Nu = f(Gr, Pr)$ définis par :

$$\begin{array}{ll} Nu = \frac{h \cdot \lambda}{e} & \text{Nombre de Nusselt} \\ Gr = \frac{\beta' \cdot g \cdot \Delta T \cdot \rho^2 \cdot e^3}{\mu^2} & \text{Nombre de Grashof} \\ Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{\lambda} & \text{Nombre de Prandtl} \\ Ra = Gr \cdot Pr & \text{Nombre de Rayleigh} \end{array}$$

Avec : β' : Coefficient de dilatation. Pour un gaz parfait $\beta' = \frac{1}{T}$
où T Température moyenne des deux plaque.

chapitre IV : Bilan thermique de chauffe-eau solaire

Les propriétés thermo-physiques de l'air sont calculées en fonction de la température par :

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{p_{air}} = 1005,48 - 0,01014T + 0,001138T^2 + 0,62 \times 10^{-3}T^3 + 0,1613 \times 10^{-7}T^4 \quad (IV.21) \\ \rho_{air} = 1,3043 - 0,00203T - 10^{-5}T^2 \quad (IV.22) \\ \mu_{air} = [1,7164 + 0,01327T + 0,00019T^2 + 0,1057 \times 10^{-5}T^3] \times 10^{-5} \quad (IV.23) \\ \lambda_{air} = 0,02415 + 0,00008T \quad (IV.24) \end{array} \right.$$

Le calcul d'un flux de chaleur transmis par convection naturelle s'effectue donc de la manière suivante :

1. Calcul des nombres adimensionnels de Grashof et de Prandtl .
2. Suivant la valeur de Gr et configuration choix de la corrélation.
3. Calcul de Nu par application de cette corrélation.
4. Calcul de $h = \frac{Nu \lambda}{e}$ et de $\Phi = h.S (T_2 - T_1)$.

Pour la convection naturelle, les principales corrélations sont :

➤ **Corrélation de O'TOOLE, GATTON, MULKUS et EDWARDS :**

- Pour $1708 < Ra \cdot \cos\beta < 5900$

$$Nu = 1 + 1,446 \left[1 - \frac{4708}{Ra \cdot \cos\beta} \right]^+ \quad (IV.25)$$

- Pour $5900 < Ra \cdot \cos\beta < 9230$

$$Nu = 0,229 (Ra \cdot \cos\beta)^{0,252} \quad (IV.26)$$

- Pour $9230 < Ra \cdot \cos\beta < 10^6$

$$Nu = 0,157 (Ra \cdot \cos\beta)^{0,285} \quad (IV.27)$$

➤ **Corrélation de HOLLANDS :**

Cette relation est basée sur l'expérimentation, elle permet la détermination du nombre de Nusselt pour des angles d'inclinaison allant de 0° à 60° .

$$Nu = \left[1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos\beta} \right]^+ \left[1 - \frac{1708(\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos\beta} \right] + \left[\left[\frac{Ra \cos\beta}{5830} \right]^{1/3} - 1 \right]^+ \right] \quad (IV.28)$$

Où les termes en (+) sont utilisés seulement dans le cas où ils sont positifs.

5. Bilan thermique global :

Le bilan thermique consiste à calculer tous les flux de chaleur réagissant sur le capteur.

$$Q = Q_u + Q_a + Q_t \quad (IV.29)$$

Q : énergie absorbée par le capteur (W).

Q_u : énergie emmagasinée dans le fluide caloporteur (énergie utile).

Q_a : énergie perdue vers l'extérieur par convection et rayonnement.

Q_t : énergie de démarrage nécessaire à la montée de température du capteur.

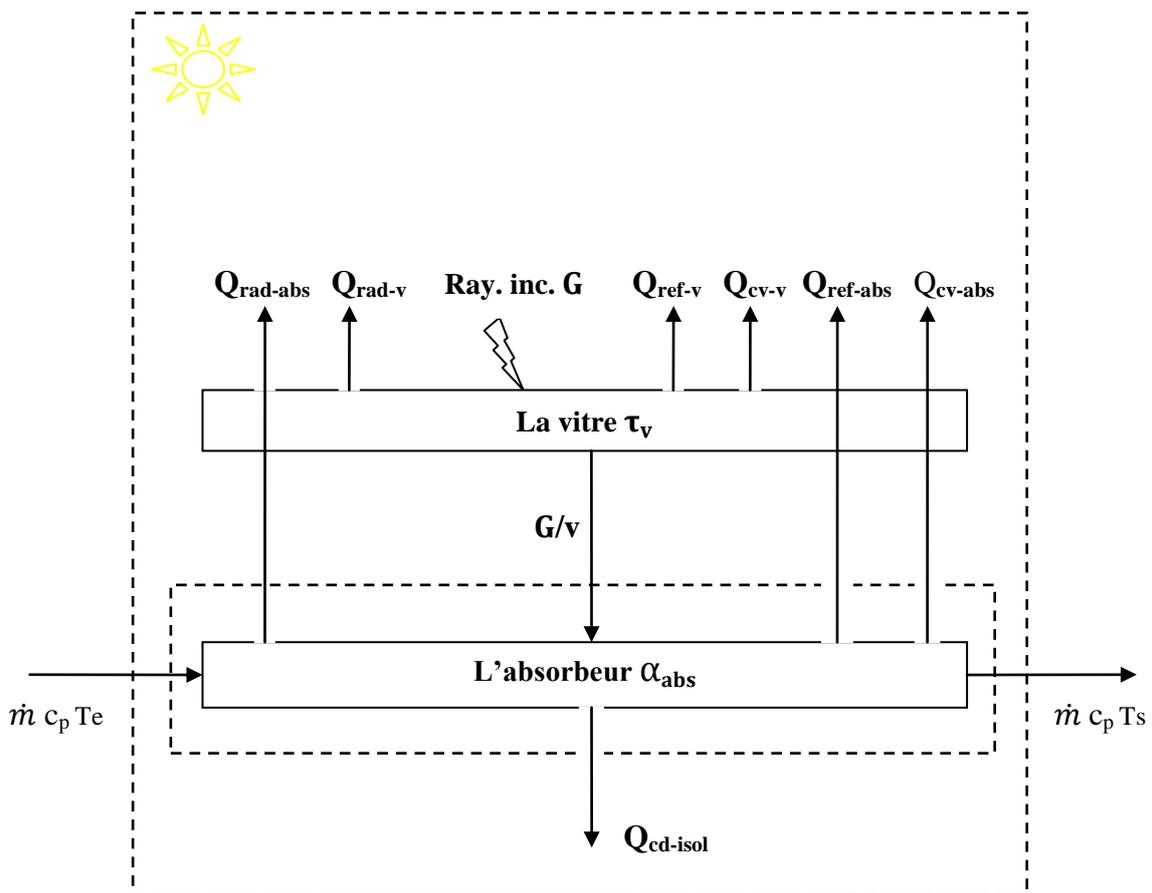


Figure IV.4 : les différents flux réagissant sur le capteur.

6. Calcul du coefficient de pertes thermique global K :

Le coefficient de pertes thermiques vers l'environnement est déterminé par une analogie électrique comme indiqué ci-dessous. Et se calcule par rapport aux deux faces du capteur (avant et arrière).

➤ Face avant :

Soit R_1 la résistance entre la surface absorbante à T_{abs} et la vitre à T_v , h_{cv1} et h_{r1} les coefficients d'échange thermique relatifs respectivement à la convection et au rayonnement. On a :

$$R_1 = \frac{1}{h_{cv1} + h_{r1}} \quad (IV.30)$$

❖ Calcul de h_{cv1} :

Le flux transmis par convection de l'absorbeur à la lame d'air s'écrit :

$$Q_{CV} = h_{cv1} S (T_{abs} - T_{lam-air}) = h_{cv1} S (T_{abs} - T_v) \quad (IV.31)$$

❖ Calcul h_{r1} :

$$h_{r/abs-v} = \frac{\sigma(T_v + T_{abs}) \cdot (T_v^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v}\right) + 1 + \left(\frac{1-\epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}}\right)} \quad (IV.32)$$

Soit R_2 la résistance thermique entre la vitre et l'extérieur à T_a et on notera h_{cv2} et h_{r2} les coefficients d'échange correspondants à la convection et au rayonnement. Et par suite :

$$R_2 = \frac{1}{h_{cv2} + h_{r2}} \quad (IV.33)$$

❖ Calcul de h_{cv2} :

$$h_{cv2} = 5,67 + 3,86 v \quad (IV.34)$$

v : vitesse de vent.

❖ Calcul de h_{r2} :

$$h_{r/v-vc} = \epsilon_v \cdot \sigma(T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2) \quad (IV.35)$$

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

$$R_{av} = R_1 + R_2 \quad (IV.36)$$

➤ Face arrière :

Soit R_1 la résistance thermique créée par l'isolant. On a affaire à de la conduction pure. Le coefficient d'échange par conduction thermique dans le cas du mur semi-infini s'écrit dans notre cas :

$$R'_1 = \frac{e_i}{\lambda_i} \quad (IV.37)$$

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

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

$$R_{ar} = R'_1 + R'_2 \quad (IV.38)$$

Soit R'_2 la résistance thermique entre la face externe de l'isolant et l'air ambiant. En général cette résistance peut être négligée ($R'_2 = 0$), la température de surface de l'isolant étant proche de celle de l'air ambiant à T_a .

Finalement :

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{1}{R'_1} \quad (IV.39)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{h_{cv1} + h_{r1}} + \frac{1}{h_{cv2} + h_{r2}}} + \frac{1}{\frac{e_i}{\lambda_i}} \quad (IV.40)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\frac{Nu \lambda}{e} + \frac{\sigma(T_v + T_{abs}) \cdot (T_v^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v}\right) + 1 + \left(\frac{1-\epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}}\right)}} + \frac{1}{(5,67 + 3,86v) + \epsilon_v \cdot \sigma(T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2)}}} + \frac{\lambda_i}{e_i} \quad (IV.41)$$

Le flux thermique échangé avec l'environnement à T_a sera donc :

$$Q_a = K S (T_{abs} - T_a) \quad (IV.42)$$

7. Rendement du capteur :

On en déduit le rendement instantané η , égal au rapport de l'énergie utile Q_u et l'éclairement solaire G reçue par le capteur :

$$\eta = \frac{Q_u}{G} = \frac{Q - Q_a}{G} = (\tau_v \cdot \alpha_{abs}) - \frac{Q_a}{G} \quad (IV.43)$$

$$\eta = (\tau_v \cdot \alpha_{abs}) - \frac{K (T_{abs} - T_a)}{G} \quad (IV.44)$$

$$\eta = (\tau_v \cdot \alpha_{abs}) \cdot \left(\frac{1}{\frac{Nu \lambda}{e} + \frac{\sigma(T_v + T_{abs}) \cdot (T_v^2 + T_{abs}^2)}{\left(\frac{1-\epsilon_v}{\epsilon_v}\right) + 1 + \left(\frac{1-\epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}}\right)}} + \frac{1}{(5,67 + 3,86v) + \epsilon_v \sigma(T_v + T_c) \cdot (T_v^2 + T_c^2)}} + \frac{\lambda_i}{e_i} \right) * \frac{(T_{abs} - T_a)}{G} \quad (IV.45)$$

Résultats :

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

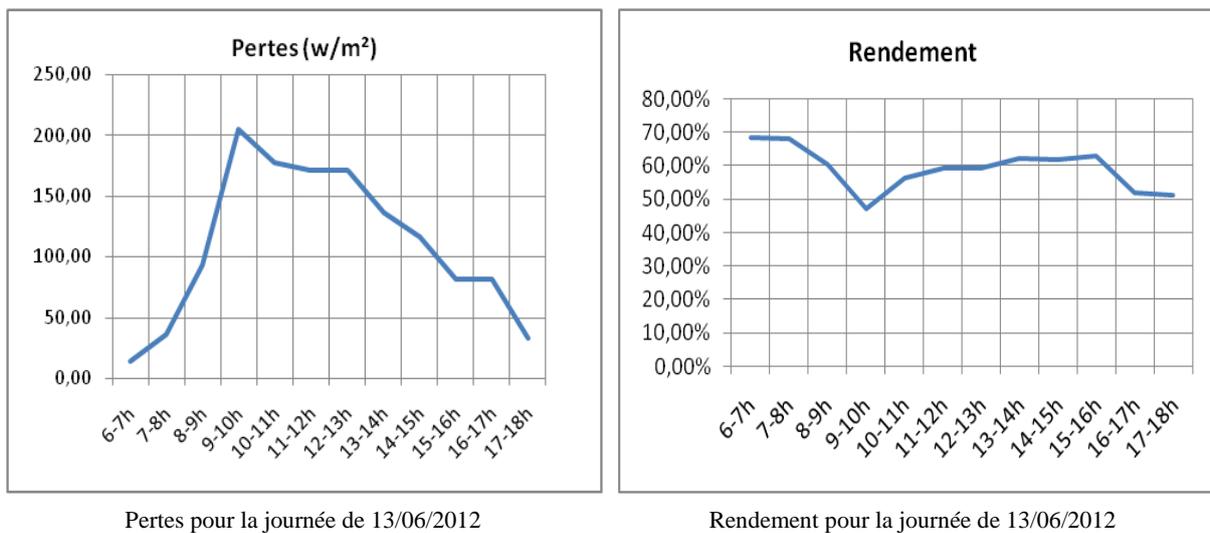


Figure V.5 : Pertes et rendement de capteur pour la journée de 13/06/2012.

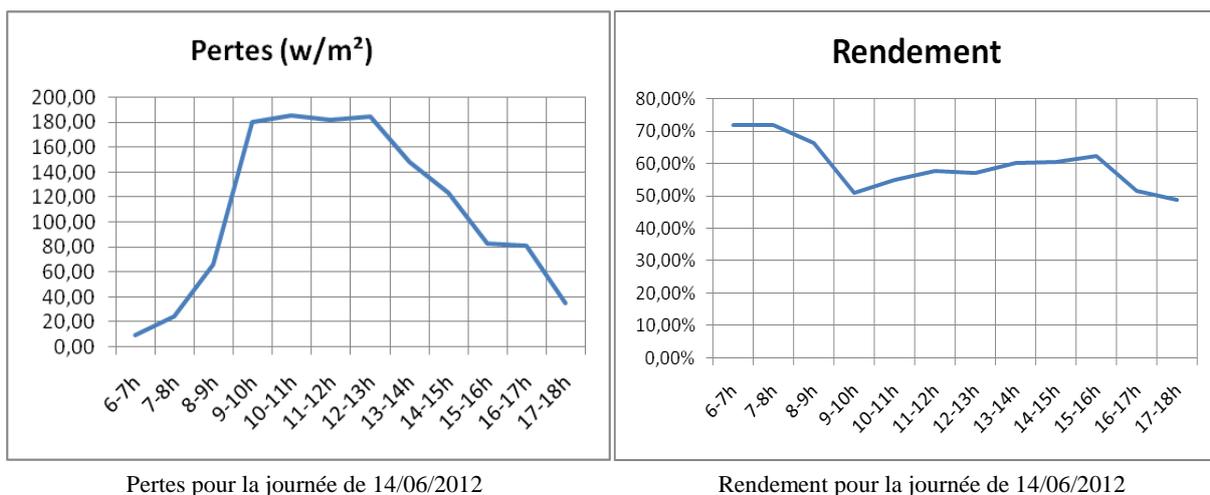


Figure IV.6 : Pertes et rendement de capteur pour la journée de 14/06/2012.

D'après les figures 5 et 6, on remarque que pour des faibles valeurs du flux solaire, au début de la journée, le rendement atteint des valeurs maximales puis il diminue. Ceci peut être expliqué par le fait que plus la différence entre la température moyenne de l'absorbeur et la température ambiante moyenne est faible plus le rendement est important.

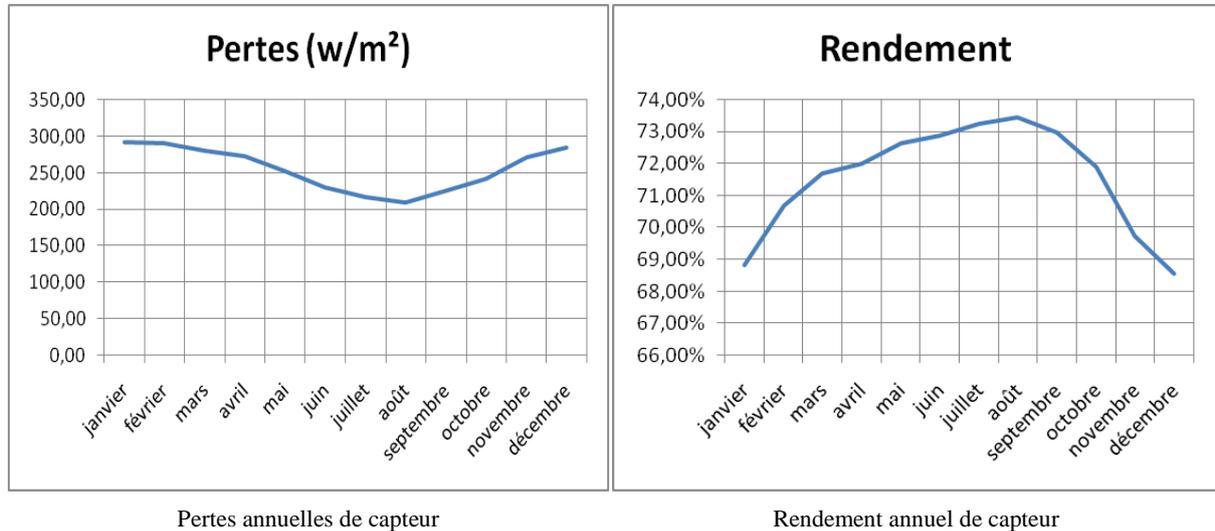


Figure IV.7 : Pertes et rendement annuelles de capteur.

D'après ces deux figures on remarque que le rendement est inversement proportionnel aux pertes thermiques. Le rendement dépasse 70% pratiquement sur toute l'année sauf pour les mois novembre, décembre et janvier par contre on a un rendement maximal pour le mois d'août.

8. Les besoins thermiques en eau chaude sanitaire :

Les besoins en eau chaude sanitaire dépendent de:

- le débit journalier nécessaire au besoin du ménage ;
- le nombre d'occupant ;
- la norme d'utilisation.

Les besoins d'eau chaude sanitaire sont donnés par la formule suivante :

$$B_{e-c-s} = N.V. (T_{ec} - T_{ef}) . \rho . Cp \quad (IV.46)$$

Avec:

- N: nombre d'occupants ;
- V: volume d'eau utilisé par occupant par jour ;
- ρ : masse volumique de l'eau (1 kg/l) ;
- Cp : chaleur spécifique (4,186 kJ/kg °C) ;

chapitre IV : Bilan thermique de chauffe-eau solaire

Pour la zone urbaine, l'utilisation de l'eau est de 170 l/j par habitant et dans la zone rurale est de 100 l/j par habitant d'après la direction de l'hydraulique.

Le besoin de l'eau chaude pour les occupants d'un appartement est estimé à 25 l/j par occupant à 50°C.

	Ts	Te	cp	N	ρ	V	B (kwh/j)	B(kwh)
janvier	50	11,7	4,186	4	1	25	4,45	134
février	50	11,5	4,186	4	1	25	4,48	134
mars	50	13,5	4,186	4	1	25	4,24	127
avril	50	15,2	4,186	4	1	25	4,05	121
mai	50	18,7	4,186	4	1	25	3,64	109
juin	50	22,8	4,186	4	1	25	3,16	95
juillet	50	25,2	4,186	4	1	25	2,88	87
août	50	26,5	4,186	4	1	25	2,73	82
septembre	50	23,7	4,186	4	1	25	3,06	92
octobre	50	20,4	4,186	4	1	25	3,44	103
novembre	50	15,4	4,186	4	1	25	4,02	121
décembre	50	12,7	4,186	4	1	25	4,34	130

Tableau IV.1 : Besoins thermiques en eau chaude sanitaire.

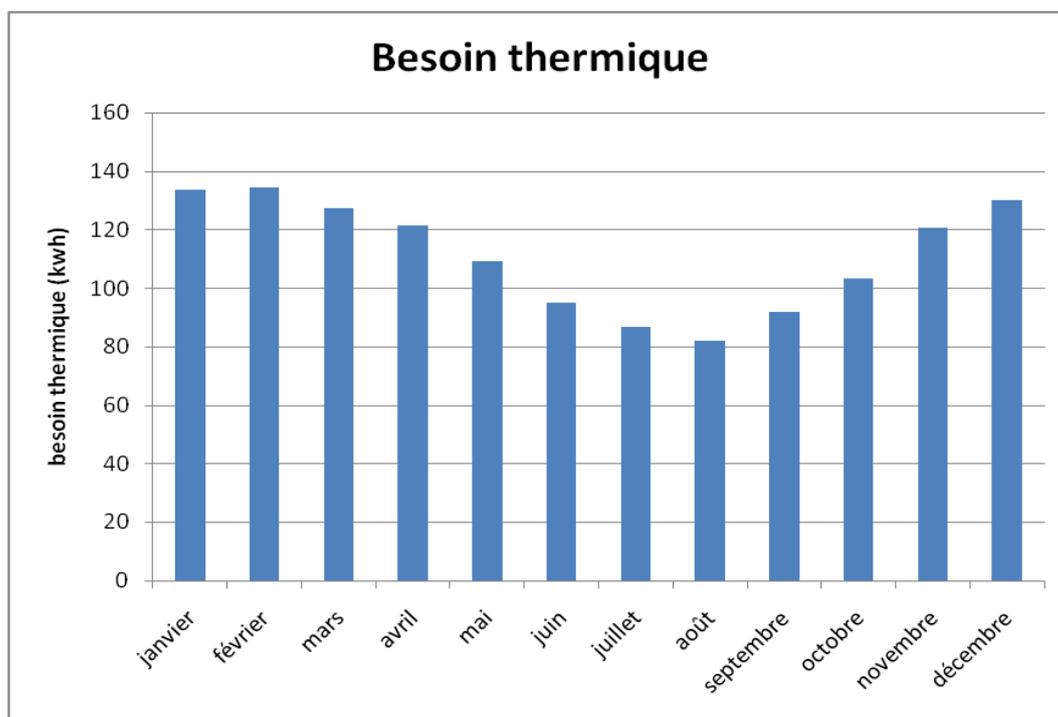


Figure IV.8 : Les besoins thermiques en eau chaude sanitaire.

On remarque que le besoin thermique en eau chaude sanitaire est maximal en saison hivernal où le rendement est minimal. De fait l'utilisation d'un appoint d'énergie est nécessaire.

9. Influence de l'épaisseur de la vitre:

La valeur de cette épaisseur est fournie par la loi de Lambert-Bouguer :

$$G = G^* \exp (- \alpha_v \cdot x) \quad (IV.47)$$

α_v : facteur d'absorption du verre.

x: épaisseur de la vitre en cm.

G : intensité de rayonnement.

G* : rayonnement direct reçu au sol par ciel moyen.

Le tableau ci-dessous montre la relation de l'épaisseur de la vitre par rapport au rayonnement solaire global pour la région d'Alger:

	G	G*	α_v	x
janvier	3706	6328	0,07	3,31
février	4802	7240	0,07	2,54
mars	5560	7818	0,07	2,11
avril	5786	7884	0,07	1,91
mai	6182	7590	0,07	1,27
juin	5988	7326	0,07	1,25
juillet	6266	7274	0,07	0,92
août	6434	7396	0,07	0,86
septembre	6050	7364	0,07	1,21
octobre	5006	6948	0,07	2,03
novembre	3878	6278	0,07	2,98
décembre	3488	5890	0,07	3,25

Tableau IV.2 : Influence de l'épaisseur de la vitre.

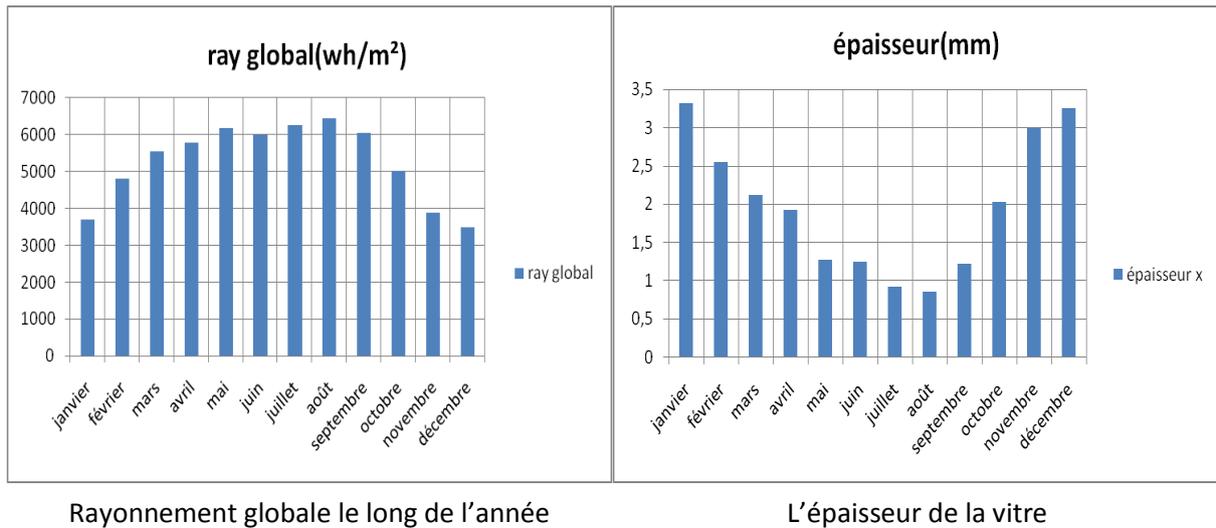


Figure IV.9 : figure illustrant la variation de l'épaisseur de la vitre.

On constate que l'épaisseur de vitrage est inversement proportionnelle au rayonnement solaire le long de l'année de fait que le vitrage joue un rôle important dans l'isolation de la face avant de capteur, on a besoin d'un vitrage de plus de 3 mm d'épaisseur au moins pour contrer les pertes thermiques dans les périodes de froid mais cela va affecter la transmissivité de capteur et engendre une augmentation de poids de capteur. Maintenant, les nouvelles technologies imposent aux constructeurs, la fabrication des capteurs de moins en moins lourds.

10. Amélioration du rendement de chauffe-eau solaire :

Pour optimiser le capteur solaire et améliorer son rendement, il faut diminuer les pertes thermiques dues à la conception de capteur.

a. Contact tube-surface absorbante :

Un mauvais contact de tube de la surface absorbante engendre un mauvais passage des calories vers l'eau à l'intérieur des tubes, la surface absorbante s'échauffe plus et rayonne beaucoup plus vers l'extérieur ce qui augmente les pertes thermiques de fait le rendement. la solution c'est de déformer la plaque absorbante ou on soude les tubes sur toute leurs longueur. Dans les deux cas, on a des solutions compliquées et chères.

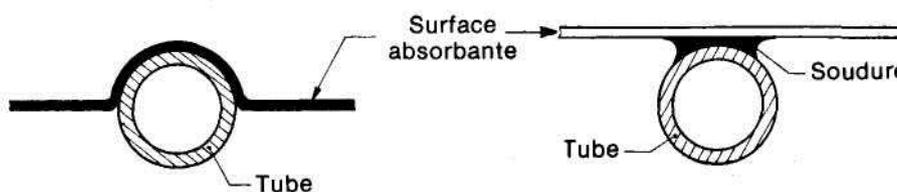


Figure IV.10 : Contact tube-surface absorbante.

b. Couche d'air entre l'absorbeur et l'isolant :

Cette solution permet de diminuer les pertes thermiques par conduction entre la plaque absorbante et la couche d'isolation.

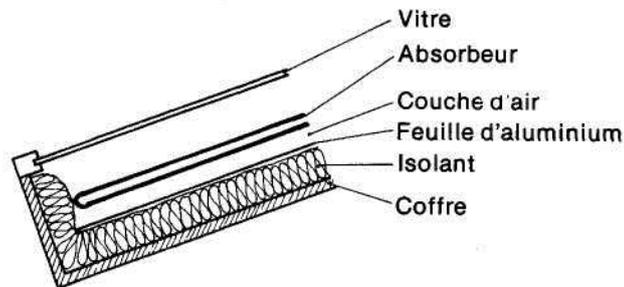


Figure IV.11 : La couche d'air entre l'absorbeur et l'isolant.

c. Couche de peinture :

L'absorbeur est recouvert d'une peinture mate (pour éviter les réflexions) et foncée (pour avoir un bon coefficient d'absorption) comme le Marron, Bleu, Vert, Rouge, Noir de façon à s'approcher le plus possible de corps noir. Les peintures sont en général des matières isolantes ou en tous cas, mauvaises conductrices de la chaleur. La peinture va s'échauffer et rayonnera vers l'extérieur. Plus cette couche est épaisse, plus la chaleur aura de mal à la traverser donc elle devra être la plus mince possible.

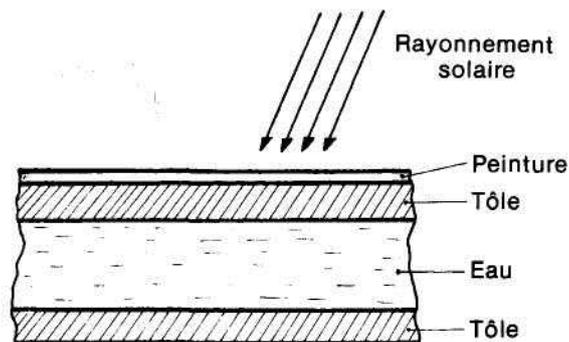


Figure IV.12 : La couche de peinture qui couvre l'absorbeur.

d. Le vitrage :

La vitre limite les pertes par convection et permet l'augmentation de l'effet de serre dans la couche d'air. Elle doit être transparente pour le rayonnement solaire (courtes longueurs d'ondes) et opaque pour le rayonnement infrarouge. La vitre va donc absorber tout le rayonnement émis par l'absorbeur et va rayonner de fait l'absorbeur va recevoir plus de rayonnement.

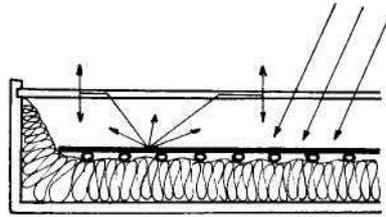


Figure IV.13 : L'influence de vitrage sur les rayons solaires.

On pourrait penser à augmenter le nombre des vitres devant l'absorbeur, et ainsi récupérer chaque fois un peu des pertes par rayonnement de l'absorbeur mais cela diminue la transparence globale de la couverture «transparente». Il faut donc savoir si ce qu'on perd en transparence est compensé par ce qu'on récupère par effet de serre supplémentaire.

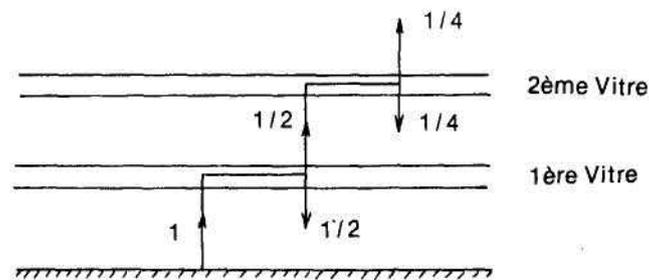


Figure IV.14 : L'influence de double vitrage sur les rayons solaires.

e. Distance entre les tubes :

La distance entre les tubes (w) joue un rôle prépondérant sur les performances des capteurs solaires. La figure illustre l'incidence de cette distance sur le rendement. Sur cette figure, on voit que le rendement diminue quand la distance (w) augmente. On remarque que pour une même épaisseur des absorbeurs et une même distance entre les tubes donnée, le capteur en cuivre permet d'obtenir de meilleures performances. Pour des absorbeurs en aluminium ou en cuivre d'épaisseur 1 mm, une distance entre les tubes comprise entre 150 et 170 mm permet des capteurs performants.

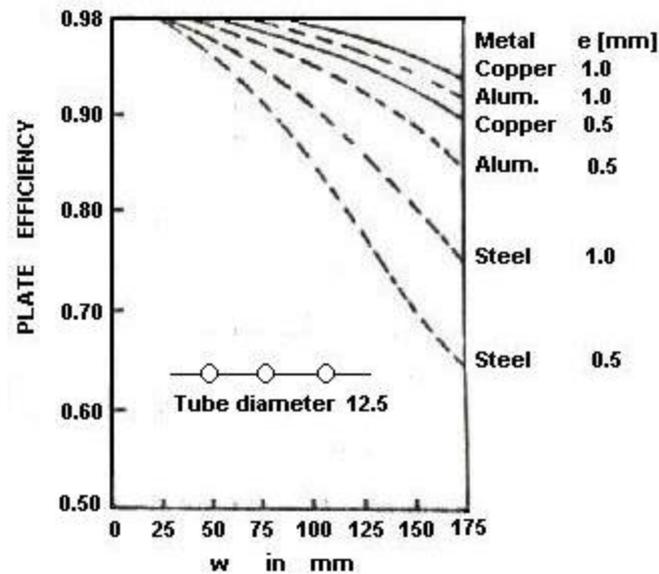


Figure IV.15 : Evolution du rendement des capteurs en fonction de la distance entre les tubes

11. Conclusion :

Au cours de ce chapitre, on a étudié les performances de notre chauffe-eau solaire. D'après les résultats obtenus sur ce dispositif, on remarque que les rendements sont satisfaisants et la production d'eau chaude est suffisante pour l'utilisateur. Ces performances peuvent être améliorées par l'utilisation des surfaces sélectives de captation et d'absorption, le perfectionnement de l'isolation thermique et l'ajout d'un dispositif de commande du système de concentration permettant la diminution des pertes nocturnes.

*Conclusion
Générale*

CONCLUSION GENERALE

Au cours de ce travail, on a étudié les performances de notre chauffe-eau solaire.

D'après les résultats obtenus sur ce dispositif, on remarque que le rendement est satisfaisant et la production d'eau chaude est suffisante pour l'utilisateur durant une grande partie de l'année. Ces performances peuvent être améliorées par l'utilisation des surfaces sélectives de captation et d'absorption, le perfectionnement de l'isolation thermique et l'ajout d'un dispositif de commande du système de concentration permettant la diminution des pertes nocturnes. Mais l'étude de marché impose un rapport qualité prix raisonnable pour assurer une bonne commercialisation de ce produit en Algérie et même pour les pays de voisinage.

Avec ce projet, l'Algérie a fait un grand pas vers le développement et la maîtrise des nouvelles énergies et les nouvelles technologies qui sert a les optimisées. Malgré que le coût du gaz reste moins cher, mais l'objectif consiste à pénétrer ce domaine hautement important à l'avenir qui offre de nouvelles perspectives pour l'industrie et le secteur de la recherche et le développement en Algérie.

*Références
bibliographiques*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **J.A. DUFFIE et W.A. BECKMAN, 2006.** Solar engineering of thermal processes. Editions Wiley&Sons, USA.
- [2] **M. CAPDEROU, 1988.** Atlas solaire de l'Algérie. Edition OPU, Vol1. Tome1.
- [3] **A. MEFTI et M.Y. BOUROUBI, 1999.** Estimation et cartographie de la composante globale du rayonnement solaire. Revue des énergies renouvelables, Numéro spécial. Valorisation, tome 2, pp 219-224.
- [4] **A.Khireddine, K. Benmahammed,2001.** Méthodologie de Correction de Rayonnement Solaire. Rev. Energ. Ren. Vol.4 (2001) 79-87.
- [5] **K. Gairaa et S. Benkaciali, 2008.** Modélisation numérique des irradiations globale et diffuse au site de Ghardaïa. Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 129 – 136.
- [6] **M. Koussa, A. Malek et M. Haddadi, 2006.** Validation de quelques modèles de reconstitution des éclaircissements dus au rayonnement solaire direct, diffus et global par ciel clair. Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°4 (2006) 307-332.
- [7] **HAKEM Sid-Ali, 2010.** Etude stochastique des performances journalière d'un chauffe eau solaire. Thèse magister USTHB.
- [8] **N. KASBADJI, 1986.** Etude théorique et expérimentale des performances instantanées de trois capteurs solaires plans a eau. Thèse de Magister en énergies renouvelables, HCR.
- [9] **N. YOUNSI 1989.** Etude expérimentale d'un capteur solaire plan en régime permanent. Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, Boumèrdes.
- [10] **F. Yettou, A. Malek, M. Haddadi et A. Gama, 2010.** Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 465 – 476 465.
- [11] **B. Chaouachi, S. Gabsi, 2006.** Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire à stockage intégré dans des conditions réelles. Revue des Energies Renouvelables Vol. 9 N°2 (2006) 75-82.

[12] **T. AKEBLERSANE, M. BOUTOUIL, 1984.** Contribution à l'étude des performances thermo hydrauliques d'un chauffe eau solaire, Mémoire de fin d'étude d'ingénieur, ENITA.

[13] **N. RAHNI, 1990.** Estimation des performances a long terme d'un chauffe eau solaire à thermosiphon par la méthode F-chart. Mémoire de fin d'Etude d'ingénieur ENITA.

[14] **Said BENNACEUR, Belkacem DRAOUI et Lyes BENNAMOUN, 2005.** Etude expérimentale d'un chauffe eau solaire à thermosiphon dans la région sud ouest algérien. Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE'2010.

[15] Jacques BERNARD, « énergie solaire, calculs et optimisations », édition Ellipses 2004.

[16] Chenane H. « Calcul d'une installation de chauffage et de production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire », mémoire de fin d'étude UMMTO 2009.

[17] www.google.fr

[18] MOUSSI samir, SEDDIKI madjid, « Système photovoltaïque appliqué au chauffage et rafraichissement d'une maison individuelle », mémoire de fin d'étude UMMTO 2011.

[19] Alain Ricaud, «Gisement-solaire » Master Energies Renouvelables, Université de CERGY-PONTOISE 2011

[20] « Calcul et dimensionnement d'une installation de chauffage et production d'eau chaude sanitaire par énergie solaire d'une maison individuelle type pavillon » Mémoire d'ingénieur UMMTO 2007.

Proposé par : Mr Nait CHABANE. L.

Dirigé par : Mr AIT AIDER.O.Etudié par : SALMI ANISSA et OUMELLAL HOCINE.

[21] Anne Labouret, Michel Viloz « Energie solaire photovoltaïque » édition LE MONITEUR.

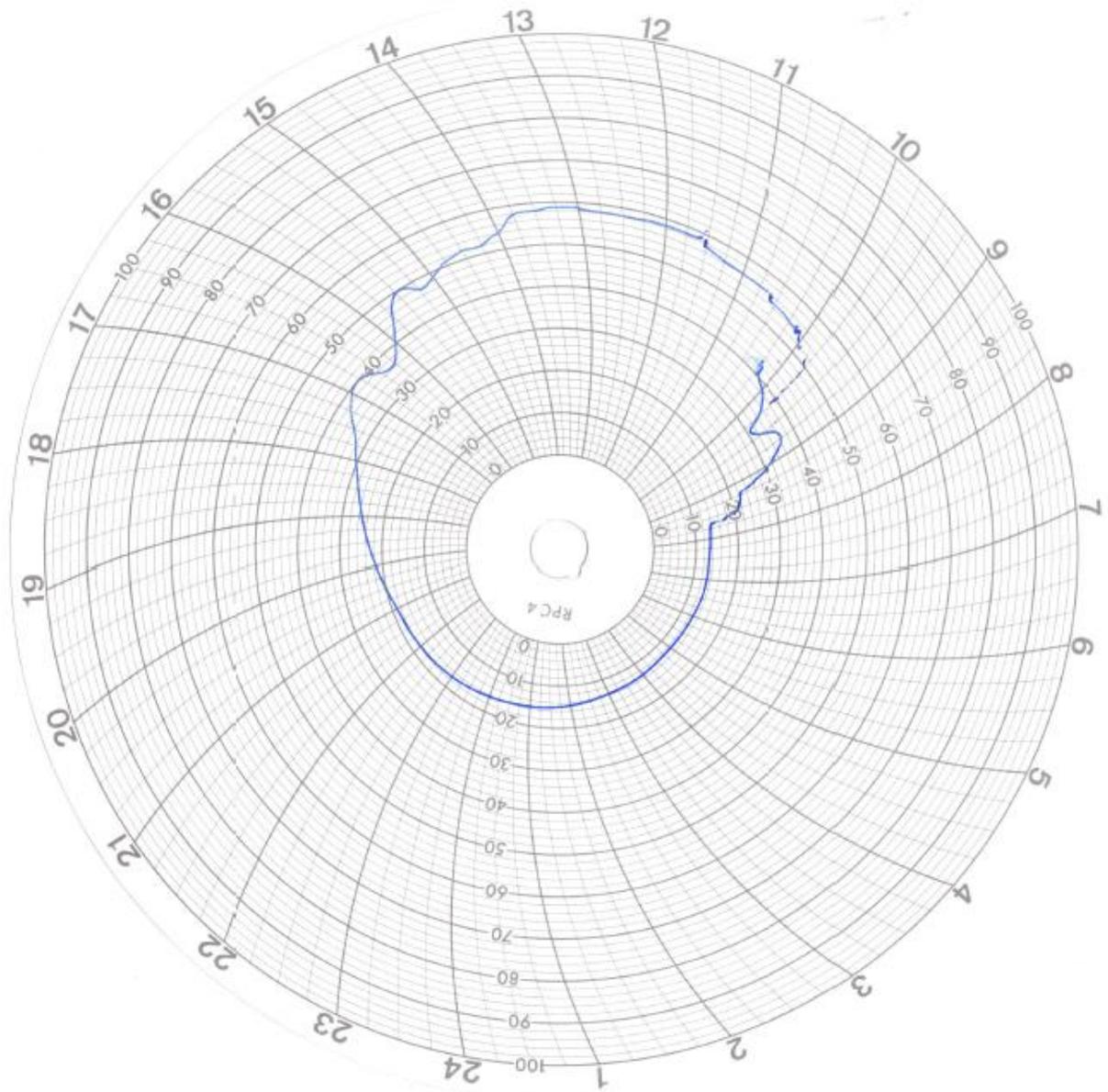
[22] cours de Pascal Tobaly 2002.

Annexes

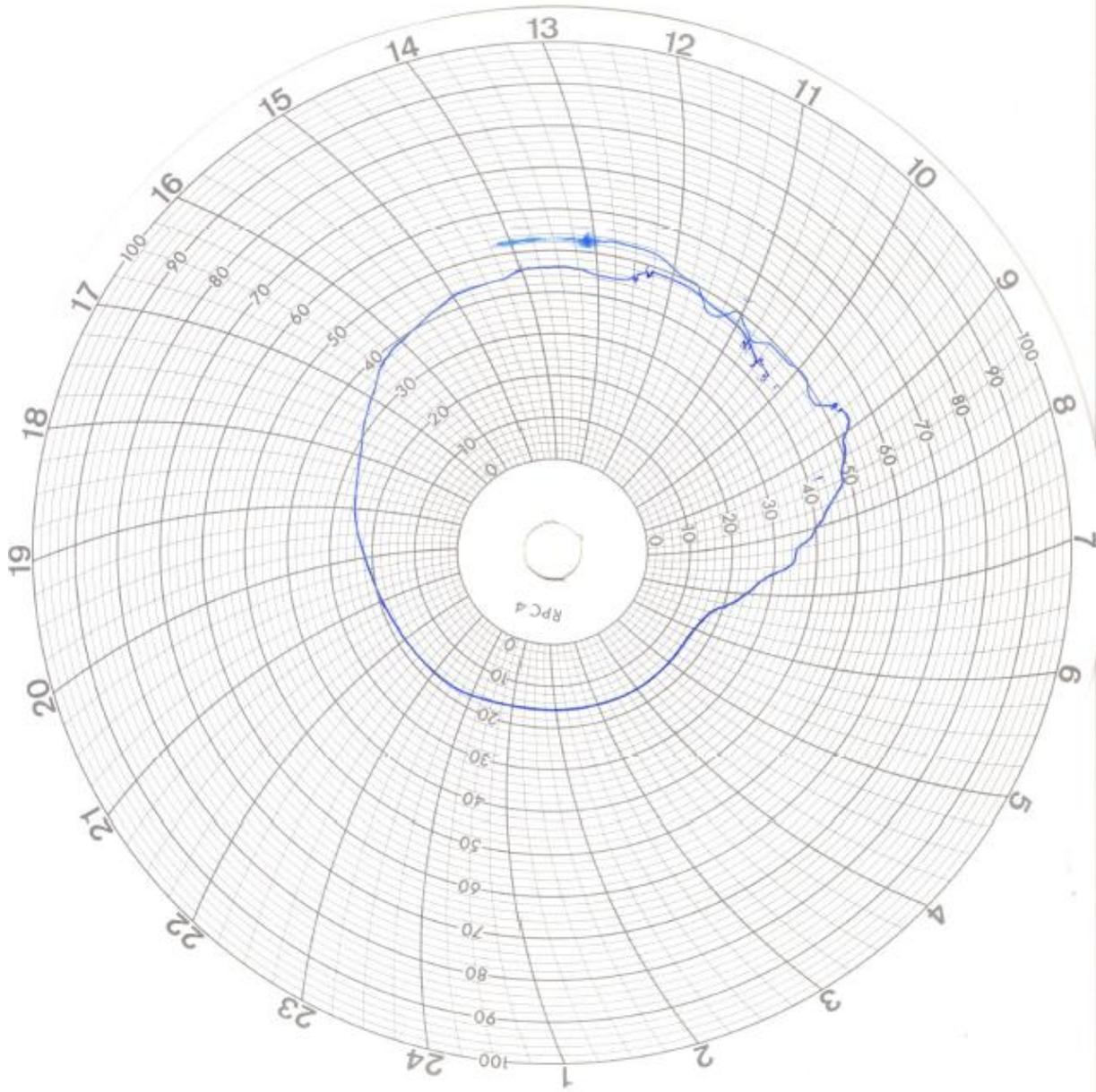
Annexes

Tranche horaire	6-7h	7-8h	8-9h	9-10h	10-11h	11-12h	12-13h	13-14h	14-15h	15-16h	16-17h	17-18h	Total	
JANVIER	Directe S	0	60	173	269	337	372	372	337	269	173	60	0	2 422
	Globale G	0	99	269	410	511	564	564	511	410	269	99	0	3706
	G/Vitre	0	72	218	346	436	483	483	436	346	218	72	0	3110
	G/Vgtp	0,00	70,34	212,99	338,05	425,98	471,90	471,90	425,98	338,05	212,99	70,34	0,00	3038,51
Globale G*	0	177	467	701	867	952	952	867	701	467	177	0	6328	
FEVRIER	Directe S	13	113	242	353	433	474	474	433	353	242	113	13	3256
	Globale G	21	175	360	518	633	694	694	633	518	360	175	21	4802
	G/Vitre	11	127	294	439	542	595	595	542	439	294	127	11	4016
	G/Vgtp	10,75	124,08	287,24	428,91	529,54	581,32	581,32	529,54	428,91	287,24	124,08	10,75	3923,68
Globale G*	36	272	548	781	948	1035	1035	948	781	548	272	36	7240	
MARS	Directe S	33	149	283	399	483	527	527	483	399	283	149	33	3748
	Globale G	58	234	423	587	707	771	771	707	587	423	234	58	5560
	G/Vitre	31	170	347	498	605	661	661	605	498	347	170	31	4624
	G/Vgtp	30,29	166,09	339,02	486,55	591,09	645,80	645,80	591,09	486,55	339,02	166,09	30,29	4517,70
Globale G*	83	333	598	826	991	1078	1078	991	826	598	333	83	7818	
AVRIL	Directe S	43	160	288	399	480	523	523	480	399	288	160	43	3786
	Globale G	88	262	443	600	717	779	779	717	600	443	262	88	5786
	G/Vitre	50	190	362	509	613	667	667	613	509	362	190	50	4788
	G/Vgtp	48,85	185,63	353,68	497,30	598,91	651,67	651,67	598,91	497,30	353,68	185,63	48,85	4672,07
Globale G*	115	356	605	821	979	1063	1063	979	821	605	356	115	7884	
MAI	Directe S	53	184	324	446	535	582	582	535	446	324	184	53	4248
	Globale G	107	286	472	635	756	821	821	756	635	472	286	107	6182
	G/Vitre	60	204	383	537	647	704	704	647	537	383	204	60	5092
	G/Vgtp	58,62	199,31	374,20	524,66	632,13	687,82	687,82	632,13	524,66	374,20	199,31	58,62	4953,45
Globale G*	127	352	582	782	930	1008	1008	930	782	582	352	127	7590	
JUIN	Directe S	51	177	310	427	512	557	557	512	427	310	177	51	4068
	Globale G	110	280	456	611	727	789	789	727	611	456	280	110	5988
	G/Vitre	62	198	368	515	621	676	676	621	515	368	198	62	4914
	G/Vgtp	60,57	193,45	359,54	503,16	606,72	660,46	660,46	606,72	503,16	359,54	193,45	60,57	4767,82
Globale G*	129	342	560	751	892	967	967	892	751	560	342	129	7326	
JUILLET	Directe S	55	192	341	471	567	617	617	567	471	341	192	55	4486
	Globale G	107	287	476	643	768	835	835	768	643	476	287	107	6266
	G/Vitre	59	203	385	544	657	717	717	657	544	385	203	59	5156
	G/Vgtp	57,64	198,33	376,15	531,49	641,90	700,52	700,52	641,90	531,49	376,15	198,33	57,64	5012,07
Globale G*	126	337	555	747	888	964	964	888	747	555	337	126	7274	
AOÛT	Directe S	52	197	358	500	605	660	660	605	500	358	197	52	4744
	Globale G	96	285	487	667	802	873	873	802	667	487	285	96	6434
	G/Vitre	52	204	398	567	688	751	751	688	567	398	204	52	5330
	G/Vgtp	50,80	199,31	388,85	553,97	672,18	733,74	733,74	672,18	553,97	388,85	199,31	50,80	5197,70
Globale G*	115	334	564	766	916	995	995	916	766	564	334	115	7396	
SEPTEMBRE	Directe S	39	172	329	470	573	627	627	573	470	329	172	39	4420
	Globale G	69	252	456	636	770	841	841	770	636	456	252	69	6050
	G/Vitre	37	183	374	542	661	724	724	661	542	374	183	37	5044
	G/Vgtp	36,15	178,79	365,40	529,54	645,80	707,36	707,36	645,80	529,54	365,40	178,79	36,15	4926,09
Globale G*	87	315	559	774	931	1015	1015	931	774	559	315	87	7364	
OCTOBRE	Directe S	16	119	256	378	466	513	513	466	378	256	119	16	3496
	Globale G	29	185	372	537	658	722	722	658	537	372	185	29	5006
	G/Vitre	16	135	306	456	564	619	619	564	456	306	135	16	4192
	G/Vgtp	15,63	131,90	298,97	445,52	551,03	604,77	604,77	551,03	445,52	298,97	131,90	15,63	4095,63
Globale G*	43	265	522	745	907	992	992	907	745	522	265	43	6948	
NOVEMBRE	Directe S	3	68	182	284	357	395	395	357	284	182	68	3	2578
	Globale G	5	113	281	425	530	585	585	530	425	281	113	5	3878
	G/Vitre	3	82	228	360	453	501	501	453	360	228	82	3	3254
	G/Vgtp	2,93	80,11	222,76	351,72	442,59	489,48	489,48	442,59	351,72	222,76	80,11	2,93	3179,20
Globale G*	10	191	460	689	852	933	933	852	689	460	191	10	6278	
DECEMBRE	Directe S	0	48	160	259	329	365	365	329	259	160	48	0	2322
	Globale G	0	80	246	387	489	542	542	489	387	246	80	0	3488
	G/Vitre	0	58	199	327	417	464	464	417	327	199	58	0	2930
	G/Vgtp	0,00	56,67	194,43	319,48	407,41	453,33	453,33	407,41	319,48	194,43	56,67	0,00	2862,64
Globale G*	0	144	423	655	819	904	904	819	655	423	144	0	5890	

Energie (en wh/m2) incidente sur le plan SUD / Inclin=Latit par tranche horaire pour la région d'Alger



Enregistrement de température de la lame d'air pour la journée de 13/06/2012.



Enregistrement de température de la lame d'air pour la journée de 14/06/2012.

Année	Janv	Fevr	Mar	Avri	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Octo	Nov	Dec	Annuel
1995	9.2	8.2	9.4	9.0	9.7	10.3	9.8	9.4	9.6	7.7	9.6	9.5	9.3
1996	11.0	12.0	9.8	10.2	9.4	8.9	10.1	9.0	9.6	7.7	9.1	9.8	9.7
1997	10.0	7.0	8.3	9.2	9.1	9.8	10.3	10.8	9.9	10.1	11.7	8.8	9.6
1998	9.6	8.1	8.2	10.6	10.2	9.6	9.7	10.2	11.8	9.4	9.7	8.1	9.6
1999	9.2	9.9	10.8	9.5	10.8	11.2	10.4	9.9	10.3	10.2	10.5	12.6	10.4
2000	8.3	9.9	10.5	15.8	11.4	12.2	12.5	13.0	13.5	12.4	14.3	13.4	12.2
2001	13.1	11.3	11.8	11.9	11.8	12.8	12.2	10.6	11.7	10.0	10.5	7.3	11.2
2002	8.5	9.1	11.6	11.4	12.3	11.9	11.1	10.3	11.1	10.5	12.3	10.6	10.9
2003	12.9	10.8	8.3	9.5	9.2	10.6	10.2	9.2	8.4	7.6	9.6	10.4	9.7
2004	9.2	9.0	9.2	10.8	9.9	8.9	8.8	10.1	8.6	8.0	7.8	9.7	9.2
Moy	10.1	9.5	9.8	10.8	10.4	10.6	10.5	10.2	10.4	9.4	10.5	10.0	10.2

Moyenne mensuelle des vitesses du vent en m/s pour la région d'Alger

Année	Janv	Fevr	Mar	Avri	Mai	Juin	Juil	Aou	Sept	Oct	Nov	Dec	Annuel
1995	16.2	19.3	18.7	20.9	26.0	27.2	31.3	31.9	28.2	26.9	23.2	19.7	24.2
1996	19.1	15.6	18.9	20.4	23.3	26.7	30.8	31.1	27.2	23.1	21.2	19.2	23.1
1997	18.2	18.8	19.7	22.1	25.0	29.1	28.9	31.5	29.8	26.9	21.0	18.4	24.2
1998	17.9	18.8	19.7	21.5	23.0	27.9	31.5	32.0	30.5	24.7	20.4	17.1	23.8
1999	16.9	15.4	19.4	22.5	26.6	29.0	32.1	33.3	30.3	28.0	18.8	16.9	24.2
2000	16.2	19.1	20.3	23.0	25.8	28.4	32.2	33.9	29.4	24.9	21.7	19.9	24.6
2001	18.8	17.8	24.1	22.8	24.7	32.1	32.3	33.2	29.7	28.9	19.4	16.5	25.1
2002	17.8	18.6	21.3	22.1	26.6	29.7	30.6	30.8	29.7	26.8	21.6	19.4	24.6
2003	15.5	15.7	20.1	21.6	24.6	32.2	34.0	34.8	29.9	25.7	21.6	17.0	24.5
2004	17.4	18.4	18.4	21.3	21.9	28.9	31.1	33.7	31.7	29.3	19.8	17.5	24.1
Moy	17.4	17.7	20.1	21.8	24.7	29.1	31.5	32.6	29.6	26.5	20.9	18.2	24.2

Moyenne mensuelle des températures en °c pour la région d'Alger