



Université de Ghardaïa

N° d'ordre :
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies
Département d'automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Domaine : *Sciences et Technologies*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables en Electrotechnique*

Par : BAKOU Chiekh et ELMEGBED Abderrahmane

Thème

**Conception et développement d'un programme
de dimensionnement des systèmes de production
d'eau chaude solaire**

Soutenu publiquement le 30/06/2019

Devant le jury :

BOUARAOUR Kamel	Maître de Conférences A	Univ. Ghardaïa	Président
AKERMI Fouzi	Maître de Assistant A	Univ. Ghardaïa	Examineur
AISSAOUI Faris	Maître de Assistant B	Univ. Ghardaïa	Examineur
YETTOU Fatiha	Maître de Recherche A	URAER. Ghardaïa	Encadreur
BEN CHEIKH EL HOCINE Hanane	Maître de Recherche B	URAER. Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2018/2019

REMERCIEMENTS

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

*« Avant de présenter ce travail, nous tenons à remercier **Allah** le tout puissant pour nous avoir donné beaucoup de patience et de courage pour réaliser ce travail »*

*« En premier lieu, nous remercierons Dr **YETTOU Fatiha**, Maitre de Recherche A à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa, en tant qu'encadreur de notre mémoire, d'avoir proposé un sujet très intéressant et pour ses conseils, sa disponibilité et pour nos avoir fait profiter de sa connaissances et de sa qualité tant professionnelle qu'humaine »*

*« On tient à remercier Dr **BEN CHEIKH EL HOCINE Hanane** et Dr **GAMA Amor** pour l'aide qu'ils ont fournis et les connaissances qu'ils ont su nous transmettre. Nous les remercierons également pour leur disponibilité et la qualité de leur conseils »*

*« Nos respectueux remerciements à l'ensemble des **membres du jury** pour l'intérêt porté à notre travail »*

*« Nous remercierons également le Directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER, Ghardaïa), Dr **DJAFER Djelloul** ; qui nous a permis de réaliser ce travail au sein de l'URAER »*

Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

{ رَبِّ أَوْزَعْنِي أَنْ أَشْكُرَ نِعْمَتَكَ الَّتِي أَنْعَمْتَ عَلَيَّ وَعَلَىٰ وَالِدَيَّ وَأَنْ أَعْمَلَ صَالِحًا تَرْضَاهُ وَأُدْخِلْنِي بِرَحْمَتِكَ فِي عِبَادِكَ الصَّالِحِينَ }

Je dédie ce modeste travail

A mes chers parents

A mes frères et mes sœurs

A tous ma famille

A tous mes collègues et mes amis partout

BAKOU Chiekh

DEDICACE

Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes frères

A mes sœurs

A mes grandes familles

Aux chers amis

A tous ce que j'aime et qui m'aiment

A tous mes collègues d'études

EL MEGBED Abderrahmane

RESUME

Ces dernières années, beaucoup de pays se tournent vers une bonne exploitation des énergies renouvelables. L'énergie solaire est l'énergie la plus prometteuse, largement disponibles en Algérie.

Ce travail consiste à étudier le dimensionnement de chauffe-eau solaires individuels en élaborant un programme basé sur l'utilisation d'une base de données des capteurs plans et, puisque appliqué à l'Algérie, une modélisation de l'éclairement solaire du pays. L'utilisation de modèles d'estimation de rayonnement solaire reste pratiquement l'un des seuls moyens pour pallier à la rareté des stations radiométriques sur le territoire national. Le programme sera réalisé et programmer à l'aide du langage Matlab et le dimensionnement est effectué en utilisant la méthode *f-Chart*. D'autres paramètres seront nécessaire au programme tell que la température ambiante et la température d'eau froide. Le test de ce logiciel est indispensable et le relever des résultats est nécessaire pour la validation du travail sur plusieurs villes de l'Algérie.

Mots clés: énergies renouvelables, énergie solaire, chauffe-eau solaire, rayonnement solaire, modèle Capderou, méthode *f-Chart*.

LISTE DES FIGURES

Figure I.1	Structure de soleil.	05
Figure I.2	Mouvements de la Terre autour du Soleil.	06
Figure I.3	Système solaire.	08
Figure I.4	Les coordonnées terrestre	09
Figure I.5	Variation de l'équation du temps en fonction du jour.	10
Figure I.6	Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour	12
Figure I.7	Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).	13
Figure I.8	Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.	13
Figure I.9	L'azimut solaire et Hauteur du soleil.	14
Figure I.10	Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.	15
Figure I.11	Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.	16
Figure I.12	Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.	17
Figure I.13	La répartition spectrale du rayonnement solaire.	18
Figure I.14	Conversion de l'énergie cinétique du vent.	19
Figure I.15	Le Pyrhéliomètre (direct).	21
Figure I.16	Le Pyranomètre (diffus).	22
Figure I.17	Albédo mètre (réfléchi).	22
Figure I.18	Pyranomètre (direct+diffus+albédo).	23
Figure I.19	Héliographe (durée d'insolation).	24
Figure I.20	Rayonnement solaire extraterrestre.	25
Figure I.21	Variation du rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour.	26
Figure I.22	Variations de l'éclairement direct, diffus et global un plan horizontal.	28
Figure I.23	Variations de l'éclairement direct, diffus et global un plan incliné.	30
Figure I.24	Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): (a) site de Tamanrasset; (b) site de Ghardaïa.	31
Figure I.25	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.	32
Figure I.26	Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.	32
Figure II.1	Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire.	35
Figure II.2	Schéma de principe CES du monobloc.	36
Figure II.3	Le chauffe-eau solaire thermosiphon.	37
Figure II.4	Le chauffe-eau solaire à circulation forcée.	38
Figure II.5	La cuve de stockage avec échangeur.	40
Figure II.6	Capteur sous vide.	42
Figure II.7	Le capteur plan sans vitrage.	43
Figure II.8	d'un capteur thermique avec ses différents éléments de construction	44

LISTE DES FIGURES

Figure II.9	L'appoint électrique.	44
Figure II.10	L'appoint intégré hydraulique.	46
Figure II.11	L'appoint séparé.	47
Figure II.12	L'appoint en série.	47
Figure II.13	F-Chart pour les systèmes utilisant un liquide pour le transfert de la chaleur.	53
Figure III.1.	Organigramme général du programme de dimensionnement.	62
Figure III.2.	Fenêtres de dialogues du programme « S ^{OL} Dz ».	65
Figure III.3.	Fenêtre de présentation du programme « S ^{OL} Dz »,	65
Figure III.4.	Fenêtre de calcul du rayonnement 'S ^{OL} Dz'.	66
Figure III.5.	Fenêtre comparaison entre paramètres du programme 'S ^{OL} Dz'.	67
Figure III.6.	Fenêtre permettant d'afficher la comparaison entre les données des site	67
Figure III.7.	Fenêtre de dimensionnement du programme 'S ^{OL} Dz'.	68
Figure III.8.	Fenêtre des résultats de dimensionnement du programme 'S ^{OL} Dz'.	69
Figure III.9 .	Résultats obtenus pour le dimensionnement d'un CESI réalisé par 'S ^{OL} Dz' (ville Ghardaïa).	70
Figure III.10	La différence entre énergie reçue sur plan incliné et plan horizontal pour le site de Ghardaïa.	72
Figure III.11	Effet de l'inclinaison du plan sur l'énergie solaire reçue.	73
Figure III.12	Comparaison des résultats obtenus concernant l'éclairement solaire entre 'S ^{OL} Dz' et RETScreen pour le site Ghardaïa.	83
Figure III.13	Comparaison des résultats obtenus concernant la température moyenne mensuelle entre 'S ^{OL} Dz' et RETScreen pour le site Ghardaïa.	84
Figure III.14	Comparaison des résultats concernant la couverture solaire et rendement du système solaire en utilisant le capteur (Vitré) Sun Vescal sur le site de Ghardaïa.	84
Figure III.15	Illustration des résultats la couverture solaire et du rendement du système solaire en utilisant le logiciel 'RETscreen' (capteur Vitré Sun Vescal) de site Ghardaïa.	85
Figure III.16	Illustration des résultats de la couverture solaire et du rendement du système solaire en utilisant le programme 'S ^{OL} Dz' (capteur Vitré Sun Vescal) de site Ghardaïa.	
Figure III.1.	Résultats obtenus pour le dimensionnement d'un CESI réalisé par 'S ^{OL} Dz' (ville Ghardaïa).	85

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	7
Tableau I.2	Valeurs d'albédo selon différents types de sol.	20
Tableau II.1	Avantages et Inconvénients le chauffe-eau solaire Monobloc.	36
Tableau II.2	Avantages et Inconvénients le chauffe-eau solaire thermosiphon.	38
Tableau II.3	Avantages et Inconvénients le chauffe-eau solaire à circulation forcée.	39
Tableau III.1	boutons de base du logiciel « S☀l Dz ».	64
Tableau III.2	Liste des sites Algérien utilisés pour les tests.	70
Tableau III.3	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec le modèle de calcul de l'éclairement solaire.	76
Tableau III.4	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec différents angles d'inclinaisons des capteurs plans solaires.	77
Tableau III.5	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec fraction hivernale et différents angles d'inclinaisons.	78
Tableau III.6	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec variation du nombre de personnes.	79
Tableau III.7	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI selon différents volumes du ballon de stockage.	80
Tableau III.8	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI pour différentes températures d'eau chaude.	81
Tableau III.9	Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI pour différents types de capteurs plans.	82

NOMENCLATURE

Symbole	Description	Unité
λ	Longitude du lieu	Degrés
φ	Latitude du lieu	Degrés
TSV	Temps solaire vrai	Heure
TSM	Temps solaire moyen	Heure
t	Temps local	Heure
ET	Equation de temps	Heure
N'	Angle journalier	Degrés
N	Numéro du jour	[-]
TU	Temps universel	Heure
DE	Décalage horaire	Heure
L	Point de latitude	Degrés
TL	Temps légal	Heure
C ₁	Décalage horaire par rapport au Greenwich	Heure
C ₂	l'heure d'été et d'hiver	Heure
δ	Déclinaison solaire	Degrés
d_j	Durée du jour	Heure
ω	Angle horaire	Degrés
ID	Rayonnement diffus	W/m ²
IB	Rayonnement direct	W/m ²
IG	Rayonnement global	W/m ²
γ_s	Hauteur du soleil	Degrés
χ_s	Azimut du soleil	Degrés
θ_z	Angle zénithal	Degrés
β	Inclinaison du plan	Degrés
α_z	L'orientation du plan	Degrés
m _A	Masse d'air	[-]
m _A	Masse d'air	[-]
δ_R	Epaisseur totale optique de Rayleigh	[-]
T _L	Facteur de trouble total de Linke	[-]
T ₀	Trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau	[-]
T ₁	Trouble du à la diffusion moléculaire	[-]
T ₂	Trouble relatif à la diffusion par les aérosols	[-]
G ₀	Eclairement solaire extraterrestre	W/m ²
ε	Correction de distance terre soleil	[-]

I_0	Constante solaire	W/m^2
IB_h	Eclairement direct incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m^2
T'_L	Facteur de trouble diffusif	[-]
α_z	l'Azimut de la normal du plan	W/m^2
IG_h	Eclairement global incident sur un plan horizontal par Capderou	W/m^2
IN	Eclairement direct normal incident sur un plan horizontal	W/m^2
δ^h	Composante du cercle de l'horizon donnée par Capderou	[-]
δ^a	Composante due à l'albédo donnée par Capderou	[-]
ρ	Albédo du sol	[-]
δ^d	Composante directe donnée par Capderou	[-]
δ^i	Composante isotrope du ciel donnée par Capderou	[-]
$\delta^{i'}$	Composante due à la rétrodiffusion donnée par Capderou	[-]
ID_i^a	Composante du diffus isotrope du sol donnée par Capderou	W/m^2
ID_i^i	Composante du diffus isotrope du ciel donnée par Capderou	W/m^2
ID_h	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	W/m^2
ID_i^d	Composante diffus directionnel donnée par Capderou	W/m^2
ID_i^h	Composante du diffus du cercle de l'horizon donnée par Capderou	W/m^2
ID_i^{ciel}	Composante du diffus du ciel donnée par Capderou	W/m^2
ID_i	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m^2
IG_i	Eclairement global incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m^2
IB_i	Eclairement direct incident sur un plan quelconque par Capderou	W/m^2
γ	Hauteur de la normal du plan	Degrés
N_p	Angle journalier donné par r.sun	rad
δ^i	Angle d'incidence	rad
T_{min}	Température minimale d'eau froide	K
T_{max}	Température maximale d'eau froide	K
T_m	Température d'eau froide	K
T_w	Température d'eau chaude	K
T_{ref}	Valeur de température empirique de référence	K
h	Coefficient égal à (+1) en l'hémisphère Nord et (-1) au Sud	[-]
M	Numéro du mois considéré	[-]
N_m	Nombre de jours dans le mois	[-]
C_p	Pouvoir ou capacité calorifique de l'eau = 4190	J/kg°C
ρ	Masse volumique d'eau	kg/L
V	Volume d'eau chaude à soutirer	Litre
V_r	Volume réel de stockage	Litre
V_s	Volume standard de stockage	Litre
S_{cap}	Surface théorique des capteurs solaires	m^2
L_{pd}	Besoins en chauffage incluant le degré annuel d'utilisation du système et les pertes en circulation	kWh
S_{opt}	Surface réelle (optimale) des capteurs plans solaires	m^2
X	Nombre reliant les pertes dans le capteur plan et la charge	[-]
Y	Nombre reliant l'énergie solaire absorbée et la charge	[-]

X_c	Facteur correctif du nombre X (volume de stockage)	[-]
X_{cc}	Facteur correctif du nombre X (température d'eau froide)	[-]
A_c	Surface des capteurs solaires plans	m ²
$\frac{R}{R_y}$	Moyenne mensuelle de l'éclairement solaire incident quotidien dans le plan des capteurs /m ²	W/m ²
F'_R	Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire	[-]
F'_R / F_R	Fonction du rendement de l'échangeur d'un capteur plan	[-]
$F_R U_L$	Caractéristique $F_R U_L$ d'un capteur plan spécifié par le constructeur	[-]
$F_R (\tau\alpha)_n$	Caractéristique $F_R (\tau\alpha)_n$ d'un capteur plan spécifié par le constructeur	[-]
$(\tau\alpha)_n$	Propriété transmission-absorption sous incidence normale	[-]
$(\overline{\tau\alpha})$	Moyenne mensuelle du produit de la transmissivité et de l'absorptivité du capteur	[-]
$(\overline{\tau\alpha}) / (\tau\alpha)_n$	Propriété $(\tau\alpha)$ moyenne rapporté à sa valeur sous incidence normale	[-]
ε_{ch}	Rendement de l'échangeur d'un capteur plan	%
f	Fraction de la charge totale mensuelle couverte par le CES	[-]
F	Taux de recouvrement de la charge annuelle	[-]
L	Quantité d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude	kWh
fL	Apport en énergie solaire produit par le CES	kWh
fP	Appoint en énergie auxiliaire (gaz ou électricité) requis par le CES	kWh
η_{CES}	Rendement du chauffe-eau solaire	%
EG_{an}^i	Energie annuelle reçue par un capteur plan incliné	(kWh/m ²)

TABLE DES MATIERES

RESUME

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAUX

NOMENCLATURE

INTRODUCTION GENERALE

01

CHAPITRE I : ENERGIE ET ECLAIREMENT SOLAIRE

I.1.	Introduction	03
I.2.	Les énergies renouvelables et l'énergie solaire	03
I.2.1.	Les énergies renouvelables	03
I.2.1.1.	Définition	03
I.2.1.2.	Importance des énergies renouvelable	04
I.2.2.	Energie solaire	05
I.2.2.1.	Le soleil	05
I.2.2.2.	Définition	05
I.2.2.3.	Mouvement de la terre autour du soleil	06
I.2.2.4.	Les applications de l'énergie solaire	07
I.3.	Paramètres géométriques et atmosphériques	08
I.3.1.	Paramètres géographiques	08
I.3.1.1.	La latitude	08
I.3.1.2.	La longitude	08
I.3.1.3.	La longitude	09
I.3.2.	Paramètres horaires	09
I.3.2.1.	Temps solaire	09
I.3.2.2.	Temps solaire vrai	09
I.3.2.3.	Equation du temps	10
I.3.2.4.	Le temps universel	10
I.3.2.5.	Temps légal	10
I.3.2.6.	La durée du jour	11
I.3.2.7.	Angle horaire	11
I.3.2.8.	Déclinaison solaire	11
I.3.3.	Paramètres de position	12
I.3.3.1.	Hauteur du soleil	13
I.3.3.2.	Azimut du soleil	14
I.3.4.	Paramètres de l'atmosphère	15
I.3.4.1.	Masse atmosphérique	15

SOMMAIRE

I.3.4.2.	Epaisseur optique de l'atmosphère	16
I.3.4.3.	Facteur de trouble de Linke	17
I.4.	Le rayonnement solaire	18
I.4.1.	Composantes du rayonnement solaire	19
I.4.1.1.	Le Rayonnement direct (IB)	19
I.4.1.2.	Le rayonnement diffus (ID)	19
I.4.1.3.	Le rayonnement réfléchi (IR)	19
I.4.1.4.	Le rayonnement global (IG)	20
I.4.2.	Mesure du rayonnement solaire	20
I.4.2.1.	Mesure du rayonnement direct (le Pyrhéliomètre)	21
I.4.2.2.	Mesure du rayonnement diffus (le Pyranomètre)	21
I.4.2.3.	Mesure du rayonnement solaire réfléchi (Albédo mètre)	22
I.4.2.4.	Mesure du rayonnement global (Pyranomètre)	23
I.4.2.5.	Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)	23
I.5.	Présentation du Modèle Capderou	24
I.5.1.	Modélisation par le modèle de Capderou	24
I.5.1.1.	Constante solaire	24
I.5.1.2.	Eclairement hors atmosphère	25
I.5.1.3.	Angle d'incidence	26
I.5.2.	Estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal	27
I.5.2.1.	Eclairement global incident sur un plan horizontal	27
I.5.2.2.	Eclairement direct incident sur un plan horizontal	27
I.5.2.3.	Eclairement diffus incident sur un plan horizontal	27
I.5.3.	Estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan quelconque	28
I.5.3.1.	Eclairement global incident sur un plan quelconque	28
I.5.3.2.	Eclairement direct incident sur un plan quelconque	28
I.5.3.3.	Eclairement diffus incident sur un plan quelconque	28
I.6.	Validation de la partie de modélisation de l'éclairement solaire	31
I.6.1.	Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire pour deux régions de l'Algérie	31
I.6.2.	Validation et discussion des résultats	31
I.7.	Conclusion	33

CHAPITRE II : LES SYSTEMES DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SOLAIRE (CES)

II.1.	Introduction	34
II.2.	Le chauffe-eau solaire	34
II.2.1.	Définition	34
II.2.2.	Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire	35
II.2.3.	Type des chauffe-eau solaires	36
II.2.3.1.	Le chauffe-eau solaire Monobloc	36
II.2.3.2.	Le chauffe-eau solaire Thermosiphon	37
II.2.3.3.	Le chauffe-eau solaire à circulation forcée	38
II.3.	Les composants d'un chauffe-eau solaire	39
II.3.1.	Le capteur plan solaire	39

SOMMAIRE

II.3.2.	La cuve de stockage	39
II.3.3.	Le groupe de transfert	40
II.4.	Les types de capteurs solaires	41
II.4.1.	Le capteur plan vitré	41
II.4.2.	Le capteur sous vide	41
II.4.3.	Le capteur plan sans vitrage	42
II.4.4.	Description d'un capteur	43
II.5.	L'appoint énergétique	44
II.5.1.	L'appoint intégré	44
II.5.1.1.	Appoint intégré électrique	44
II.5.1.2.	Appoint intégré hydraulique	45
II.5.1.3.	Appoint intégré mixte (électrique et hydraulique)	46
II.5.2.	L'appoint séparé	46
II.5.3.	L'appoint en série	47
II.6.	Dimensionnement des chauffe-eau solaires (Méthode <i>f</i>-Chart)	47
II.6.1.	Calculs préliminaires	48
II.6.1.1.	Estimation de la température d'eau froide	48
II.6.1.2.	Estimation du volume de stockage	49
II.6.1.3.	Estimation des besoins en chauffage de l'eau	49
II.6.1.4.	Estimation de la surface et du nombre des capteurs solaires	50
II.6.2.	Description de la méthode <i>f</i> -Chart	51
II.6.2.1.	Calcul des variables X et Y	51
II.6.2.2.	Calcul des variables X corrigés	52
II.6.2.3.	Calcul de la fraction solaire <i>f</i>	53
II.6.3.	Résultats de la méthode <i>f</i> -Chart	53
II.6.3.1.	Calcul de l'apport solaire	53
II.6.3.2.	Calcul de l'énergie d'appoint	54
II.6.3.3.	Calcul du taux de recouvrement de la charge annuel	54
II.6.3.4.	Calcul du rendement du chauffe-eau solaire	54
II.7.	Conclusion	55

CHAPITRE III : PROGRAMME DE DIMENSIONNEMENT REALISE, RESULTATS ET DISCUSSION

III.1.	Introduction	56
III.2.	Réalisation d'un programme de dimensionnement des chauffe-eau solaires	56
III.2.1.	Organigramme du programme 'S☀I Dz'	56
III.2.2.	Description du programme 'S☀I Dz'	63
III.2.3.	Présentation du programme 'S☀I Dz'	63
III.2.3.1.	Boutons de base du programme 'S☀I Dz'	63
III.2.3.2.	Les fenêtres de dialogues du programme 'S☀I Dz'	64
III.2.3.3.	Fenêtre de présentation du programme 'S☀I Dz'	65
III.2.3.4.	Fenêtre de calcul du rayonnement solaire	65
III.2.3.5.	Fenêtre de dimensionnement des CES	68
III.2.3.6.	Fenêtre des résultats	69
III.3.	Tests établis et discussions des résultats	69

SOMMAIRE

III.3.1.	Tests sur la quantité d'énergie reçue sur le plan des capteurs	71
III.3.2.	Tests sur l'angle d'inclinaison des capteurs	72
III.3.3.	Tests sur le nombre d'unités	73
III.3.4.	Tests sur le volume de stockage	74
III.3.5.	Tests sur la température d'eau chaude	74
III.3.6.	Tests sur différents types de capteurs plans	75
III.4.	Validation des résultats	83
III.4.1.	Résultats obtenus et validation	83
III.4.2.	Discussions et interprétation des résultats	86
III.5.	Conclusion	86
 CONCLUSION GENERALE		 87
 BIBLIOGRAPHIE		

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est aujourd'hui un concept important, mais souvent trop simplifié. Tout le monde en parle, mais l'approche reste souvent liée à l'actualité. Pourtant, l'énergie est le moteur de la vie et du développement technologique. Le niveau de consommation de l'énergie, les ressources valorisées et les technologies utilisées sont liés étroitement à l'histoire de l'humanité et détermine son avenir. L'énergie concerne chacun de nous, vu que chacun est au minimum un consommateur, et il est de notre devoir de mieux la connaître pour mieux la valoriser. L'homme a apprivoisé le feu, l'eau coulant, le vent et les animaux pour économiser ses propres efforts. Cependant avec la découverte des énergies fossiles, on a assisté à un réel détour dans l'histoire humaine accompagné d'une véritable révolution technologique.

L'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à des sources d'énergie renouvelables au premier rang desquelles l'énergie solaire. Les principales caractéristiques de l'énergie solaire ayant suscité l'intérêt qu'on lui a porté à l'époque étaient sa gratuité, sa disponibilité sur une grande partie du globe terrestre et l'absence de risque d'épuisement connu par les sources d'énergie fossile. Le développement de l'utilisation de l'énergie solaire sera lié non seulement à ses avantages économiques (qui grandiront au fur et à mesure que les réserves d'énergie fossile diminueront) mais surtout à des considérations liées à la protection de l'environnement : pas de rejets polluants, pas de danger radioactif et de déchets encombrants (centrales nucléaires), possibilité de limitation de l'emploi des CFC (production de froid solaire par adsorption). Les énergies renouvelables, notamment solaires, sont de plus en plus sollicitées pour contribuer à la satisfaction des besoins en énergie du milieu rural.

Le facteur de trouble atmosphérique de Linke est une approximation très commode pour modeler l'absorption et la dispersion atmosphérique du rayonnement extraterrestre. Ce facteur décrit l'épaisseur optique de l'atmosphère due à l'absorption par la vapeur d'eau et l'absorption et la dispersion par les particules d'aérosol. Le facteur de trouble atmosphérique de Linke (TL) peut être adopté pour estimer le rayonnement solaire dans le Sahara de l'Algérie à cause de la faible concentration des nuages dans ces zones, on peut obtenir ce facteur à partir de la formule empirique développée par Capderou. Dans ce travail nous nous sommes proposé de

réaliser un programme « S^ol Dz » de dimensionnement des chauffe-eau solaires en utilisant le langage MATLAB, basé sur le modèle empirique de Capderou pour modéliser le rayonnement solaire pour différentes inclinaisons et orientations.

Le chauffe-eau solaire est manifestement aujourd'hui «l'outil solaire» le plus développé dans le monde entier. Les chauffe-eau solaires existent en effet par millions au Japon, en Chine et USA, par dizaines de milliers en France, et rares sont les pays où ils sont totalement inconnus. Dans les pays industrialisés, cette application solaire a connu un développement très important. L'industrie développée a permis la construction de chauffe-eau solaires très performants avec des coûts de fabrication et d'installation au porté du citoyen. Chez nous le chauffe-eau solaire reste très peu utilisé bien que les besoins en eau chaude dans tous les secteurs soient nombreux. Ceci est particulièrement dû au fait que l'énergie conventionnelle (électricité et gaz) est abondante et bon marché alors que le chauffe-eau solaire, tel que développé ailleurs, reste très cher et non adapté aux conditions des régions sahariennes (poids élevé et non adapté à l'habitat saharien, des températures très élevées en période estivale).

Ce document qui décrit notre travail est réparti en Trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à des notions générales sur l'énergie solaire et une modélisation de l'éclairement solaire par le modèle Capderou est présentée et réalisée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes de l'éclairement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leurs variations sont illustrées sous formes graphiques. Les formules des paramètres géométriques et atmosphériques nécessaires ont été également programmées et représentées.

Dans le second chapitre une étude sur les chauffe-eau solaires (CES) sera présentée, l'architecture du système de production d'eau chaude, son principe de fonctionnement, ces différents types et le chauffage d'appoint associés.

Le dernier chapitre est dédié au développement du programme basé sur la méthode f -Chart et programmé avec Matlab baptisé « S^ol Dz », permettant le dimensionnement des chauffe-eau solaires en Algérie. Une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus est assurée ainsi que la validation des résultats obtenus à partir du programme de dimensionnement élaboré, les tests réalisés sur le programme de dimensionnement du système de chauffage de l'eau par énergie solaire seront discutés.

CHAPITRE I

Energie et éclaïrement solaire

I.1. Introduction

Dans un premier chapitre consacré au gisement solaire, le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée [1], pour la connaissance de la position du soleil dans le ciel à tout instant et en tout lieu est nécessaire pour l'étude de l'énergie interceptée. Les heures du lever et du coucher ainsi que la trajectoire du soleil dans le ciel au cours d'une journée permettent d'évaluer certaines grandeurs telles que la durée maximale d'insolation, éclairement global [1]. Toutes les équations présentées dans ce chapitre ; pour l'estimation des composantes directes et diffuse de l'éclairement solaire sur un plan horizontal et incliné, ont été programmées sous environnement Matlab. Les graphes illustrés sont issus de la programmation par Matlab du modèle Capderou [3].

I.2. Les énergies renouvelables et l'énergie solaire

I.2.1. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables apparaissent de nos jours et à long terme comme la solution adéquate qui couvre ce besoin énergétique, et diminue la dépendance aux énergies fossiles, puisque une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir du : charbon, gaz naturel, pétrole.

I.2.1.1. Définition

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

Soulignons que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le comportement des consommateurs d'énergie est donc un facteur à prendre en compte dans cette définition. Les énergies renouvelables sont également plus 'propres' (moins d'émissions de CO₂, moins de pollution) que les énergies issues de sources fossiles [5].

Les principales énergies renouvelables sont :

- L'énergie hydraulique ,
- L'énergie solaire ,
- L'énergie éolienne ,
- La géothermie .
- L'énergie de biomasse .

I.2.1.2. Importance des énergies renouvelable

Quatre points, qui montrent que l'électricité renouvelable améliore les trois piliers du développement durable : le social, l'environnemental et l'économique. L'électricité renouvelable c'est plus d'indépendance énergétique et moins de pollution mais également une industrie moins dangereuse pour l'homme et le développement d'une économie plus locale. [5]

L'intérêt des énergies renouvelables pour le monde tient à trois facteurs :

❖ L'augmentation du prix du pétrole

En effet, peu de pays sont producteurs de pétrole et la plupart de ceux qui en produisent sont des producteurs marginaux. Les pays importateurs aux économies faibles peuvent difficilement faire face aux flambées des prix du pétrole.

❖ La crise des compagnies d'électricité

La plupart des compagnies d'électricité du continent sont en crise ce qui conduit à un rationnement dans la fourniture et à des coupures intempestives d'électricité (surtout en Afrique). La nécessité de diversifier les sources de production de l'énergie électrique s'impose.

❖ La prise de conscience de l'impact des énergies fossiles sur l'environnement au niveau mondial

Les initiatives environnementales issues d'une part du programme Action 21 de la Conférence des Nations Unies sur l'environnement et le développement durable tenue à Rio de Janeiro en 1992 et d'autre part de la Convention des Nations Unies sur les changements climatiques ainsi que le protocole de Kyoto sur la réduction des gaz à effet de serre ont suscité la prise de conscience en Afrique de l'importance des énergies renouvelables pour la préservation de l'environnement.

C'est aussi très important de citer le facteur du comportement des consommateurs qui joue un rôle significatif étant donné que le caractère renouvelable d'une énergie dépend non seulement

CHAPITRE I : Energie et éclairage solaire

de la vitesse à laquelle la source se renouvelle, mais également de la rapidité à laquelle elle est consommée [6].

I.2.2. Energie solaire

I.2.2.1. Le soleil

Le soleil (Fig I.1) est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune d'une masse d'environ $1,9891 \times 10^{30}$ kg.

L'énergie qu'il envoie dans toutes les directions est à la fois énorme (environ 10 000 fois les besoins terrestres), mais malheureusement assez diluée, puisque la puissance maximale reçue à l'extérieur de l'atmosphère sur une surface d'un mètre carré perpendiculaire à la direction du rayonnement est au maximum d'environ 1350 W (cette valeur est légèrement supérieure en hiver car la distance Terre Soleil est minimale à ce moment-là) Pour récupérer une quantité d'énergie importante, il faut donc nécessairement augmenter la surface qui intercepte le flux solaire. Concentrer le rayonnement solaire n'augmente pas la puissance ou l'énergie récupérés, mais seulement le niveau de température pouvant être atteint [8].

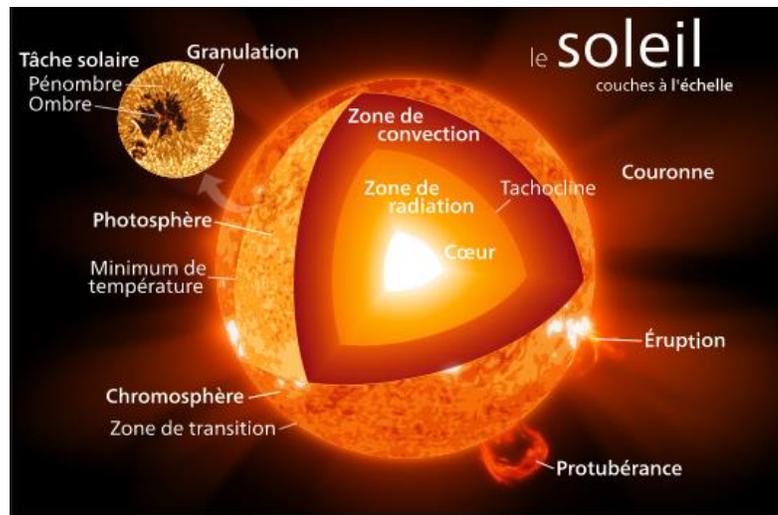


Figure I.1 : structure de soleil.

I.2.2.2. Définition

Le soleil bien que distant de 150 millions de kilomètres de notre planète est assurément notre plus grande source d'énergie les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil entretiennent et renouvellent en permanence cette source d'énergie.

CHAPITRE I : Energie et éclairage solaire

Bien sur l'énergie reçue est variable selon les moments. Les nuits, les passages nuageux sont autant de moments où l'énergie solaire est inexistante, ou moindre. En moyenne, la puissance reçue annuellement à la surface du globe peut aller de 85 à 290 W/m². Elle varie donc de 01 à 03 entre les régions les moins ensoleillées et les plus ensoleillées. Cet écart est important mais pas considérable : aucune région du globe n'est dépourvue d'énergie solaire.

L'énergie solaire peut, ou bien être convertie en chaleur, ou bien convertie en électricité.

L'exploitation de cette énergie peut se faire de manière thermique, thermodynamique ou Photovoltaïque. [5]

I.2.2.3. Mouvement de la terre autour du soleil

La Terre tourne autour d'un axe définissant les pôles nord et sud du globe en 24 heures. Ce phénomène génère ainsi une alternance de jours (l'hémisphère du site considéré est alors éclairé) et de nuit (l'hémisphère est à l'ombre). La trajectoire de la terre autour du soleil constitue une ellipse de très faible excentricité (c'est-à-dire proche d'un cercle), réalisée en environ 365 jours. L'inclinaison de l'axe des pôles terrestres par rapport au plan de l'écliptique est constante et égale à 23° 27' ; elle est à l'origine du phénomène de saison que nous connaissons. La distance terre-soleil varie entre 153.106 km (le 3 juillet) et 147.106 km (le 3 janvier) ; sa valeur moyenne vaut 150.106 km, ce qui donne un rayon apparent du soleil depuis la Terre égal à 0,27°.

Les distances minimale et maximale entre les deux astres valent donc respectivement 0,983 et 1,017 UA (voir Fig I.2) [10].

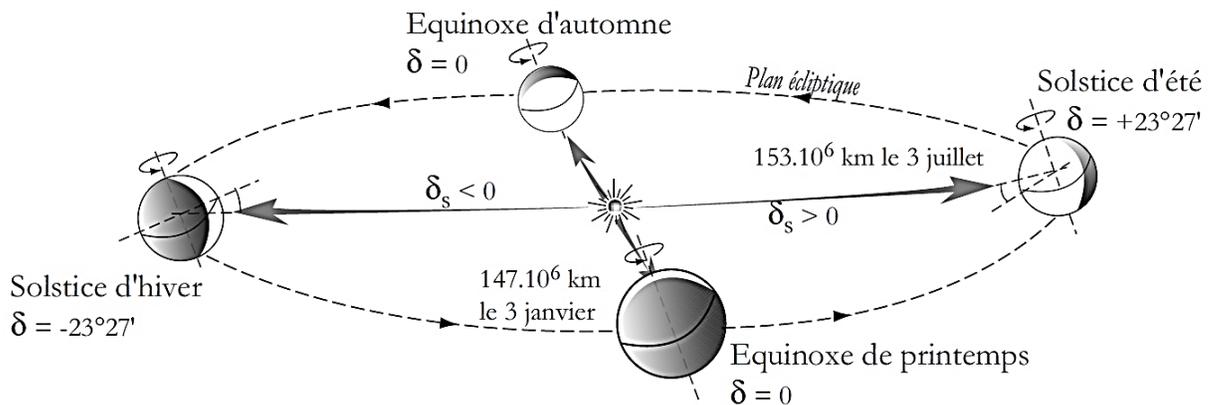


Figure I.2 : mouvements de la Terre autour du Soleil.

I.2.2.4. Les applications de l'énergie solaire

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien montre que le Sahara occupe une grande superficie du territoire et que l'ensoleillement annuel reçu est très important et atteint 2600 kWh/m²/an, ce qui le classe parmi les plus grands gisements solaires au monde [3], le tableau I.1 ci-dessous présente l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique.

Tableau I.1: l'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique [4].

Ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique	Superficie (%)	Ensoleillement (h/an)	Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)
Région Littoral	4	2650	1700
Hauts Plateaux	10	3000	1900
Sahara	86	3500	2650

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale.

✓ L'énergie solaire thermique

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

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

✓ L'énergie solaire photovoltaïque

Elle permet de produire de l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire (Fig I.3) avec une cellule photovoltaïque.

Les photopiles utilisent l'effet photovoltaïque, elles sont formées d'une couche d'un matériau semi-conducteur et d'une jonction semi-conductrice. Le silicium est le plus employé ;

cependant, l'arséniure de gallium offre des meilleures performances, mais reste beaucoup plus onéreux [7].

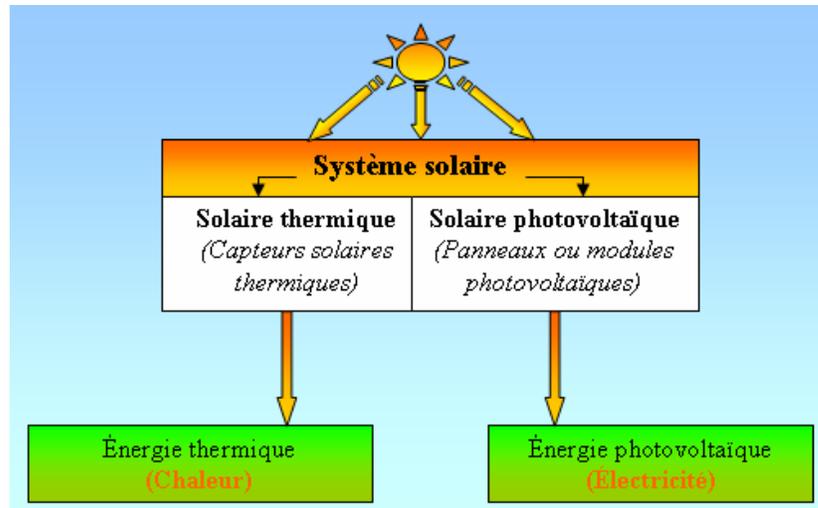


Figure I.3: Système solaire.

I.3. Paramètres géométriques et atmosphériques

I.3.1. Paramètres géographiques

Tout point de la surface terrestre est repérée par ses coordonnées géographiques : La longitude, la latitude, ainsi que par son altitude.

I.3.1.1. La latitude

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur (Fig I.4) qui est le plan de référence. Est une mesure angulaire, elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et 90° aux pôles [11].

I.3.1.2. La longitude

La longitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression du positionnement est-ouest d'un point sur Terre (ou sur une autre planète). La longitude de référence sur Terre est le méridien de Greenwich (Fig I.4).

La longitude, généralement notée λ , est donc une mesure angulaire sur 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de -180° (180°) Ouest à $+180^\circ$ (-180°) Est [11].

I.3.1.3. La L'altitude

Latitude d'un point correspond à la distance vertical en mètre entre ce point et une surface de référence théorique (niveau moyen de la mer) [12].

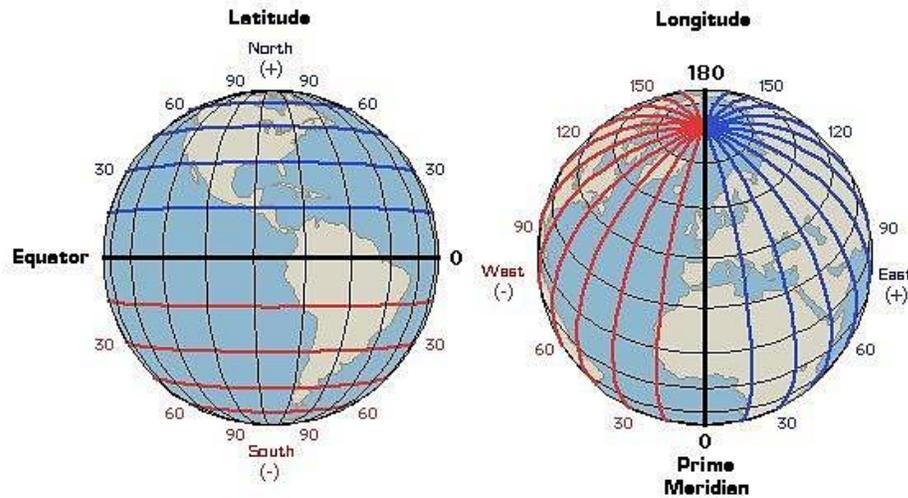


Figure I.4: Les coordonnées terrestres [13].

I.3.2. Paramètres horaires

I.3.2.1. Temps solaire

L'énergie solaire reçue sur la terre varie selon le temps solaire vrai qui nous indique la position instantanée du soleil dans le ciel qui est reliée au temps local.

I.3.2.2. Temps solaire vrai

En astronomie on appelle temps solaire vrai TSV en un lieu et à un instant donné, l'angle horaire du soleil en ce lieu et à cet instant. C'est une notion qui traduit à la fois le mouvement de rotation de la terre et son mouvement de translation. Son introduction est naturelle, car il est lié à l'alternance des jours et de nuits. La variation de la durée du jour solaire vrai (intervalle séparant deux midi consécutifs) est comprise entre : 23h 59m 39s et 24h 00m 30s [26].

I.3.2.3. Equation du temps

La vitesse de la terre sur son orbite n'est pas constante au cours de l'année, la somme de l'inégalité du temps solaire vrai TSV porte le nom de équation de temps ET avec: $ET = TSV - TSM$, la Variation de l'équation du temps en fonction du jour (Fig I.5).

$$ET = 9.87 \cdot \sin(2 \cdot N') - 7.53 \cdot \cos(N') - 1.5 \cdot \sin(N') \quad (I. 1)$$

Avec :

$$N' = \frac{360}{365} \cdot (N - 81) \quad (I. 2)$$

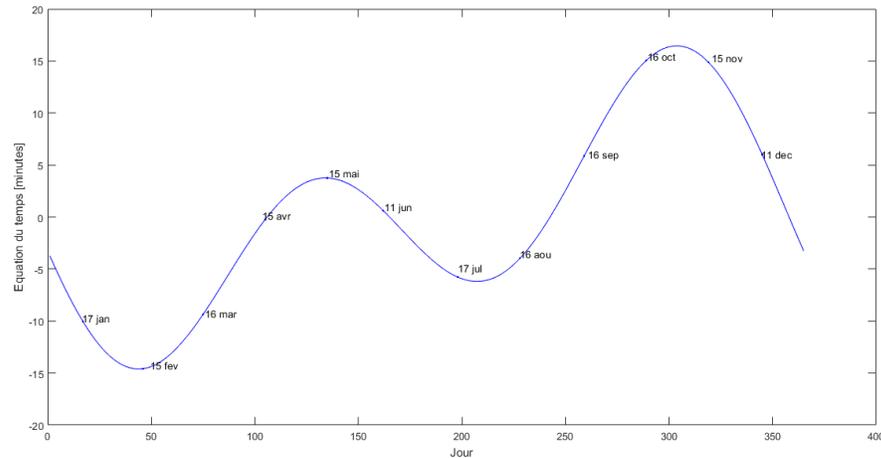


Figure I.5: Variation de l'équation du temps en fonction du jour.

I.3.2.4. Le temps universel

Le temps universel est égal au temps solaire moyen de la méridienne origine (Méridien de Greenwich). Il est exprimé ainsi [5] :

$$TU = TSM + \frac{L}{15} \quad (I. 3)$$

Avec : L la longitude exprimée en degré et les temps en heure.

I.3.2.5. Temps légal

Le temps légal (ou local) est le temps officiel de l'Etat, il diffère par rapport au temps mondial de Greenwich par un décalage exprimé en heures. [5]

$$TL = TU + C_1 + C_2 \quad (I. 4)$$

Ou : C_1 est le décalage horaire par rapport au Greenwich, C_2 correspond à l'heure d'été et d'hiver, s'il y a lieu.

I.3.2.6. La durée du jour

La durée du jour est donnée par la relation suivante [5]:

$$d_j = (\text{TSV})_c - (\text{TSV})_1 = 12 \cdot \frac{\omega_1}{15} \quad (\text{I. 5})$$

I.3.2.7. Angle horaire

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV, l'angle horaire s'exprime parfois en heures. Au midi solaire on a $\omega = 0$, ensuite chaque heure correspond à une variation de 15° , car la terre effectue un tour complet sur elle-même en 24h. ω sera compté négativement le matin lorsque le soleil est vers l'est et positivement le soir. L'angle horaire est donné par l'équation suivante [5] :

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (\text{I. 6})$$

Pour calculer l'angle horaire, Capderou ; dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, a utilisé la formule suivante :

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I. 7})$$

Le temps solaire vrai TSV est donné par l'équation suivante, avec DE est le décalage horaire, il est égale à 1 pour l'Algérie :

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (\text{I. 8})$$

I.3.2.8. Déclinaison solaire

La déclinaison du soleil δ est l'angle que fait, la direction du soleil avec le plan équatorial de la terre, la déclinaison varie de $-23^\circ 27'$ au solstice d'hiver à $+23^\circ 27'$ au solstice d'été et elle est nulle aux équinoxes. La déclinaison solaire est bien représentée par la formule (I.9) [26]:

$$\sin(\delta) = 0.3978 \cdot \sin[N_p - 1.4 + 0.0355 \cdot \sin(N_p - 0.0489)] \quad (\text{I. 9})$$

Avec :
$$N_p = 2\pi \cdot N / 365.25 \quad (\text{I.10})$$

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (I.11) pour le calcul de la déclinaison qui donnerait le même résultat que la formule (I.09)

$$\sin(\delta) = 0.398 \cdot \sin \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 82) + 2 \cdot \sin \left\{ \frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right\} \right] \quad (\text{I.11})$$

N est le jour Julian variant de 1 du 1 Janvier à 365 (366) du 31 Décembre. La variation de la déclinaison en fonction du jour de l'année est décrite sur la (Fig I.6) :

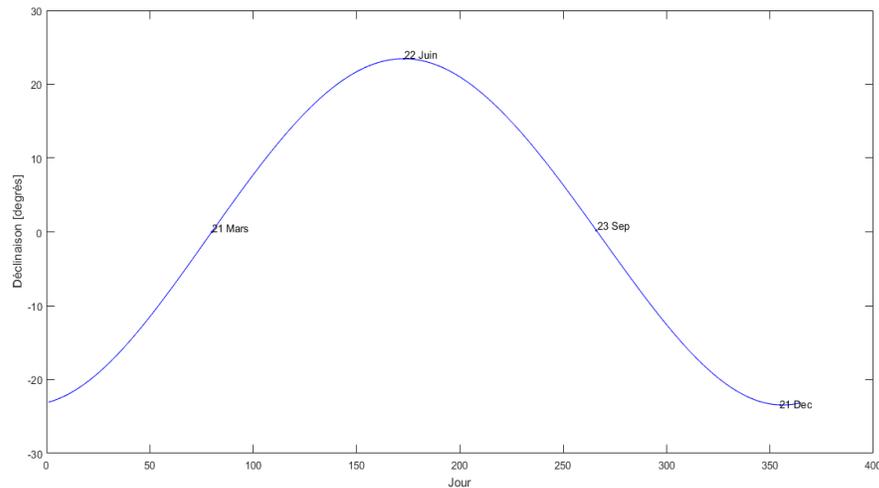


Figure I.6 : Variation de la déclinaison solaire en fonction du jour.

I.3.3. Paramètres de position

Dans les applications à énergies solaires, la connaissance des paramètres géométriques de la trajectoire du soleil est importante; vu à partir d'un point fixe de la terre (Fig I.7), la position du soleil est déterminée en fonction de deux angles donnés en radian: l'angle entre la direction du soleil et le plan horizontal du lieu (hauteur angulaire γ_s) et l'angle entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil (azimut χ). Le complément de γ_s ou l'angle que fait la direction du soleil avec la verticale est appelée angle zénithal θ_z [5].

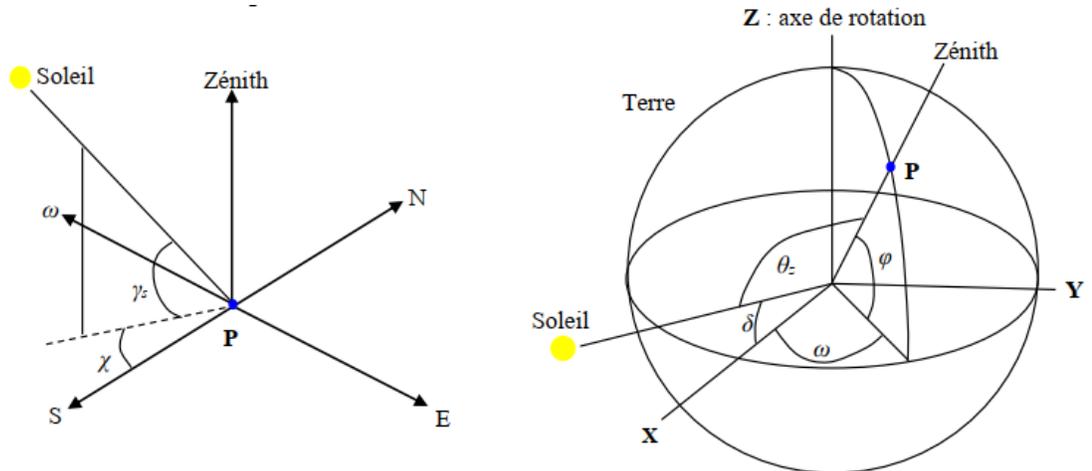


Figure I.7 : Position du soleil par rapport à un point fixe de la terre (hauteur et azimut du soleil).

I.3.3.1. Hauteur du soleil

La hauteur du soleil γ_s est l'angle que fait, le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $\gamma_s=0$ correspond au lever et au coucher du soleil, quand $\gamma_s<0$ c'est la nuit et quand $\gamma_s>0$ c'est le jour sur terre, la hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue, qui avait été également adoptée par Capderou [26]. :

$$\sin(\gamma_s) = [\cos(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega)] + [\sin(\varphi) \cdot \sin(\delta)] \quad (I.12)$$

La (Fig I.8) représente la variation de la hauteur γ_s à midi sur le site de Ghardaïa durant une année

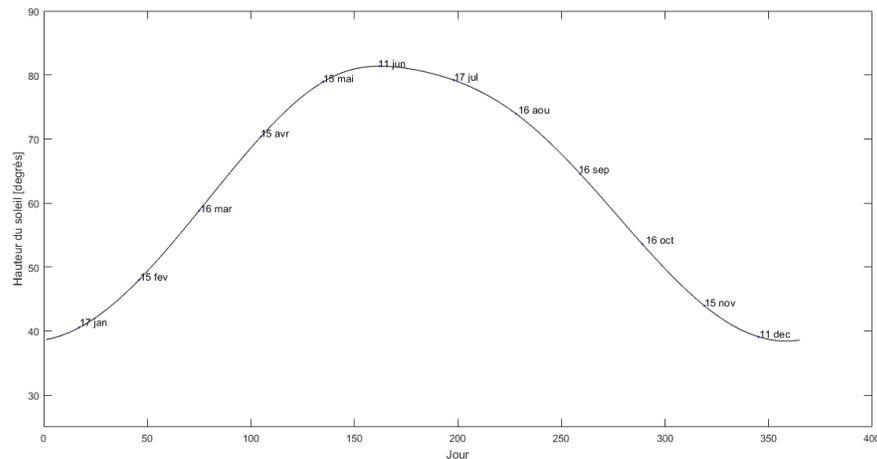


Figure I.8: Variation de la hauteur du soleil en fonction du jour.

I.3.3.2. Azimut du soleil

L'azimut du soleil χ est l'angle que fait, sur le plan horizontal, la projection de la direction du soleil avec la direction du sud ((Fig I.9). L'azimut est compté positivement vers l'Ouest $\chi > 0$ et négativement vers l'Est $\chi < 0$, à midi $\chi = 0$. L'azimut est compris entre $-180 \leq \chi \leq 180^\circ$.

L'azimut du soleil est représenté en fonction de la déclinaison solaire δ , latitude du lieu φ , et de l'angle horaire ω de la manière suivante :

$$\cos(\chi) = \frac{\sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta)}{\left\{ [\cos(\delta) \cdot \sin(\omega)]^2 + [\sin(\varphi) \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \cos(\varphi) \cdot \sin(\delta)]^2 \right\}^{0.5}} \quad (I.13)$$

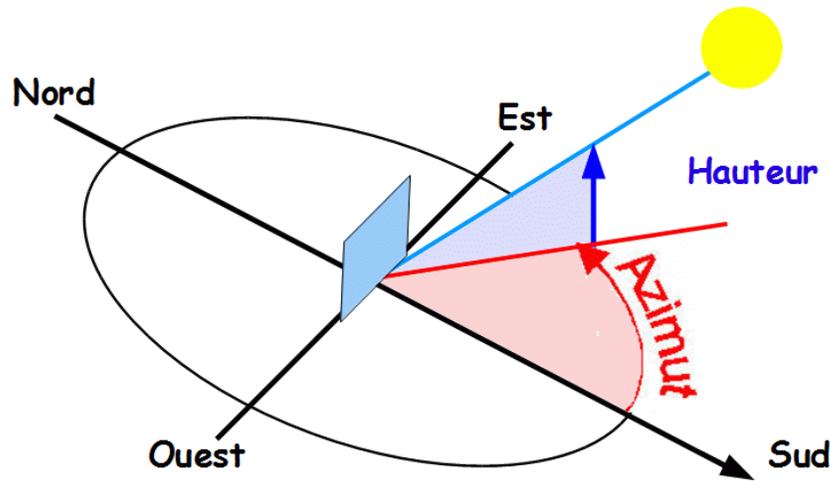


Figure I. 9 : l'azimut solaire et Hauteur du soleil.

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (I.14) pour calculer l'azimut du soleil qui donnerait le même résultat que l'équation (I.13) [5].

$$\cos(\chi) = \frac{\cos(\delta) \cdot \cos(\omega) - \sin(\delta) \cdot \cos(\varphi)}{\cos(\gamma_s)} \quad (I.14)$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois de Avril, Juillet et Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la (Fig I.10) :

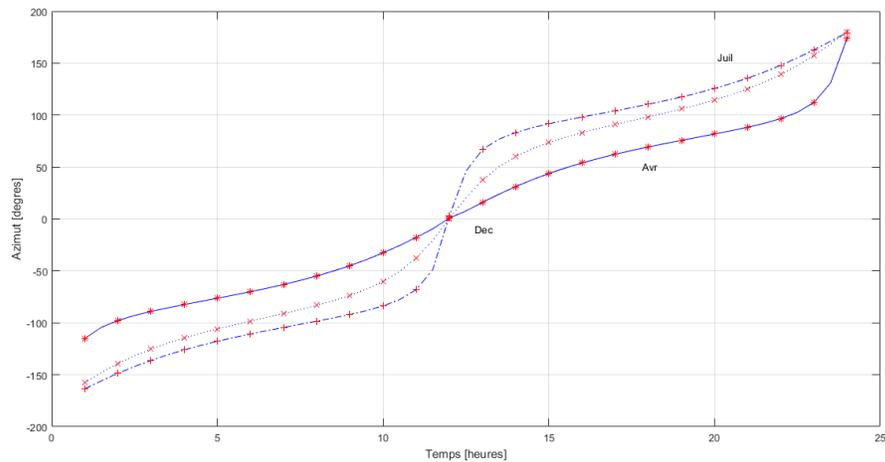


Figure I.10: Variation de l'azimut solaire en fonction du temps.

I.3.4. Paramètres de l'atmosphère

I.3.4.1. Masse atmosphérique

On appelle masse d'air m_A 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. Plus le soleil est bas sur l'horizon, plus il va traverser une épaisseur importante d'atmosphère et plus il va subir des transformations. La masse atmosphérique relative est donnée par la relation, très simple représentée par la formule (I.15), [5] et sa Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil sur la figure I.11 :

$$m_A = 1 / \sin(\gamma_s) \quad (I.15)$$

Dans l'atlas Solaire de l'Algérie, Capderou a utilisé la formule (I.16)

$$m_A = \frac{1}{\sin(\gamma_s) + [9.40 \cdot 10^{-4} \cdot \{\sin(\gamma_s) + 0.0678\}^{-1.253}]} \quad (I.16)$$

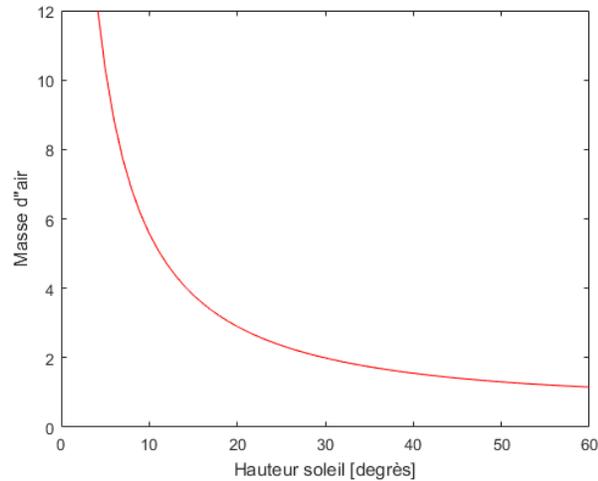


Figure I.11 : Variation de la masse d'air en fonction de la hauteur du soleil.

I.3.4.2. Epaisseur optique de l'atmosphère

En 1922, Linke [14] définit l'épaisseur optique de Rayleigh δ_R comme étant l'épaisseur optique totale d'une atmosphère sans nuages, vapeur d'eau et aérosols. Kasten, en 1980 [15] utilisa les données spectrales publiées par Feussner et Dubois en 1930 [16] et proposa la formule (I.17) pour δ_R , connue sous le nom de formule pyréliométrique de Kasten, où la diffusion moléculaire et l'absorption de la couche d'ozone stratosphérique sont prises en compte[5].

$$(\delta_R)^{-1} = 9.4 + (0.9 \cdot m_A) \quad (I.17)$$

Dans cette formule utilisé depuis fort longtemps, l'absorption par les gaz atmosphériques permanents tels que : CO₂, O₂, NO₂ et le CO n'est prise en compte. Capderou dans l'Atlas Solaire de l'Algérie, 'ASA', utilisa la formule pyréliométrique de Kasten pour calculer le rayonnement direct incident sur un plan par ciel clair. En 1986, Louche [17] ajouta l'absorption par les constituants permanents de l'atmosphère et proposa un polynôme de 4^{ième} ordre pour la masse d'air [5].

$$(\delta_R)^{-1} = 6.5567 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (I.18)$$

La variation de l'azimut du soleil en fonction du temps pour les mois de Avril, Juillet et Décembre sur le site de Ghardaïa est représentée sur la (Fig I.12) :

Louche démontra que la formule précédent conduit à des valeurs grandes par rapport à ceux données par la formule d'origine de Kasten et plus particulièrement pour les petites valeurs de la masse d'air. Récemment en 1996, Kasten a ajusté la formule de Louche et proposa une nouvelle expression pour δ_R [5].

$$(\delta_R)^{-1} = 6.6296 + (1.7513 \cdot m_A) - (0.1202 \cdot m_A^2) + (0.0065 \cdot m_A^3) - (0.00013 \cdot m_A^4) \quad (I.19)$$

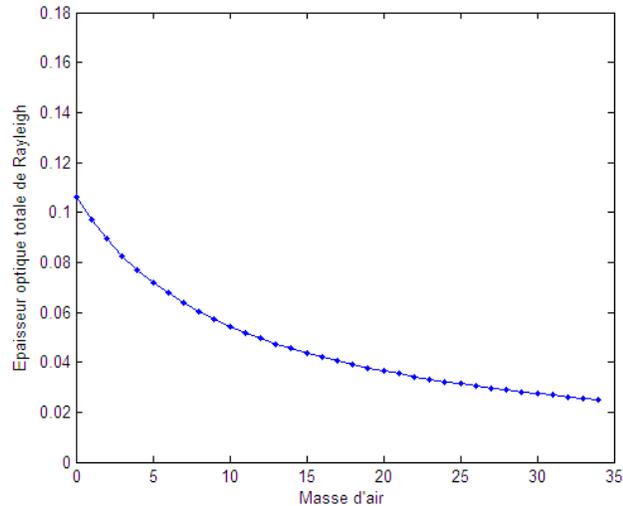


Figure I.12 : Variation de l'épaisseur optique de l'atmosphère en fonction de la masse d'air.

I.3.4.3. Facteur de trouble de Linke

Le rayonnement solaire est atténué en traversant l'atmosphère terrestre par la diffusion des aérosols, les nuages et l'absorption par les différents composants atmosphériques, tel que : l'ozone, la vapeur d'eau, l'oxygène...etc., il est connu qu'en jour clair les aérosols sont la principale cause de l'extinction de l'irradiation solaire. Ces dernières années la plupart des scientifiques et chercheurs ont prouvés que les activités humaines jouent un rôle très important dans l'augmentation des aérosols. La quantité des aérosols dans l'atmosphère peut être représentée par les coefficients de troubles, la détermination de troubles atmosphérique à une grande importance dans la modélisation du rayonnement solaire utilisé dans le dimensionnement des systèmes énergétiques solaire. En effet la plupart des modèles de rayonnement solaire font appel à la détermination de ces facteurs tels que le facteur de Linke (T_L) [26].

Capderou, proposa un modèle pour calculer le facteur de Linke en Algérie par ciel clair. Le coefficient de trouble atmosphérique total TL a été décomposé en trois facteurs de trouble

auxiliaires : le trouble du à l'absorption par la vapeur d'eau T0, le trouble du à la diffusion moléculaire de Rayleigh T1 et le trouble relatif à la diffusion par les aérosols T2.

I.4. Le rayonnement solaire

Le soleil exerce sur notre planète une action vitale, véritable source de vie, bien qu'il soit le centre du système qui porte son nom (Système solaire auquel la Terre appartient). Sa lumière met 8mn et 18s à travers 150 millions de kilomètres d'espace pour parvenir sur Terre.

La puissance émise par le soleil est estimée à $1.7 \cdot 10^{23}$ kW dont une partie atteint le globe terrestre, elle est de l'ordre de $8.5 \cdot 10^{13}$ kW ; Uniquement 70% (environ $6 \cdot 10^{13}$ kW) de cette puissance pénètre l'atmosphère.

Le soleil nous envoie de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde variant de $0.22\mu\text{m}$ à $10\mu\text{m}$, la (Fig I.13) représente la variation de la répartition spectrale de ce rayonnement.

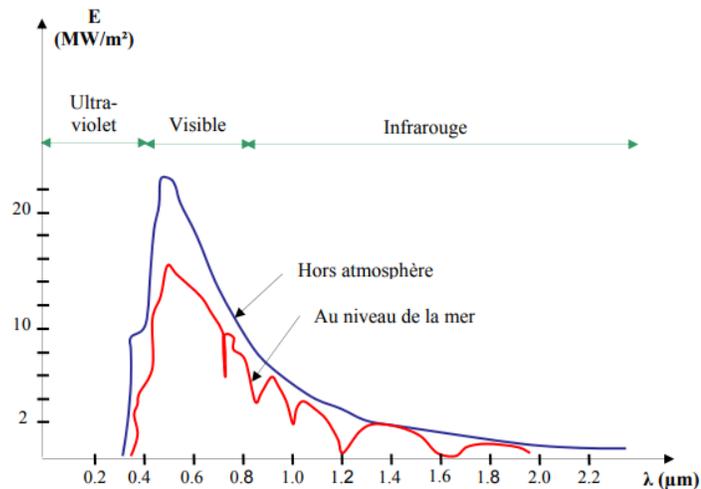


Figure I.13 : La répartition spectrale du rayonnement solaire [18].

Ces rayonnements arrivent au sol, soit directement soit après certaines atténuations ou déperditions résultantes des phénomènes d'absorption et/ou de diffusion.

On décompose le rayonnement global (total) terrestre en rayonnement direct (Rayonnement provenant directement du soleil) et en rayonnement diffus (rayonnement provenant de l'atmosphère); Un capteur incliné d'un angle donnée sur l'horizontale subit une autre composante du rayonnement : la part renvoyée vers l'atmosphère après réflexion diffuse par le sol ; (voir Fig I .14) [18].

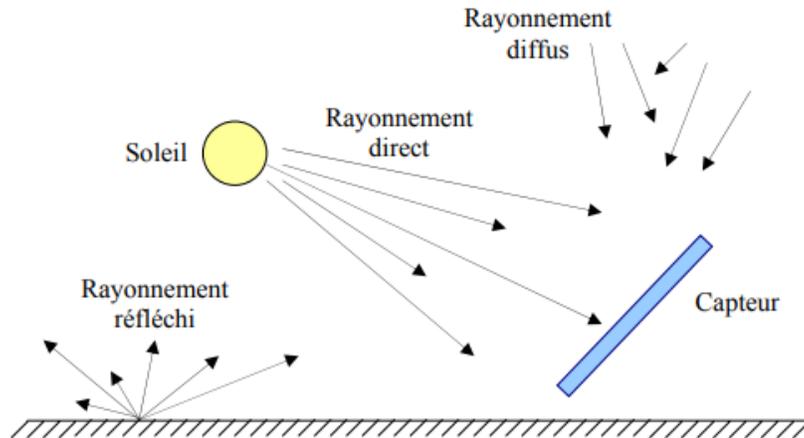


Figure I.14: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.4.1. Composantes du rayonnement solaire

I.4.1.1. Le Rayonnement direct (IB)

qui a fait un trajet dans l'atmosphère sans déviation géométrique, et correspond donc à la portion du rayonnement incident dans la direction d'éclairage du Soleil. [19].

I.4.1.2. Le rayonnement diffus (ID)

qui résulte des diffractions du rayonnement direct par les nuages et les particules atmosphériques. [19].

I.4.1.3. Le rayonnement réfléchi (IR)

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée.

Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairage qu'il reçoit en fonction de sa nature.

- Sol cultivé 10 à 25%,
- Neige 60 à 90%,
- Sable 30 à 40%.

CHAPITRE I : Energie et éclairement solaire

Albédo : c'est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident.

Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul [20].

Une simple formule représentant l'albédo du sol peut être défini comme suit :

$$\text{Albédo } (\rho) = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}} \quad (\text{I.20})$$

Sur le tableau I.2 on donne quelques valeurs de l'albédo suivant la surface du sol :

Tableau I.2 Valeurs d'albédo selon différents types de sol. [5]

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Forêt	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Neige ancienne	0.5 à 0.7
Neige fraîche	0.8 à 0.95

I.4.1.4. Le rayonnement global (IG)

- Rayonnement Global sur une surface horizontale (IG_h) : est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
- Le rayonnement Global sur une surface inclinée (IG_i) : est la somme des composantes directe, diffuse et réfléchie par le sol du rayonnement solaire [21].

I.4.2. Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement (G) correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètre carré (W/m^2). L'ensoleillement

varie de zéro, au lever du Soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire il existe quatre types de rayonnement [11] .

I.4.2.1. Mesure du rayonnement direct (le Pyrhéliomètre)

Le pyrhéliomètre mesure le rayonnement direct (Fig I.15). Il comporte une ouverture réduite et une surface réceptrice qui doit être maintenue normale au rayonnement par un système de poursuite automatique. La surface sensible est un disque d'argent noirci placé à la base d'un tube muni d'un obturateur et d'un diaphragme limitant l'angle d'ouverture à 5.7° (le diamètre apparent du soleil est de 0.5°). Le tube est fixé sur une monture équatoriale [22].



Figure I.15 : Le Pyrhéliomètre (direct) [23].

I.4.2.2. Mesure du rayonnement diffus (le Pyranomètre)

C'est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre (Fig I.16). avec un pare-soleil (bande métallique circulaire) qui protège le pyranomètre du rayonnement solaire direct. [1]



Figure I.16 : le Pyranomètre (diffus).

I.4.2.3. Mesure du rayonnement solaire réfléchi (Albédo mètre)

C'est le rapport de l'énergie solaire réfléchie par une surface à l'énergie solaire incidente. Sa valeur est comprise entre 0 et 1. Plus une surface est réfléchissante, plus son albédo est élevé. éléments qui contribuent le plus à l'albédo de la Terre sont : les nuages, les surfaces de neige et de glace. Par exemple, l'albédo de la neige fraîche est de 0,87, ce qui signifie que 87 % de l'énergie solaire est réfléchie par ce type de neige. Il peut être mesuré par un Albédo mètre (Fig I.17). [1].



Figure I.17 : Albédo mètre (réfléchi).

I.4.2.4. Mesure du rayonnement global (Pyranomètre)

On mesure la puissance du rayonnement solaire globale sur une surface horizontale grâce à un pyranomètre (Fig I.18). qui comprend une double coupelle de verre, un thermophile (série de thermocouples) et un système d'enregistrement de la force électromotrice produite par ce thermophile sous l'action d'un rayonnement. Quand l'instrument est exposé à la radiation solaire, une différence de température est créée entre les secteurs noirs et les secteurs blancs.

Cette différence de température est détectée par la thermophile qui convertie l'énergie thermique en énergie électrique. Ce courant peut être mesuré et amplifié et le signal de millivolt est converti par un facteur de calibrage en un flux en watt par mètre carré. Il représente la somme de tous les rayonnements reçus (direct+diffus+albédo) [1].



Figure I.18: Pyranomètre (direct+diffus+albédo).

I.4.2.5. Mesure de la durée d'insolation (l'Héliographe)

L'insolation est définie comme l'intervalle de temps durant lequel le disque solaire a été visible ou durant lequel on a pu observer des ombres portées sur le sol. Elle est également définie comme la durée pendant laquelle le rayonnement direct est demeuré supérieur à une valeur internationalement admise : 120 W/m^2 .

Mesure effectuée par un Héliographe (Fig I.19) : enregistrement de l'insolation en centième d'heure, la durée d'insolation est mesurée à l'aide d'héliographes en dixièmes d'heures. On distingue les héliographes classiques et automatiques [24].



Figure I.19 : héliographe (durée d'insolation).

I.5. Présentation du Modèle Capderou

Ce modèle est présenté dans l'Atlas solaire de l'Algérie par Capderou en 1987. Il tient compte des affaiblissements du rayonnement solaire lors de sa pénétration dans l'atmosphère. Dans les modèles qui ont précédé, les affaiblissements causés par les constituants de l'atmosphère sont exprimés par des coefficients de transmission. Pour Capderou les phénomènes d'atténuation du rayonnement solaire sont régis par un facteur appelé facteur de trouble atmosphérique de Linke, à partir duquel sont exprimées les irradiances directe et diffuse par ciel clair. Ce modèle permet de calculer le rayonnement solaire pour des surfaces inclinées [24].

I.5.1. Modélisation par le modèle de Capderou

I.5.1.1. 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 $I_0=1367$ W/m² par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse), essentiellement d'après des résultats de mesures faites entre 1969 et 1980 [25].

I.5.1.2. Eclairage hors atmosphère

En dehors de l'atmosphère le rayonnement solaire est d'intensité $I_0=1367 \text{ W/m}^2$. Une surface exposée au soleil ne peut recevoir cette valeur d'intensité que si elle est placée perpendiculairement à la direction du rayonnement, n'importe quel écartement à cette orientation conduit à une réduction du rayonnement incident. Dans le cas d'un plan horizontal situé en dehors de l'atmosphère, le rayonnement est décrit comme: rayonnement solaire extraterrestre horizontal. (Fig I.20) [26].

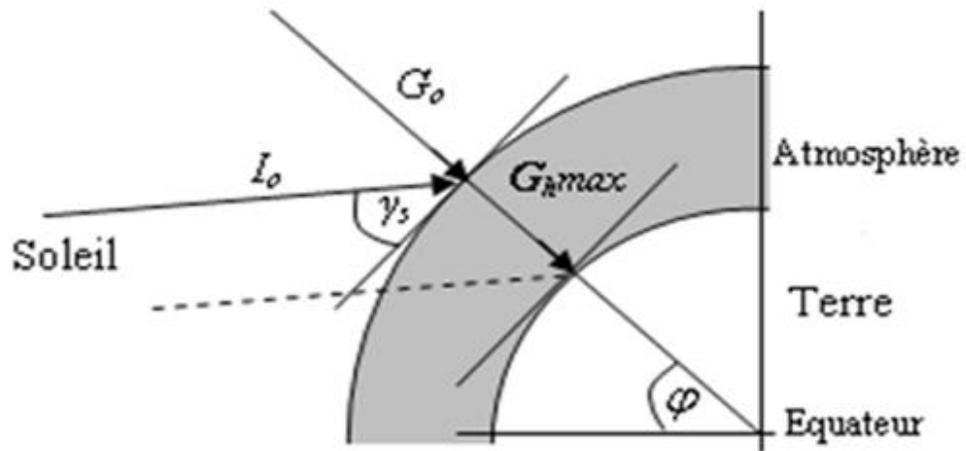


Figure I.20 : Rayonnement solaire extraterrestre.

Le rayonnement solaire extraterrestre ; fonction de la constante solaire et de la correction de distance entre la terre et le soleil, est donné par l'équation (I.21) et sa variation en fonction du jour de l'année est illustrée sur la figure I.21.

$$G_0 = I_0 \cdot \varepsilon \quad (I.21)$$

ε : est la correction de distance terre soleil est donnée par M. Capderou par l'équation (I.22):

$$\varepsilon = 1 + 0.034 \cdot \cos \left[\frac{360}{365} \cdot (N - 2) \right] \quad (I.22)$$

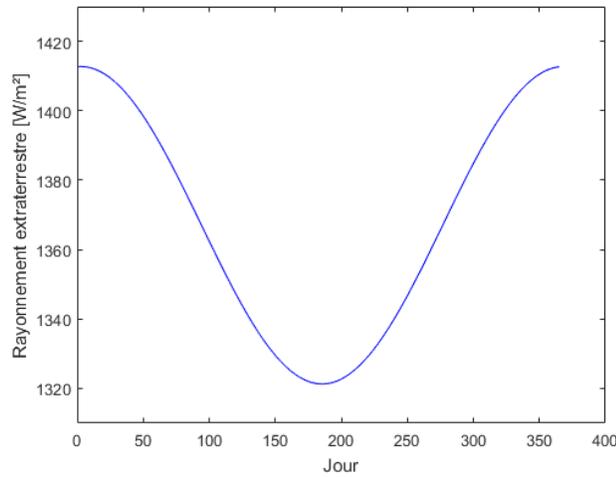


Figure I.21 : Variation du rayonnement solaire extraterrestre en fonction du jour.

I.5.1.3. Angle d'incidence

L'angle d'incidence est l'angle que font les rayons du soleil avec la normale du plan considéré, elle est définie par l'inclinaison du plan β et l'Azimut de la normal du plan α_z (orientation du plan), α_z est compté dans le sens rétrograde ($\alpha_z < 0$ vers l'Est, $\alpha_z > 0$ vers l'Ouest). M. Capderou utilise la hauteur de la normal du plan γ pour calculer $\text{Cos}(\delta^i)$ de l'angle d'incidence, γ est positive pour les plans tournés vers le haut et négative pour les plans tournés vers le bas, donc c'est les angles α_z et γ qui déterminent la position du plan. L'angle d'incidence sur un plan quelconque est donné par Capderou par les formules suivantes :

$$\text{Cos}(\delta^i) = a' \cdot \text{Sin}(\omega) + b' \cdot \text{Cos}(\omega) + c' \quad (\text{I.23})$$

$$\text{Avec : } a' = \text{Cos}(\delta) \cdot [\text{Sin}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma)] \quad (\text{I.24})$$

$$b' = \text{Cos}(\delta) \cdot [\text{Cos}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi)] \quad (\text{I.25})$$

$$c' = \text{Sin}(\delta) \cdot [-\text{Cos}(\alpha_z) \cdot \text{Cos}(\gamma) \cdot \text{Cos}(\varphi) + \text{Sin}(\gamma) \cdot \text{Sin}(\varphi)] \quad (\text{I.26})$$

$$\text{Où : } \beta = 90 - \gamma \quad (\text{I.27})$$

I.5.2. Estimation de l'éclairement solaire incident sur un plan horizontal

I.5.2.1. Eclairage global incident sur un plan horizontal

Dans l'Atlas Solaire de l'Algérie (ASA), Capderou; donna un modèle mathématique pour calculer le rayonnement incident direct et diffus incident sur un plan horizontal, il reste le modèle le plus utilisé en Algérie. Selon ce modèle le rayonnement global modélisé par Capderou est la somme du rayonnement direct et diffus. [26].

I.5.2.2. Eclairage direct incident sur un plan horizontal

Pour le rayonnement direct, Capderou utilisa la formule (I.16) pour la masse d'air m_A et la formule (I.17) pour l'épaisseur totale de l'atmosphère δ_R et donna l'équation (I.28) qui permet de calculer le rayonnement direct incident sur un plan horizontal IB_h fonction de la hauteur du soleil γ_s et du facteur de trouble total de Linke T_L :

$$IB_h = G_o \cdot \sin(\gamma_s) \cdot \exp\left(-T_L \cdot \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{Alt}} \cdot \sin(\gamma_s)\right\}\right) \quad (I.28)$$

I.5.2.3. Eclairage diffus incident sur un plan horizontal

Pour calculer le rayonnement diffus ID_h , Capderou utilisa le facteur de trouble diffusif T'_L et donna ; en 1987, une l'équation (I.25) fonction de la hauteur du soleil γ_s :

$$ID_h = G_o \cdot \exp\left[-1 + 1.06 \cdot \log\{\sin(\gamma_s)\} + a - \sqrt{b^2 + a^2}\right] \quad (I.29)$$

$$\text{Avec : } a = 1.1 \quad (I.30)$$

$$b = \log(T'_L) - 2.80 + 1.02 \cdot [1 - \sin(\gamma_s)]^2 \quad (I.31)$$

La figure I. 22 représente la variations de l'éclairage direct, diffus et global un plan horizontal de site Ghardaïa dans un jour 1 janvier.

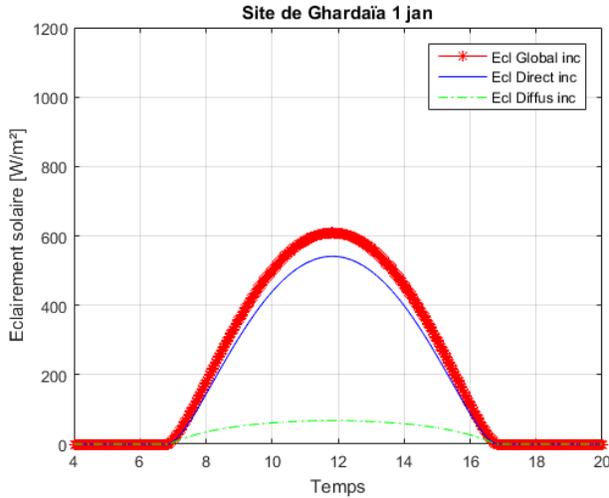


Figure I.22 : Variations de l'éclairage direct, diffus et global un plan horizontal.

I.5.3. Estimation de l'éclairage solaire incident sur un plan quelconque

I.5.3.1. Eclairage global incident sur un plan quelconque

L'éclairage global incident sur un plan (α_z, γ) est la somme des deux composantes.

I.5.3.2. Eclairage direct incident sur un plan quelconque

Capderou utilisa l'angle d'incidence donnée par l'équation (I.23) pour calculer l'éclairage direct à l'aide de l'équation suivante

$$IB_i = IN \cdot \text{Cos}(\delta^{\text{inc}}) \quad (\text{I.32})$$

Avec :

$$IN = G_o \cdot \exp\left(-T_L / \left\{0.9 + \frac{9.4}{(0.89)^{\text{Alt}}} \cdot \text{Sin}(\gamma_s)\right\}\right) \quad (\text{I.33})$$

I.5.3.3. Eclairage diffus incident sur un plan quelconque

L'éclairage diffus est lui-même décomposé en deux parties : l'éclairage diffus provenant du ciel et l'éclairage diffus provenant du sol :

✓ Composante diffuse du sol

La composante du diffus isotrope du sol est donnée par l'équation (I.34) en fonction de δ_a qui est la composante due à l'albédo :

$$ID_a^i(\gamma_s, T_L) = \delta_a \cdot \frac{1 - \text{Sin}(\chi)}{2} \quad (\text{I.34})$$

Avec : $\delta_a = \rho_g \cdot IB^h(\gamma_s, T_L)$ (I.35)

✓ Composante diffuse du ciel

Pour un plan (α_z, χ) , l'éclairément diffus incident en provenance du ciel est décomposé en trois parties: le diffus isotrope du ciel, le diffus directionnel et le diffus du cercle de l'horizon.

Le diffus isotrope du ciel est donné par la formule suivante :

$$ID_i^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_{i'}) \cdot \frac{1 + \text{Sin}(\chi)}{2} \quad (\text{I.36})$$

Avec : $\delta_i = ID^h(\gamma_s, T_L) - \delta_d \cdot \text{Sin}(\gamma_s)$ (I.37)

δ_i est la composante isotrope, elle correspond à un ciel de luminance uniforme.

Puisque le diffus du sol est rétrodiffusé, c'est-à-dire qu'une partie est diffusée à nouveau par le ciel vers le sol, Capderou a ajouté une composante $\delta_{i'}$:

Avec : $\delta_{i'} = 0.9 \cdot (\rho_g - 0.2) \cdot IB^h(\gamma_s, T_L) \cdot \exp\left(-\frac{4}{\sqrt{T_L'}}\right)$ (I.38)

Le diffus directionnel est donné en fonction de δ_d par la formule suivante :

$$ID_d^i(\gamma_s, T_L) = \delta_d \cdot \text{Cos}(\delta') \quad (\text{I.39})$$

δ_d est la composante directe ou circumpolaire, elle provient du voisinage du soleil, dans un cône de demi angle. La formule donnant la composante du diffus directionnelle est représentée par l'équation suivante :

$$\delta_d = G_O \cdot \exp\left[-2.48 - \text{Sin}(\gamma_s) + a_1 - \sqrt{4 \cdot b_1^2 + a_1^2}\right] \quad (\text{I.40})$$

Avec : $b_1 = \log(T_L') - 2.28 - 0.5 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)]$ (I.41)

$$a_1 = 3.1 - 0.4 \cdot b_1 \quad (I.42)$$

Le diffus du cercle de l'horizon est donné par la formule suivante :

$$ID_h^i(\gamma_s, T_L) = \delta_h \cdot \text{Cos}(\chi) \quad (I.43)$$

δ_h : composante du cercle de l'horizon, elle provient du cercle de l'horizon d'une hauteur de 6° , elle semble associée à une accumulation d'aérosols dans les basses couches atmosphériques. La formule donnant la composante δ_h est représentée par l'équation suivante :

$$\delta_h = G_O \cdot \frac{-0.02 \cdot a_2}{a_2^2 + a_2 \cdot b_2 + 1.8} \cdot \exp[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (I.44)$$

$$\text{Avec : } b_2 = \exp\{0.2 + 1.75 \cdot \log[\text{Sin}(\gamma_s)]\} \quad (I.45)$$

$$a_2 = \log(T_L) - 3.1 - \log[\text{Sin}(\gamma_s)] \quad (I.46)$$

Donc le diffus du ciel est exprimé d'une manière générale par-là l'équation suivante :

$$ID_{\text{ciel}}^i(\gamma_s, T_L) = (\delta_i + \delta_i') \cdot \frac{1 + \text{Sin}(\chi)}{2} + \delta_d \cdot \text{Cos}(\delta^i) + \delta_h \cdot \text{Cos}(\chi) \quad (I.47)$$

Finalement, l'éclairage diffus total s'écrit sous la forme de quatre composantes:

$$ID^i(\gamma_s, T_L) = ID_i^i(\gamma_s, T_L) + ID_d^i(\gamma_s, T_L) + ID_h^i(\gamma_s, T_L) + ID_a^i(\gamma_s, T_L) \quad (I.48)$$

La figure I. 23 représente la variation de l'éclairage direct, diffus et global un plan incliné de site Ghardaïa dans un jour 1 janvier.

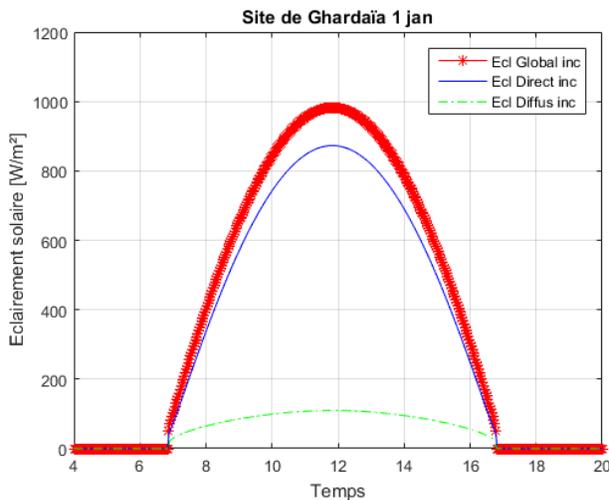


Figure I.23 : Variations de l'éclairage direct, diffus et global un plan incliné.

I.6. Validation de la partie de modélisation de l'éclairage solaire

I.6.1. Comparaison entre valeurs du rayonnement solaire pour deux régions de l'Algérie

La figure I.24 représente un exemple de variation du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été pour les deux sites Ghardaïa et Tamanrasset. On peut remarquer que le rayonnement global est supérieur au rayonnement direct normal pour les deux sites. On remarque également que le rayonnement direct est supérieur au site de Tamanrasset par rapport au site de Ghardaïa, ceci est justifier par le faite que le site de Tamanrasset possède un ciel clair (moins de troubles) par rapport aux autres sites de l'Algérie.

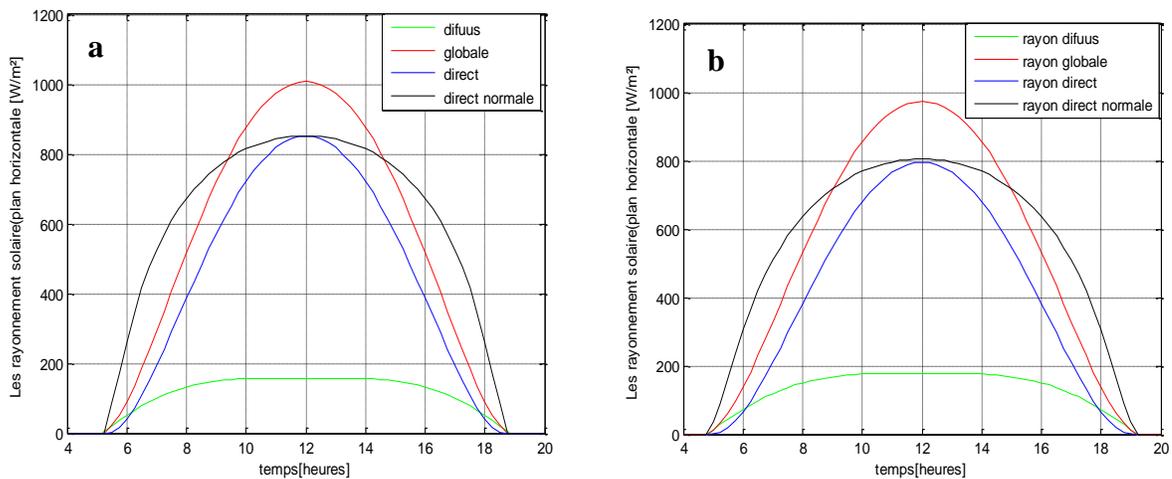


Figure I.24: Variations des valeurs du rayonnement solaire en fonction de temps au solstice d'été (21 Juin): (a) site de Tamanrasset; (b) site de Ghardaïa.

I.6.2. Validation et discussion des résultats

Pour obtenir une validation du rayonnement solaire, nous allons confronter quelques valeurs du rayonnement solaire délivrées par la programmation du modèle Capderou et les valeurs mesurées sur le site de Ghardaïa. Deux dates sont retenues pour être présentées, une période hivernale du 11 Décembre pour le jour le plus court de l'année et une autre estivale correspondante au 30 Juin pour le jour le plus long de l'année. On présentera sur les figures suivantes (Fig I.25 - I.26), des graphes comparatifs relatifs aux résultats du rayonnement solaire, pour une journée hivernale et estivale :

- Jour d'été avec $(\alpha, \beta) = (0, 0)$: Global horizontal (IG_h) et Direct horizontal (IB_h)

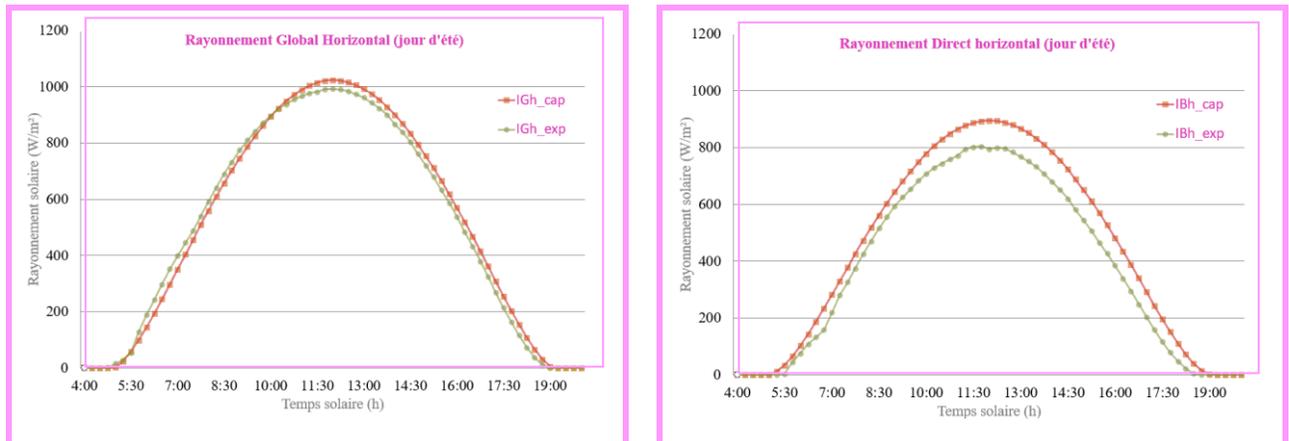


Figure I.25: Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'été.

- Jour d'hiver avec $(\alpha, \beta) = (0, 0)$: Global horizontal (IG_h) et Direct horizontal (IB_h)

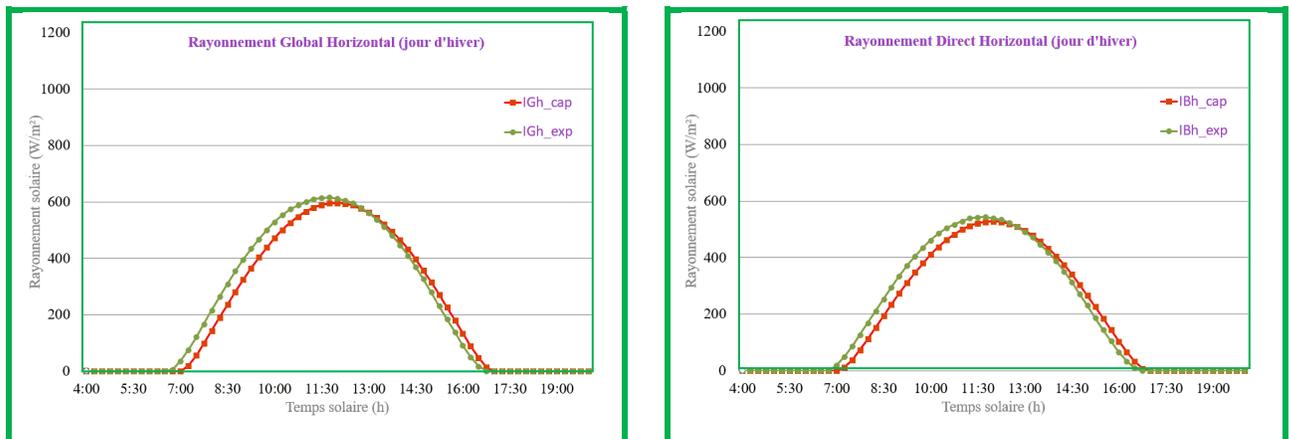


Figure I.26: Comparaison des résultats obtenus par le modèle avec les données expérimentales pour le rayonnement global et direct horizontal pour un jour clair d'hiver.

Pour une période estivale (Fig I.25), on remarquera que le modèle Capderou sur-estime la composante directe horizontale et le rayonnement global avec une petite erreur. Par ailleurs, en période hivernale (Figures I.26), le modèle Capderou présente un bon rapprochement de valeurs mesurées. Le traitement des graphes des figures (I.25-I.26) montre que d'une manière générale, on peut dire que le modèle de Capderou donne une bonne estimation du rayonnement solaire pour la période hivernale par rapport à la période estivale pour le site de Ghardaïa.

I.7. Conclusion

L'énergie solaire est une énergie disponible en tout temps, ne dépend d'aucune autre source d'énergie. L'Algérie dispose du plus grand gisement solaire du bassin méditerranéen. Le total d'énergie reçue est estimé à 169 400 TWh/an, soit 5000 fois la Consommation d'électricité annuelle du pays. L'exploitation de l'énergie solaire et l'optimisation de sa collecte par les systèmes solaire thermique nécessite une connaissance exacte de la distribution de l'irradiation solaire, qui est fonction de plusieurs paramètres géographiques, météorologiques et astronomiques, sur le lieu d'implantation de ce système.

Dans ce chapitre, nous avons que éclairement solaire est l'élément de base dans la conversion d'énergie rayonnée en énergie thermique ou photovoltaïque, la mesure de ce paramètre ce fait avec des éléments très développés et précis, les plus connus sont le pyranomètre et pyréliomètre que nous avons présenté dans ce chapitre. Une modélisation du rayonnement solaire par le modèle Capderou est présentée, les transmittances nécessaires pour le calcul des composantes du rayonnement solaire par ciel clair, incident sur un plan horizontal et incliné sont programmées avec Matlab et leur variation est illustrée sous formes graphiques.

CHAPITRE II

Les systèmes de production d'eau chaude solaire (CES)

I.1. Introduction

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 est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire. Il dispose en effet sur un territoire d'un gisement solaire considérable. Il est donc du plus grand intérêt pour un pays comme l'Algérie de pouvoir estimer les potentialités offertes par un tel type d'énergie et d'identifier les moyens de s'en servir et l'intégrer dans la stratégie de la politique énergétique du pays [27].

Une des applications les plus intéressantes de l'énergie solaire, le chauffage de l'eau solaire est actuellement l'application la plus rentable de cette énergie et donc celle qui a la plus grande chance de se développer à court terme. Dans ce premier chapitre, une étude sur les chauffe-eau solaires sera présentée, depuis la source primaire qui est l'éclairement solaire jusqu'à l'architecture du système de production d'eau chaude, son principe de fonctionnement et ces différents types. La méthode de dimensionnement des chauffe-eau solaires dite 'f-Chart' est aussi présentée.

I.2. Le chauffe-eau solaire

I.2.1. Définition

Le chauffage solaire permet de chauffer de l'eau chaude sanitaire ou d'assurer le chauffage de la maison ou d'autres locaux. Le chauffage solaire est un des chauffages des plus économiques et des plus écologiques car l'énergie solaire est gratuite sur tous les toits. Certes, l'ensoleillement des panneaux solaires ne correspond pas toujours à l'appel des besoins d'eau chaude sanitaire ou de chauffage. Pour cela, tout chauffage solaire comportera généralement un stockage ou ballon solaire. De plus et si la capacité solaire ne suffit pas, il faut obligatoirement faire appel à une énergie d'appoint. Que celle-ci soit électrique (exemple chauffe-eau électro-solaire) ou que celle-ci soit apportée par une chaudière ou une pompe à chaleur [28].

I.2.2. Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire

CHAPITRE II : Les systèmes de production d'eau chaude solaire (CES)

Le principe du chauffe-eau solaire est très simple : chacun connaît les effets d'un tuyau d'arrosage plein d'eau abandonné au soleil... au bout de quelques heures, la température de l'eau s'élève, plus le tuyau est sombre, plus l'eau est chaude et serait même brûlante si le tuyau était placé sous une vitre. C'est simple, fiable, efficace : Le moindre rayon de soleil est une source de calories gratuites et sans rejets dans l'atmosphère. C'est là le principe du chauffe-eau solaire [29].

Les composants (Fig II.1) les plus importants du chauffe-eau sont :

1. Le capteur solaire.
2. Le circuit primaire
3. L'échangeur thermique
4. Le liquide refroidi, repart vers le capteur
5. Le ballon de stockage
6. L'eau froide du réseau
7. Le circulateur

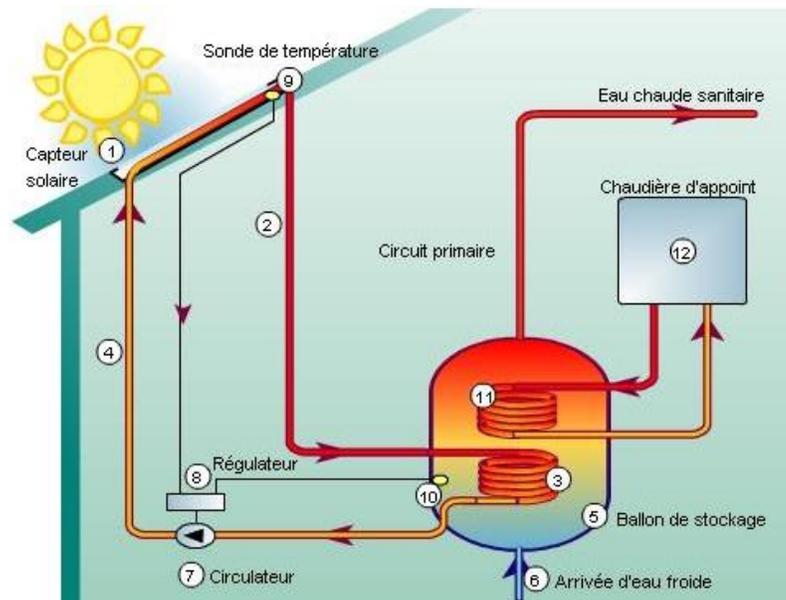


Figure II.1 : fonctionnement d'un chauffe-eau solaire [29].

I.2.3. Type des chauffe-eau solaires

I.2.3.1. Le chauffe-eau solaire Monobloc

Les Capteurs et le ballon sont groupés sur un même châssis rigide et placés à l'extérieur (Fig II.2). Ils peuvent être installés en toiture, sur terrasse ou au sol et fonctionnent sans électricité.

Ce système est simple et peu coûteux. Mais le ballon se refroidit plus rapidement, même s'il est bien isolé. Il peut servir à préchauffer l'eau qui alimente un équipement classique existant.

Ce chauffe-eau est compact et bien adapté à la pose sur supports inclinés, en toiture-terrasse. Il se prête moins bien à la fixation sur un toit en pente.

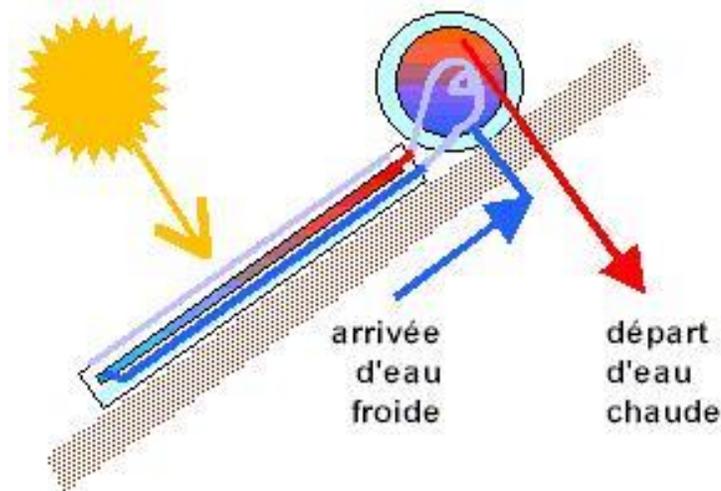


Figure II.2 : Schéma de principe du CES monobloc [30].

Le tableau ci-dessous (tableau II.1) présente les avantages et les inconvénients du chauffe-eau solaire Monobloc :

Tableau II.1 : Avantages et inconvénients du chauffe-eau solaire Monobloc [31].

Avantages	Inconvénients
✓ peu coûteux.	✓ Intégration peu esthétique.
✓ facilité de fonctionnement et de mise en œuvre.	✓ risqué de gel.
✓ système autonome (présence de soleil).	

I.2.3.2. Le chauffe-eau solaire Thermosiphon

Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce à la différence de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs. Les capteurs et le ballon sont assemblés en un seul composant, l'installation est simple, le fonctionnement est autonome (Fig II.3), Les inconvénients sont les pertes thermiques importantes et son intégration architecturale difficile. Ce type de système est utilisé pour la production d'eau chaude pour des maisons individuelles situées souvent en milieu rural. Les risques de pannes sont faibles, les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes [16].

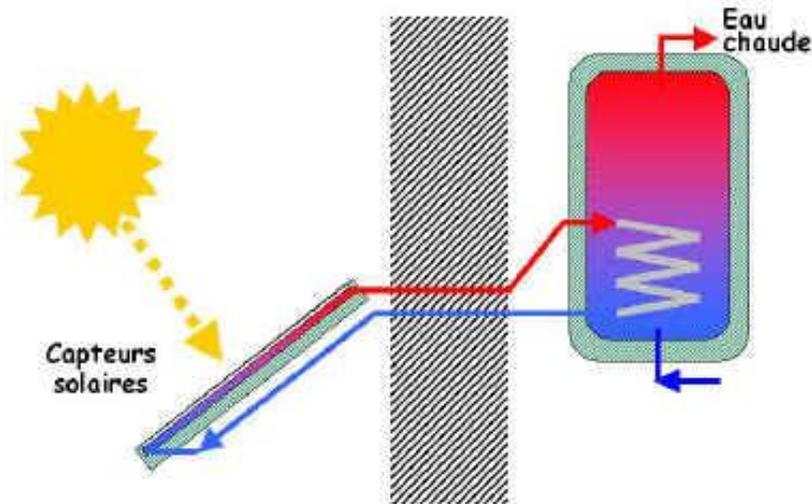


Figure II.3 : Le chauffe-eau solaire thermosiphon [32].

Le tableau ci-dessous (tableau II.2) présente les avantages et les inconvénients du chauffe-eau solaire thermosiphon :

CHAPITRE II : Les systèmes de production d'eau chaude solaire (CES)

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients du chauffe-eau solaire thermosiphon [31].

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none">✓ système peu coûteux,✓ fonctionnement du système autonome,✓ risque de panne très faible du fait de l'absence de régulation, de sonde et de besoin d'électricité,✓ système le plus avantageux dans le cas d'un site isolé en électricité.	<ul style="list-style-type: none">✓ obligation de positionner les capteurs plus bas que le ballon de stockage,✓ distance entre les capteurs et le ballon très faible,✓ peu de fabricants proposent ce système.

I.2.3.3. Le chauffe-eau solaire à circulation forcée

Ce type de chauffe-eau solaire “à circulation forcée” est adapté à toutes les différentes configurations. Ainsi, le ballon peut être éloigné des capteurs. Il est plus cher que les systèmes précédents à cause des équipements supplémentaires. En effet, il faut une pompe pour transférer la chaleur des capteurs au ballon (Fig II.4), ainsi qu’un système de régulation électronique. La plupart des fabricants proposent un “groupe de transfert” qui regroupe tous ces équipements annexes [33].

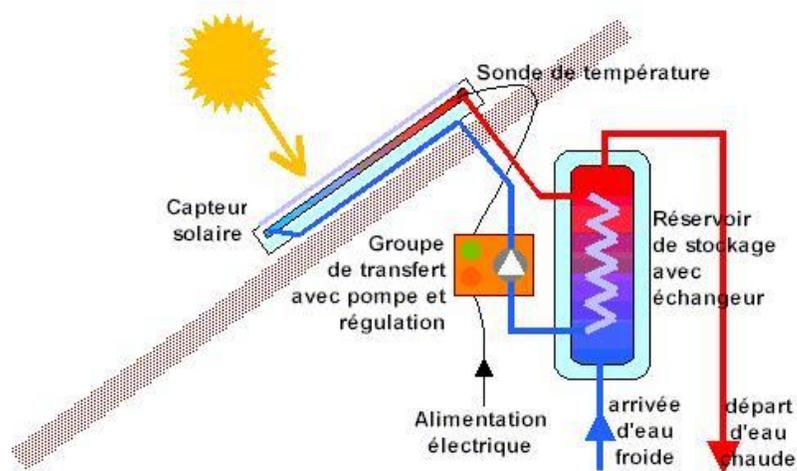


Figure II.4 : Le chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Le tableau ci-dessous (tableau II.3) présente les avantages et les inconvénients du chauffe-eau solaire à circulation forcée :

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients du chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Avantages	Inconvénients
✓ système adapté à toutes les configurations d'habitat,	✓ nécessité d'une régulation différentielle pilotant un circulateur,
✓ risques de pannes faibles,	✓ besoin d'une alimentation électrique,
✓ système performant,	✓ nécessité d'un liquide caloporteur antigel (de qualité alimentaire).
✓ contrôle en température du ballon.	

I.3. Les composants d'un chauffe-eau solaire

Les chauffe-eau solaires constitués de trois composants essentiels :

- Un capteur solaire plan,
- Une cuve de stockage d'eau chaude,
- Un circuit hydraulique qui peut être une simple canalisation dans le cas d'un système à thermosiphon ou bien doté d'une pompe de circulation dans le cas d'un système actif.

I.3.1. Le capteur plan solaire

Le capteur solaire plan est un dispositif conçu pour recueillir l'énergie transportée par les radiations solaires, la convertir en énergie calorifique et la transmettre à un fluide caloporteur, il combine deux principes physiques : les effets de serre et le corps noir. Les capteurs plans peuvent assurer des températures variant de 30°C à 150°C et ne nécessitent ni concentration du rayonnement incident, ni un suivi du soleil.

Le niveau relativement bas de la température du capteur plan est dû à la réémission par rayonnement du récepteur, et les pertes de chaleur périphérie du capteur [34].

I.3.2. La cuve de stockage

La cuve de stockage est un élément essentiel dans l'installation de chauffage d'eau solaire. Comme son nom l'indique, elle permet de stocker l'eau chaude venant des capteurs pour la restituer au moment des besoins d'utilisation, elle peut contenir ou non un échangeur de chaleur (Fig II.5) [33].

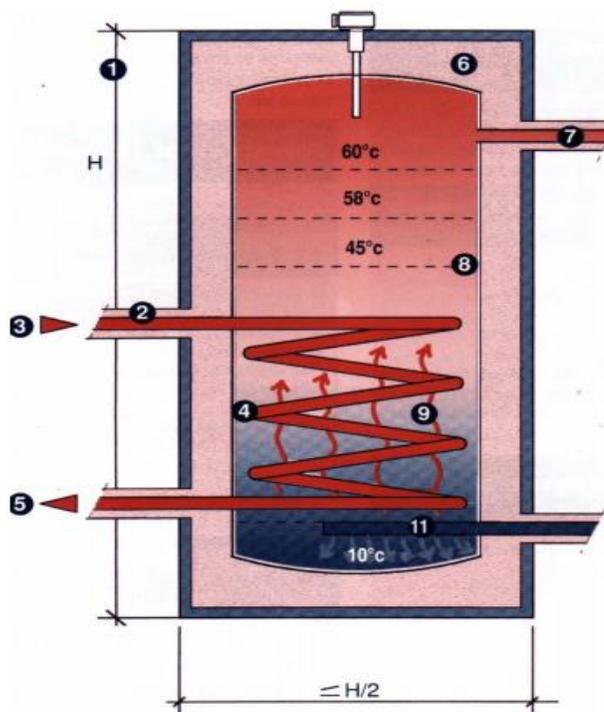
CHAPITRE II : Les systèmes de production d'eau chaude solaire (CES)

Aussi pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur, la cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique et économique adéquate. Le stockage est caractérisé par :

- ✓ Le mode d'accumulation de chaleur (sensible ou latente),
- ✓ La capacité thermique du stock,
- ✓ Les pertes thermiques du stockage.

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Stockage long durée (inter- saisonnier),
- Stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures).



- 1: Hauteur
- 2: Isolation
- 3: Arrivée chaudière
- 4: Circuit primaire
- 5: Retour chaudière
- 6: Isolation (8 à 16 cm)
- 7: Sortie eau chaude
- 8: Surface d'échange min entre eau froide et chaude.
- 9: circuit primaire et eau sanitaire
- 10: Entrée eau froide
- 11: Casse jet, réduit vitesse arrivée eau.

Figure II.5 : La cuve de stockage avec échangeur.

I.3.3. Le groupe de transfert

Le groupe de transfert est composé de tous les éléments nécessaires pour transférer la chaleur des capteurs à l'unité de stockage dans les meilleures conditions. Il est composé d'une pompe pour faire circuler le fluide caloporteur, d'un ensemble de capteurs de température et d'un système de régulation pour mettre en marche la pompe quand cela est nécessaire [26].

I.4. Les types de capteurs solaires

Il existe différents types de capteurs solaires thermiques selon le type d'application considérée, la nature de l'élément caloporteur utilisé et le niveau de température qu'ils permettent d'atteindre. Le type d'application peut aller du chauffage d'une piscine avec un capteur léger, à une centrale solaire thermodynamique produisant de l'électricité. Le fluide caloporteur peut être de l'air, de l'eau, un mélange antigel, un fluide à changement de phase, une huile qui se ne dégrade pas à haute température. La majeure partie des applications est celle du chauffage de l'eau sanitaire et celui du chauffage des locaux, avec des fluides caloporteurs liquides. Les capteurs à liquide se répartissent en trois familles [35] :

I.4.1. Le capteur plan vitré

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eaux des hôtels, des hôpitaux, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare.

I.4.2. Le capteur sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents (Fig II.6) en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a 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 et l'absorbeur reçoit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

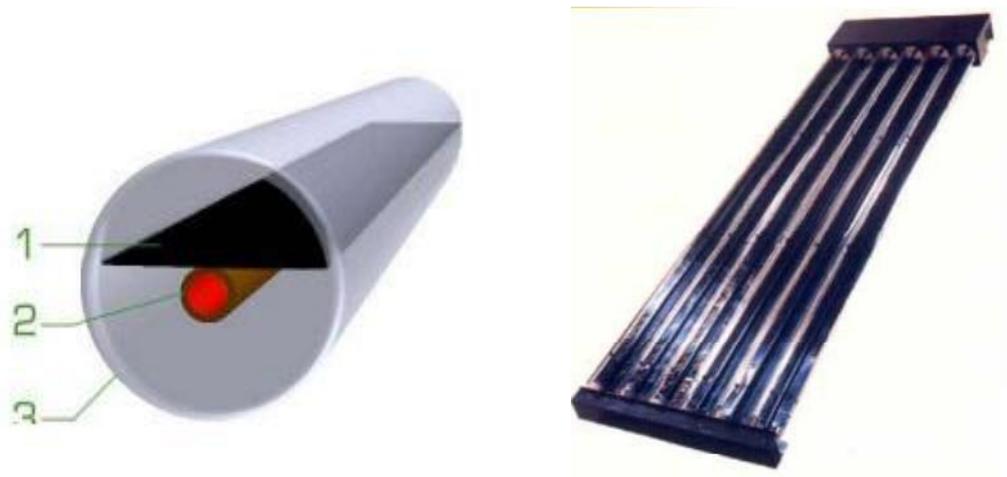


Figure II.6: Capteur sous vide.

1. Absorbeur,
2. Echangeur,
3. Tube transparent.

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;
- b. Le capteur à tube sous vide à " Caloduc"
- c. Le capteur à tube sous vide à effet "Thermos"
- d. Le capteur à tube sous vide "Schott".

I.4.3. Le capteur plan sans vitrage

Par exemple les capteurs moquette, d'une structure très simple réseau de tubes plastiques noirs (Fig II.7) , utilisés essentiellement pour le chauffage de l'eau des piscines, en été , ou les capteurs non-vitrés à revêtement sélectif, à irrigation totale, en acier inoxydable, utilisés essentiellement pour le préchauffage d'eau chaude sanitaire, le chauffage basse température plancher chauffant et le chauffage des piscines .



Figure II.7: Le capteur plan sans vitrage.

I.4.4. Description d'un capteur

Un capteur solaire classique, est composé de plusieurs éléments :

- Une couverture transparente qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent (pertes par convection avec l'air extérieur) ;
- Un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant + un système de transfert de chaleur dans le fluide caloporteur (l'absorbeur) ;
- Une isolation thermique arrière et latérale.

Le schéma d'un capteur thermique avec ses différents éléments de construction est donné sur la figure (Fig II.8).

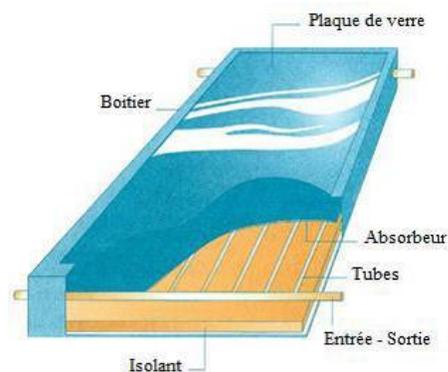


Figure II.8: Schéma d'un capteur thermique avec ses différents éléments de construction .

I.5. L'appoint énergétique [36]

I.5.1. L'appoint intégré

I.5.1.1. Appoint intégré électrique

Une résistance électrique est placée à l'intérieur du ballon (Fig II.9) et permet de réchauffer l'eau quand cela est nécessaire.

Avantage :

- ✓ Solution simple, facile à utiliser et à programmer (notamment en heure creuse),
- ✓ Coût d'investissement raisonnable, inférieur à l'appoint à gaz : vous n'avez pas besoin de chaudière !
- ✓ Si vous chauffez votre maison avec une chaudière, vous pourrez l'éteindre l'été : elle ne servira pas pour l'eau chaude sanitaire.

Inconvénient :

- ✓ L'énergie électrique coûte cher.
- ✓ Prenez en compte votre équipement de chauffage :
- ✓ Si vous chauffez avec une chaudière (gaz, bois...) : il est probable que vous puissiez utiliser votre chaudière pour servir d'appoint au ballon solaire. On parle alors d'appoint hydraulique,
- ✓ L'appoint électrique est une solution évidente si vous vous chauffez grâce à l'électricité : mais chauffer à l'électricité coûte cher...

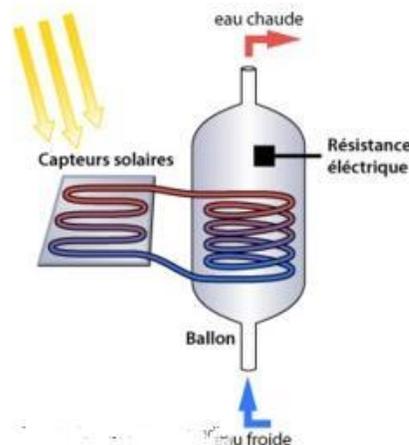


Figure II.9: L'appoint électrique.

I.5.1.2. Appoint intégré hydraulique

Un serpentin en cuivre, échangeur de chaleur relie le ballon solaire à la chaudière. Ce serpentin est parcouru par de l'eau déjà chaude, chauffé grâce à votre chaudière de chauffage central.

Cette chaudière est une chaudière classique fonctionnant au gaz, au fioul ou au bois. La circulation de l'eau entre le ballon solaire et la chaudière est stoppée lorsque la température est suffisamment élevée (période d'ensoleillement correct).

Avantage :

- ✓ Permet d'avoir un équipement cohérent pour le chauffage et l'eau chaude sanitaire :
- ✓ La chaudière est utilisée à la fois pour le chauffage et l'eau sanitaire.
- ✓ Se chauffer avec une chaudière est plus économique qu'un chauffage électrique, notamment avec : Une Chaudière à bois, Une Chaudière gaz basse condensation

Inconvénient :

- ✓ Investissement plus élevé que l'appoint électrique :
 - ❖ Le chauffe-eau solaire à appoint hydraulique coûte un peu plus cher que le chauffe-eau à appoint électrique.
 - ❖ Achat de la chaudière si vous ne l'avez pas déjà.
- ✓ Vous devrez garder votre chaudière allumée l'été pour fonctionner quand l'ensoleillement fait défaut.
- ✓ La programmation de la chaudière est assez compliquée.

I.5.1.3. Appoint intégré mixte (électrique et hydraulique)

Une très bonne solution :

- ✓ Appoint hydraulique (Fig II.10) lorsque votre chaudière est allumée (quand vous chauffez en hiver).
- ✓ Appoint électrique l'été ce qui vous permet d'éteindre votre chaudière.

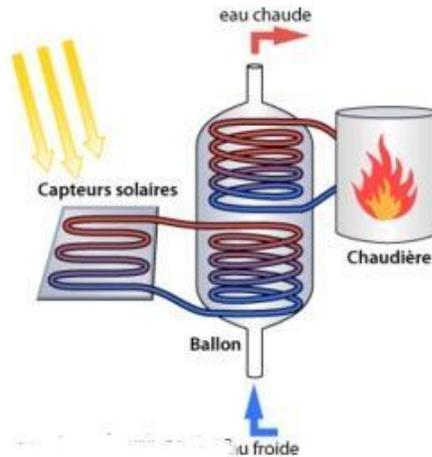


Figure II.10: L'appoint intégré hydraulique

I.5.2. L'appoint séparé

On parle d'appoint séparé (Fig II.11) lorsque le dispositif d'appoint existe hors du ballon d'eau chaude solaire :

- ✓ Il consiste alors le plus souvent en un deuxième chauffe-eau fonctionnant à l'électricité, bois, au gaz, ou au fioul.
- ✓ 2 utilisations possibles :
 - ❖ Vous utilisez en priorité le chauffe-eau solaire, et quand il ne fait pas assez beau, vous utilisez le chauffe-eau électrique ou gaz.
 - ❖ En série : le chauffe-eau solaire pré chauffe l'eau qui est ensuite conduite vers le deuxième chauffe-eau électrique ou à gaz.

C'est une bonne solution notamment si vous avez déjà un ballon traditionnel et que vous souhaitez le compléter par du solaire :

- ✓ Vous gardez votre ballon actuel.
- ✓ Vous achetez un ballon solaire (sans appoint intégré).

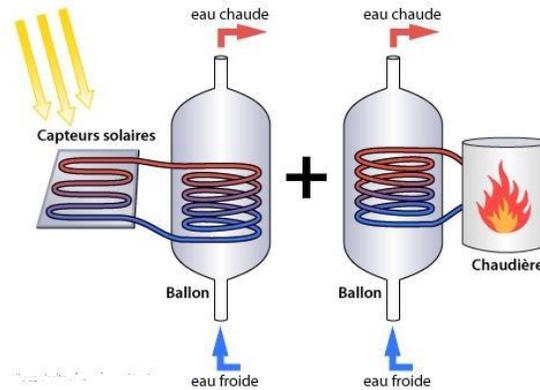


Figure II.11: L'appoint séparé

I.5.3. L'appoint en série

En série : le chauffe-eau solaire pré chauffe l'eau qui est ensuite conduite vers le deuxième chauffe-eau électrique (Fig II.12) ou à gaz.

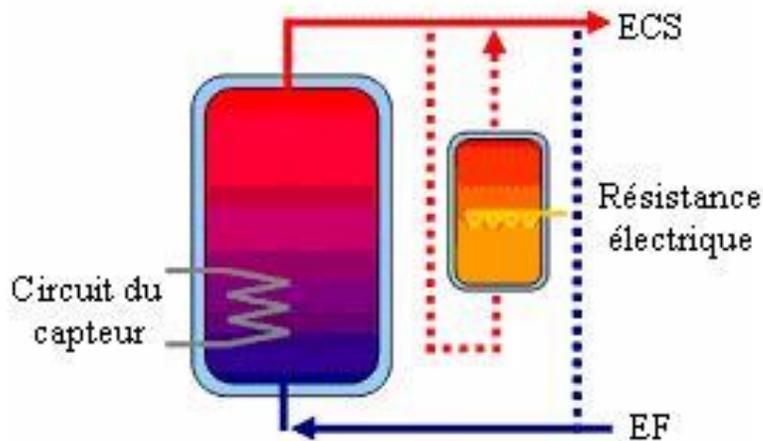


Figure II.12 : L'appoint en série.

I.6. Dimensionnement des chauffe-eau solaires (Méthode f -Chart) [26]

Il n'est pas réaliste de vouloir couvrir 100 % des besoins d'eau chaude sanitaire en utilisant seulement l'énergie solaire. Une installation solaire sera donc toujours couplée avec un système appoint utilisant une autre source d'énergie: gaz, électricité...

Le dimensionnement de l'appoint vise à assurer :

- ❖ Le service en eau chaude en toutes circonstances;
- ❖ La meilleure répartition possible entre solaire et appoint.

C'est un problème complexe qui nécessite l'utilisation d'outils de calcul spécifiques afin de produire un maximum d'énergie solaire à un coût compétitif. En effet, le coût du kWh produit dépend essentiellement de deux paramètres :

- ❖ Le coût de l'installation par m² de capteur;
- ❖ La productivité de l'installation (production par m² de capteur et par an).

La productivité des capteurs n'est pas définissable de façon simple. Elle décroît quand la surface des capteurs croît. En conséquence, toute augmentation de la surface de capteurs au-delà de la taille optimale de l'installation entraîne une augmentation de la production solaire mais aussi une augmentation du coût du kWh produit. Le mauvais dimensionnement d'un des autres composants du système (stock, échangeur, circuits, régulation) peut pénaliser sensiblement cette productivité.

Le rendement d'un système de production d'eau chaude sanitaire avec stockage peut être évalué grâce à la méthode de calcul du taux de recouvrement de la charge par l'énergie solaire (*fraction solaire f*) dite méthode *f-Chart*. Cette méthode permet de calculer, sur une base mensuelle, la quantité d'énergie fournie par un système de chauffage solaire avec stockage, en fonction des valeurs mensuelles de l'éclairement solaire incident et de la charge de chauffage, en connaissant la température ambiante et la température de l'eau froide.

I.6.1. Calculs préliminaires

I.6.1.1. Estimation de la température d'eau froide

La température de l'eau froide fournie par le réseau de distribution permet de calculer les besoins d'énergie pour chauffer à la température désirée la quantité d'eau chaude voulue.

Un profil sinusoïdal est généré à partir des températures minimale et maximale spécifiées par l'utilisateur, Ainsi, la température moyenne de l'eau froide T_m s'exprime en fonction de la température minimale T_{min} , de la température maximale T_{max} et du numéro du mois M :

$$T_m = \frac{T_{min} + T_{max}}{2} - \left[\frac{T_{max} - T_{min}}{2} * h * \cos \left(2\pi * \frac{M - 2}{12} \right) \right] \quad (\text{II.1})$$

Où : h égal à (+1) en l'hémisphère Nord et (-1) en l'hémisphère Sud.

I.6.1.2. Estimation du volume de stockage

Pour surmonter un ou deux jours non ensoleillés tout en continuant à consommer l'eau chaude provenant de l'énergie solaire, il faut prévoir un volume du réservoir de stockage correspondant à 1.5 ou 2 fois la consommation quotidienne en eau chaude sanitaire.

Pour définir la consommation journalière en eau chaude sanitaire d'une famille, il suffit de calculer la moyenne journalière de plusieurs semaines de références au printemps ou en automne (éviter l'hiver où la consommation est trop élevée et l'été où on consomme moins d'eau chaude).

Il y'a d'autres méthodes théoriques d'estimation de cette consommation, elle sont néanmoins toutes inexactes. En littérature, la consommation journalière en eau chaude (environ 42 °C) par personne peut être divisée en trois catégories :

- ❖ Basse consommation : 30 à 40 litres;
- ❖ Consommation moyenne : 40 à 70 litres;
- ❖ Haute consommation : 70 à 120 litres.

I.6.1.3. Estimation des besoins en chauffage de l'eau

Pour calculer la quantité d'énergie journalière L (en kWh) nécessaires à la production d'eau chaude sanitaire, il faut d'abord connaître les volumes d'eau chaude à produire. La quantité réelle d'énergie nécessaire pour produire l'eau chaude sanitaire est calculée comme étant la quantité d'énergie nécessaire pour chauffer ce volume d'eau de la température de l'eau froide jusqu'à la température demandée, cette énergie est donnée par:

$$L = C_p \cdot \rho \cdot V \cdot (T_w - T_m) \quad (\text{II.2})$$

Où : C_p : Capacité calorifique de l'eau égale à 1.167 Wh/kg ou 4190 J/kg

ρ : Masse volumique d'eau (1 kg/L);

V : Volume d'eau chaude à soutirer;

T_w : Température d'eau chaude demandée;

T_m : Température d'eau froide.

I.6.1.4. Estimation de la surface et du nombre des capteurs solaires

La surface des capteurs solaires dépend des besoins d'énergie, du type de système et du type de capteur solaire. Pour la production d'eau chaude sanitaire avec stockage, l'évaluation de la surface des capteurs théoriquement nécessaire; en se basant sur les données de l'éclairement solaire du site, s'obtient comme suit:

$$S_{cap} = \frac{L_{pd}}{EG_{an}^i} \quad (\text{II.3})$$

Où :

Où : EG_{an}^i : Energie annuelle reçue par un capteur plan incliné (kWh/m²);

L_{pd} : Besoins en chauffage incluant le degré annuel d'utilisation du système (33 %) et les pertes en circulation, estimées à 20 %.

Un tel calcul suppose que cette surface de capteur plan couvre 100 % des besoins en énergie pour l'eau chaude durant toute l'année. Or, en pratique ceci n'est pas possible: une installation de surface calculée répondant au besoin d'une famille dépasse de loin les dimensions durant l'été et le degré de rendement est bien au-dessus du rendement moyen. En hiver par contre, la surface des capteurs ne répond pas au besoin en énergie. Le choix recommandable est la surface optimale qui est donnée; en Europe par la moitié de la surface théoriquement nécessaire. En Algérie, nous avons constaté que la surface donnée par l'équation (II.4) est recommandable, ce choix est justifié par la quantité d'énergie solaire annuelle, reçue par le territoire national; qui est largement supérieure à celle de l'Europe, notamment au Sud du pays.

$$S_{opt} = S_{cap}/3 \quad (\text{II.4})$$

Le nombre de capteurs solaires est calculé en fonction de la surface optimale des capteurs proposées, divisée par la surface d'un capteur individuel, arrondie à la valeur entière la plus proche.

I.6.2. Description de la méthode *f*-Chart

I.6.2.1. Calcul des variables *X* et *Y*

Pour calculer la fraction d'énergie solaire *f*, deux nombres sans dimension *X* et *Y* sont définis :

$$X = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot U_L \cdot (T_{ref} - \bar{T}_a)}{L} \quad (II.5)$$

$$Y = \frac{A_c \cdot F'_R \cdot (\bar{\tau}\alpha) \cdot EG^i \cdot N_m}{L} \quad (II.6)$$

Les équations (II.5) et (II.6) peuvent s'écrire comme suite :

$$X = F'_R \cdot U_L \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot (T_{ref} - \bar{T}_a) \cdot \frac{A_c}{L} \quad (II.7)$$

$$Y = F_R (\tau\alpha)_n \cdot \frac{F'_R}{F_R} \cdot \frac{(\bar{\tau}\alpha)}{(\tau\alpha)_n} \cdot EG^i \cdot N_m \cdot \frac{A_c}{L} \quad (II.8)$$

Où : A_c : Surface des capteurs;

F'_R : Facteur modifié d'évacuation de la chaleur du capteur solaire;

U_L : Coefficient global de pertes thermiques;

T_{ref} : Valeur empirique de référence égale à 100 °C;

\bar{T}_a : Moyenne mensuelle de la température ambiante;

$\bar{\tau}\alpha$: Moyenne mensuelle du produit de la transmissivité et de l'absorptivité du capteur;

EG^i : Energie quotidienne reçue sur le plan des capteurs /m²;

N_m : Nombre de jours dans le mois.

Le rapport F'_R / F_R est une fonction du rendement de l'échangeur ε_{ch} donné par :

$$\frac{F'_R}{F_R} = \left[1 + \left(\frac{A_c \cdot F_R \cdot U_L}{(\dot{m} \cdot C_p)_c} \right) \left(\frac{(\dot{m} \cdot C_p)_c}{\varepsilon_{ch} \cdot (\dot{m} \cdot C_p)_{min}} - 1 \right) \right]^{-1} \quad (II.9)$$

Où \dot{m} est le débit du fluide caloporteur et C_p sa capacité calorifique. L'indice c indique du côté du capteur. L'indice min indique minimum des valeurs du côté du capteur et du côté du réservoir de stockage.

Le rapport $(\overline{\tau\alpha})/(\tau\alpha)_n$ représente la propriété $(\tau\alpha)$ rapporté à sa valeur sous incidence normale, elle est donnée par l'équation (II.10)

$$\frac{(\overline{\tau\alpha})}{(\tau\alpha)_n} = \frac{\overline{S}}{EG^i(\tau\alpha)_n} \quad (\text{II.10})$$

$F_R U_L$ et $F_R(\tau\alpha)_n$ sont généralement spécifiés par le constructeur, résultats du standard de test sur les capteurs plans, un exemple est celui du standard ASHRAE 93-86 qui donne le standard test à réaliser pour la détermination des performances du capteur thermique. La procédure générale est que les tests se font sous des conditions presque stables et de relever les données nécessaires pour l'analyse. Bien que les détails soient différents, les traits essentiels de toutes les procédures peuvent être résumés par la mesure de la température d'entrée et de sortie du fluide, le débit, la vitesse du vent et l'éclairement par un pyranomètre.

I.6.2.2. Calcul des variables X corrigés

X doit être corrigé à la fois en fonction de la dimension du stockage et de la température de l'eau froide. La méthode *f-Chart* a été développée avec une capacité de stockage standard de 75 litres par m^2 de capteur solaire. Pour les autres capacités de stockage, X doit être multiplié par un facteur correctif (X_c / X) défini par :

$$\frac{X_c}{X} = \left(\frac{\text{Volume réel de stockage}(V_r)}{\text{Volume standard de stockage}(V_s)} \right)^{-0.25} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Valable si :} \quad 0.5 < \frac{V_r}{V_s} < 4 \quad (\text{II.12})$$

Pour prendre en considération les fluctuations de la température de l'eau froide T_m et pour avoir une température de l'eau chaude minimale acceptable T_w (les deux ayant une influence sur la performance du chauffe-eau solaire) X doit être multiplié par un facteur correctif (X_{cc} / X) défini par :

$$\frac{X_{cc}}{X} = \frac{11.6 + (1.18 * T_w) + (3.86 * T_m) - (2.32 * T_a)}{100 - T_a} \quad (\text{II.13})$$

I.6.2.3. Calcul de la fraction solaire f

La fraction f de la charge de chauffage totale mensuelle couverte par le chauffe-eau solaire est donnée en fonction de Y et X corrigé de la manière suivante:

$$f = (1.029 * Y) - (0.065 * X) - (0.245 * Y^2) - (0.0018 * X^2) + (0.0215 * Y^3) \quad (II.14)$$

Il existe certaines limites strictes d'application de cette formule. Cependant, la figure (Fig II.13) montre que la surface décrite par l'équation (II.14) est assez lisse, donc l'extrapolation ne devrait pas être un problème. Si le résultat prédit que f est négatif, une valeur de 0 est utilisée; si f est supérieur à 1, une valeur de 1 est utilisée.

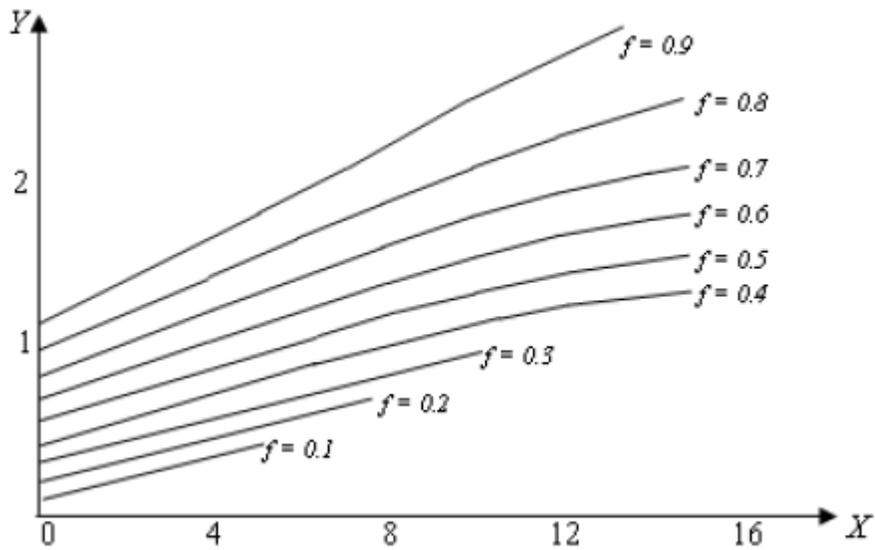


Figure II.13: F_Chart pour les systèmes utilisant un liquide pour le transfert de la chaleur.

I.6.3. Résultats de la méthode f -Chart

I.6.3.1. Calcul de l'apport solaire

L'apport solaire est tous simplement le produit de f obtenu de l'équation (II.14) par le besoin L issue de l'équation (II.02) :

$$fL = f \cdot L \quad (\text{II.15})$$

La production annuelle d'énergie au m^2 est simplement l'énergie fournie par le système divisée par la surface de capteur solaire.

I.6.3.2. Calcul de l'énergie d'appoint

L'appoint est égal à la différence entre le besoin L et l'apport solaire fL de l'équation (II.15) :

$$fP = L - fL \quad (\text{II.16})$$

I.6.3.3. Calcul du taux de recouvrement de la charge annuel

Connaissant L et fL , on peut calculer la fraction annuelle de l'énergie solaire fournie à la charge (taux de recouvrement de la charge annuelle) de la manière suivante :

$$F = \sum_{M=1}^{12} (fL / L) \quad (\text{II.17})$$

I.6.3.4. Calcul du rendement du chauffe-eau solaire

Le rendement du système solaire de production d'eau chaude (CES) est l'énergie fournie divisée par l'ensoleillement incident sur la surface totale des capteurs solaires. On notera qu'il s'agit uniquement du rendement (chaleur produite / solaire incident) du système solaire et que l'on ne tient pas compte de l'énergie électrique consommée par les pompes ou circulateurs. Pour les systèmes de production d'eau chaude, le rendement typique annuel varie de 30 à 50 %, selon, entre autres, les conditions climatiques, la taille du système et la charge de chauffage. En général, plus grand est le taux de recouvrement de la charge (fraction solaire élevée), plus bas sera le rendement du système.

$$\eta_{CES} = \sum_{M=1}^{12} [fL / (EG_{an}^i \cdot S_{opt})] \quad (\text{II.18})$$

I.7. Conclusion

Le dimensionnement du chauffe-eau Solaires en cas de calcul manuel prend beaucoup de temps et quelques erreurs, Pour résoudre ces problèmes, nous avons un logiciel utilisant une interface graphique Matlab 15 permettant de calculer le Dimensionnement du chauffe-eau solaire en Algérie sur la base du rayonnement solaire à l'aide d'un modèle Capderou. Ce travail contribue au développement du domaine de la production d'eau chaude solaire dans notre pays.

Notre pays en lançant les réformes est conscient que le développement des énergies renouvelables correspond à l'option d'un développement local valorisant les ressources existantes, favorisant l'emploi et répondant à une attente sociale en faveur d'un développement durable. Malgré les contraintes qui sont le prix du gaz, absence de subventions, absence d'usine de fabrication des équipements solaires, les taxes douanières...etc. Les tendances économiques, politiques et culturelles sont favorables au développement et à la croissance du marché du Chauffe-eau solaire dans le total respect de l'environnement. Un échange d'expériences entre l'Algérie et ses voisins, ainsi qu'avec les pays européens qui ont acquis une expérience dans le domaine s'avère indispensable [37].

CHAPITRE III

Programme de dimensionnement réalisé, résultats et discussion

III.1. Introduction

La production d'eau chaude sanitaire grâce à l'énergie solaire est maintenant bien au point. L'installation est en général dimensionnée pour fournir 40 à 60 % des besoins. Les vraies économies commencent avec un dimensionnement optimal de l'installation solaire. Le projet doit tenir compte de l'ensoleillement de la région et des besoins. Il n'est pas judicieux de surdimensionner l'équipement pour viser une forte contribution solaire à la mauvaise saison [26]. Cela pourrait avoir pour effet néfaste ; en été, que le chauffe-eau solaire produise plus que les besoins des usagers.

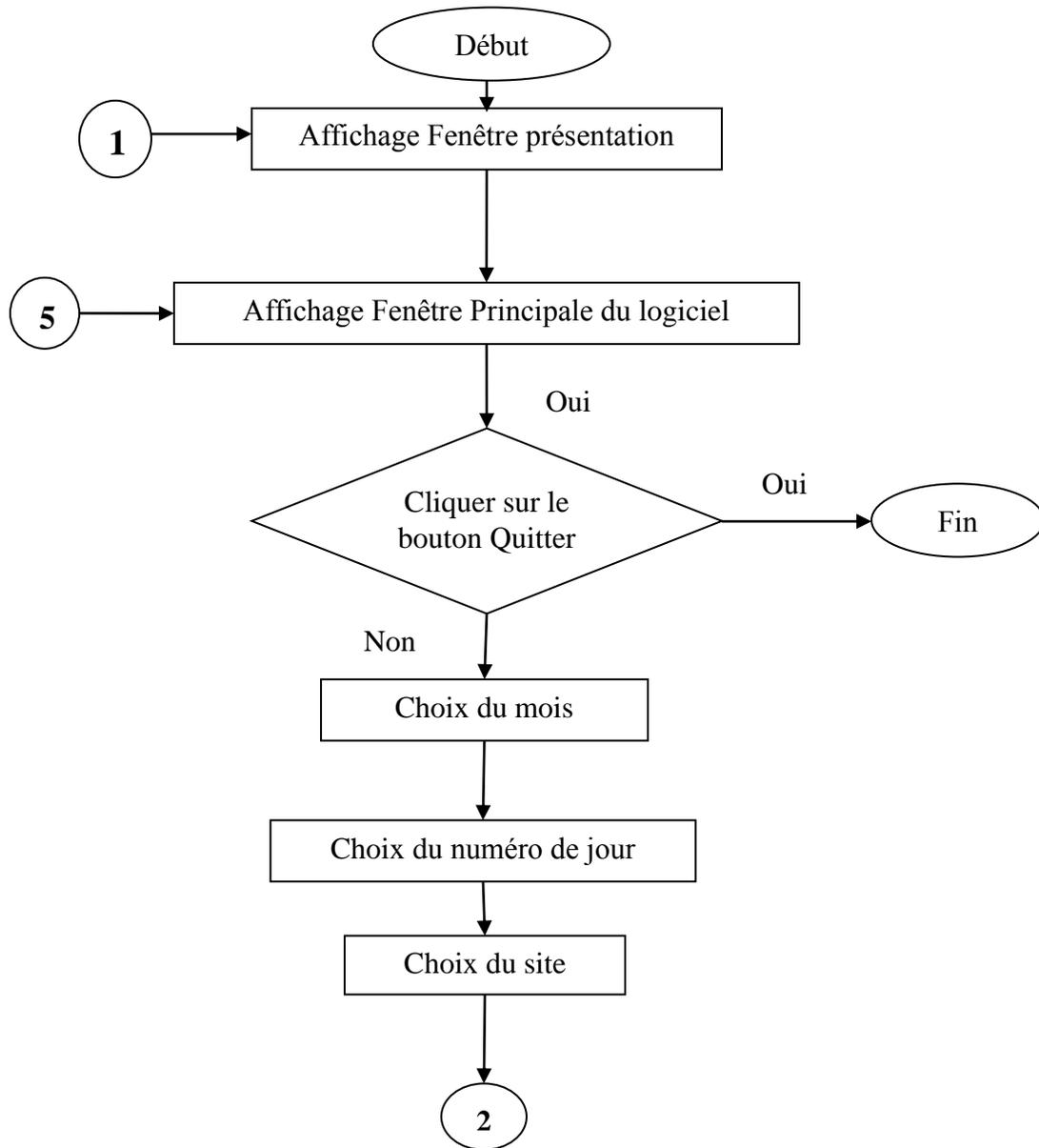
Ce présent chapitre a pour but l'élaboration d'un programme, programmé avec Matlab [9], permettant le dimensionnement des chauffe-eau solaires en Algérie. Le programme proposé 'S☀I Dz' basé sur le modèle Capderou, permettant le calcul de l'éclairement solaire en Algérie. Les tests réalisés sur le programme de dimensionnement du système de chauffage de l'eau par énergie solaire seront discutés. Une visualisation numérique et graphique des résultats obtenus est assurée et un rapport détaillé est établi.

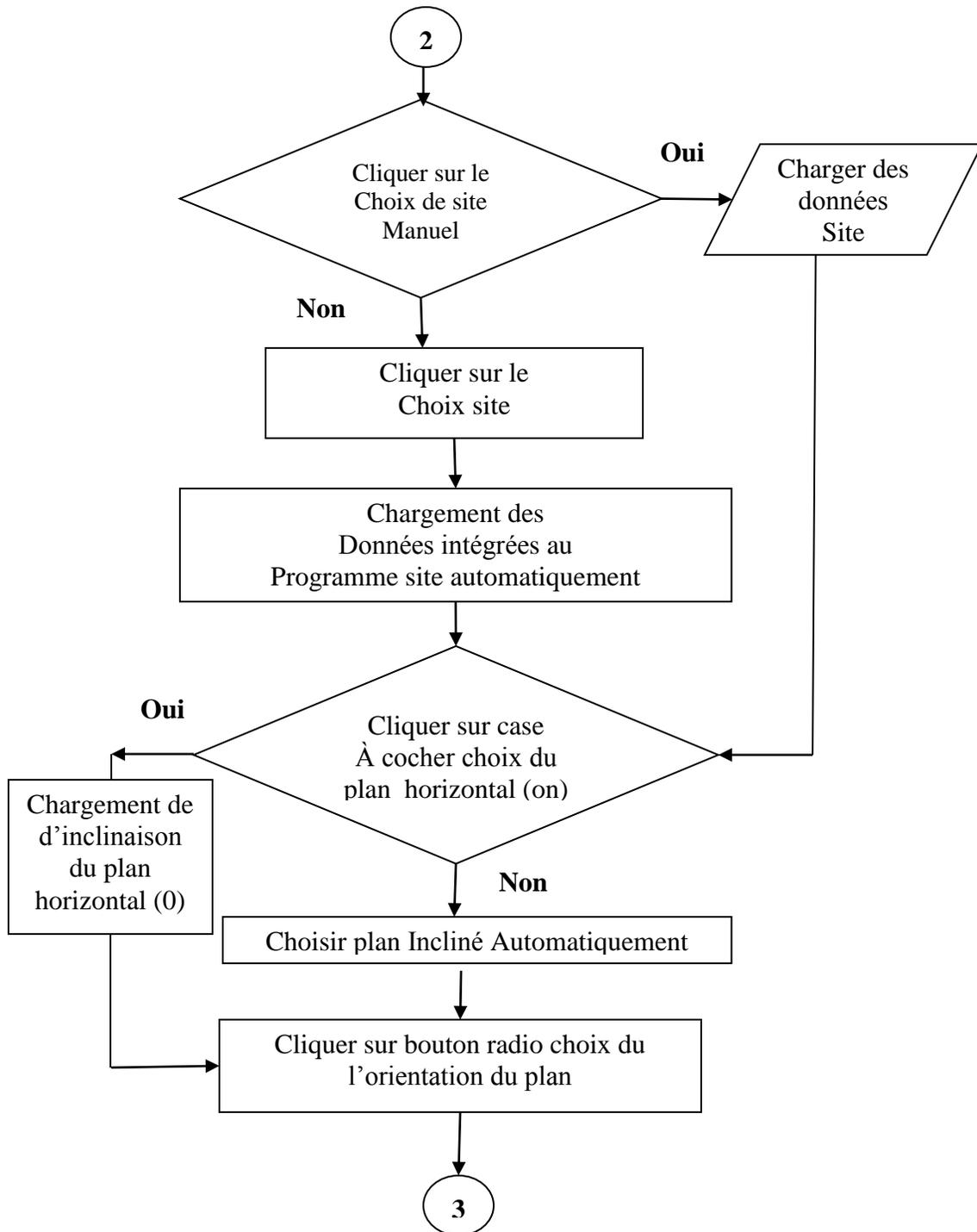
III.2. Réalisation d'un programme de dimensionnement des chauffe-eau solaires

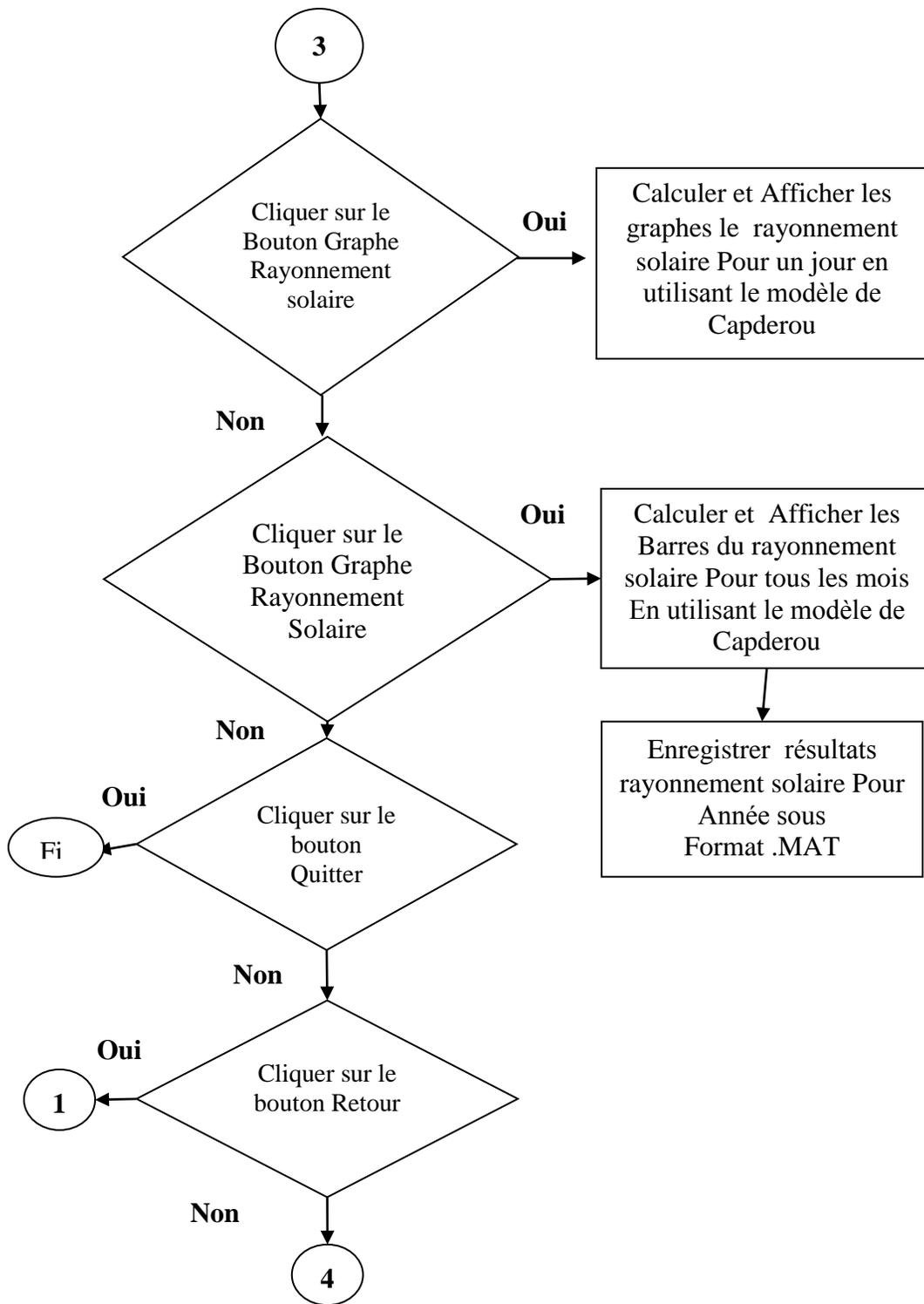
Dans un chapitre précédent, nous avons réalisé une modélisation sous environnement Matlab de l'éclairement solaire par le modèle Capderou et étudié en détail la méthode f -Chart de dimensionnement des chauffe-eau solaires. Cette partie est consacrée à la traduction et la programmation de ces modèles (modèle Capderou et méthode f -Chart) sous interface graphique, facilitant l'utilisation et l'exploitation des résultats. Pour cela, nous avons également utilisé le langage Matlab qui offre la possibilité de faire des simulations sous forme d'entités mais également contient un côté visuel avec un interface de programmation, que nous avons exploité.

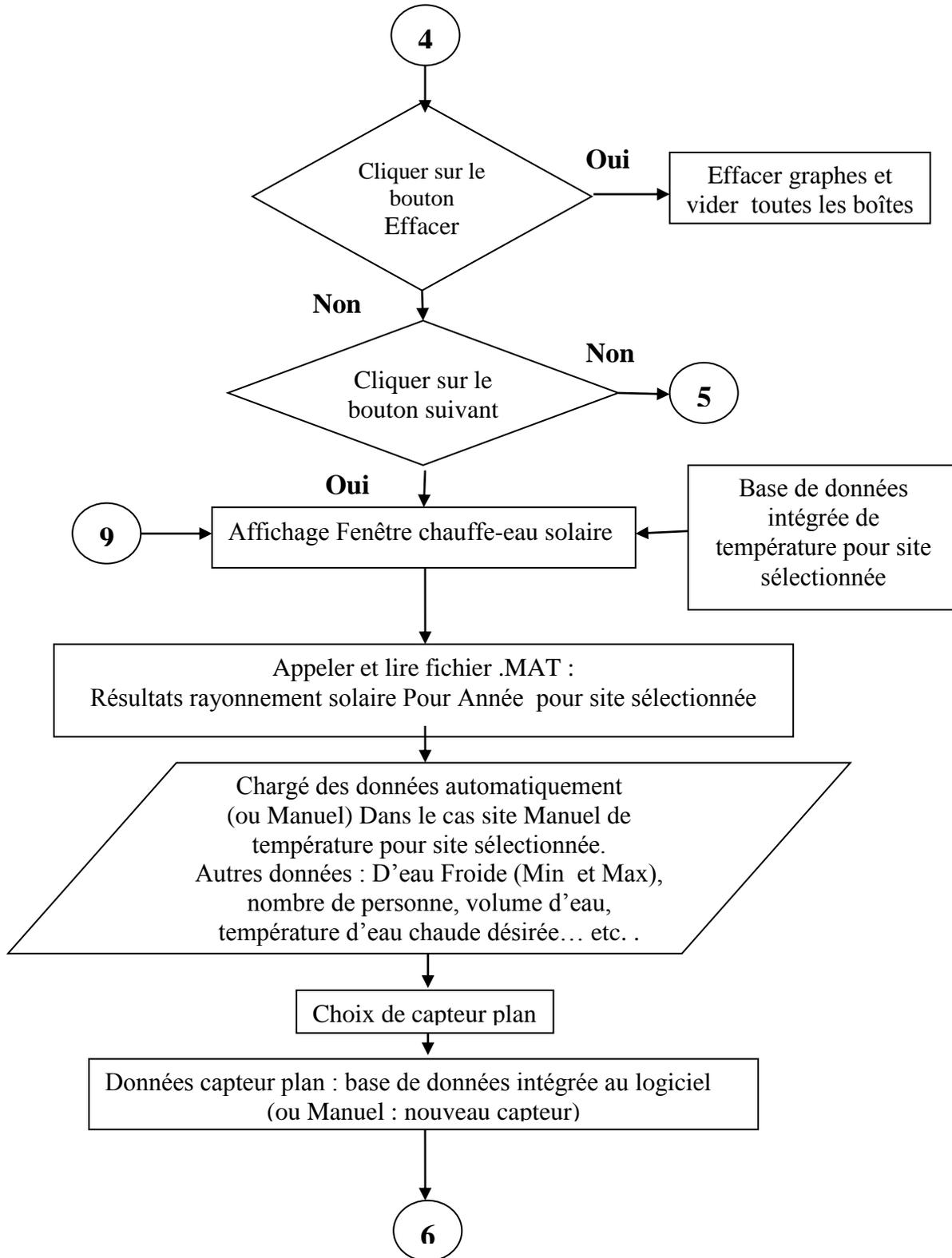
III.2.1. Organigramme du programme 'S☀I Dz'

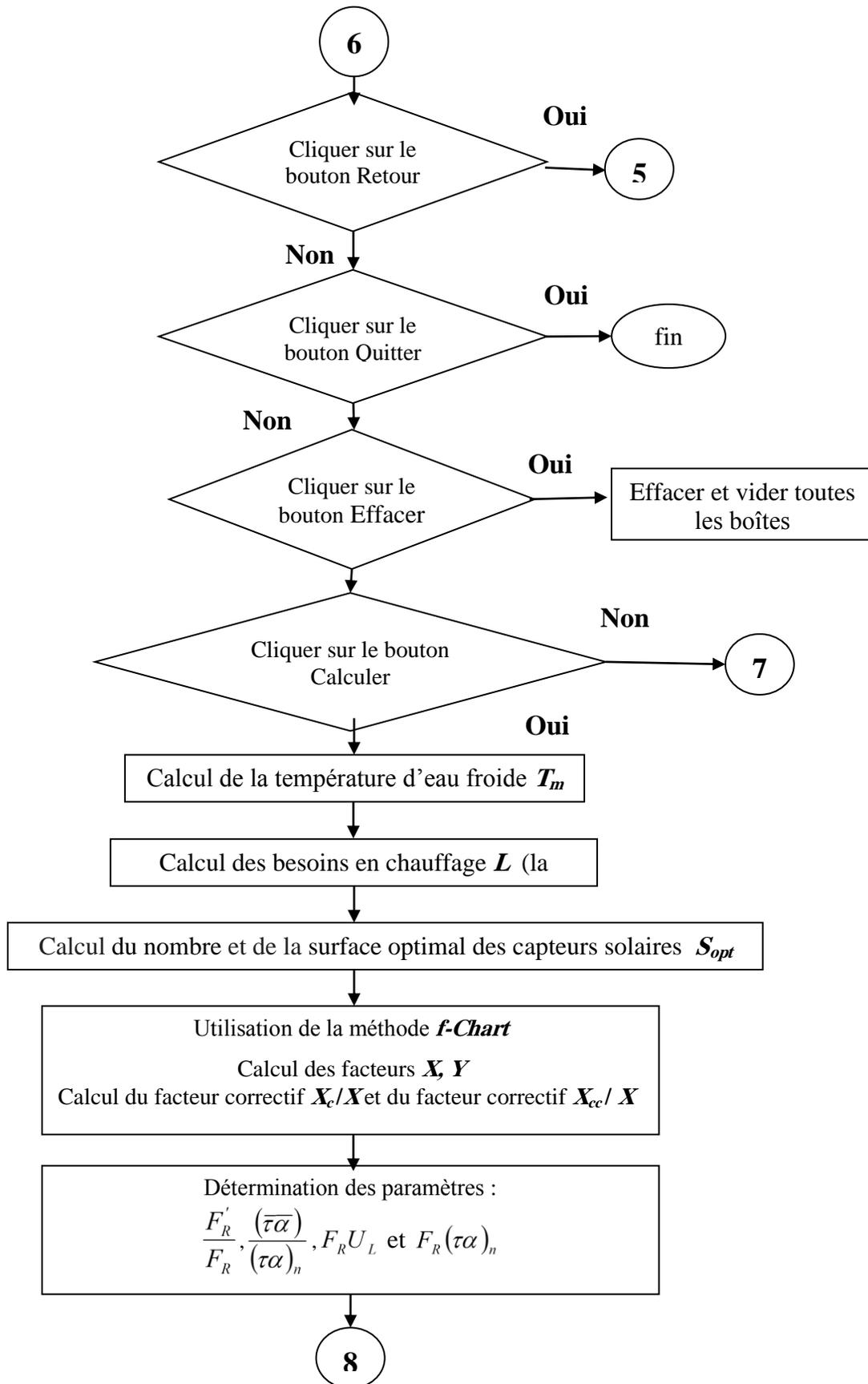
L'organigramme général (Fig III.1) représentant les fonctions du programme est décrit comme suit :











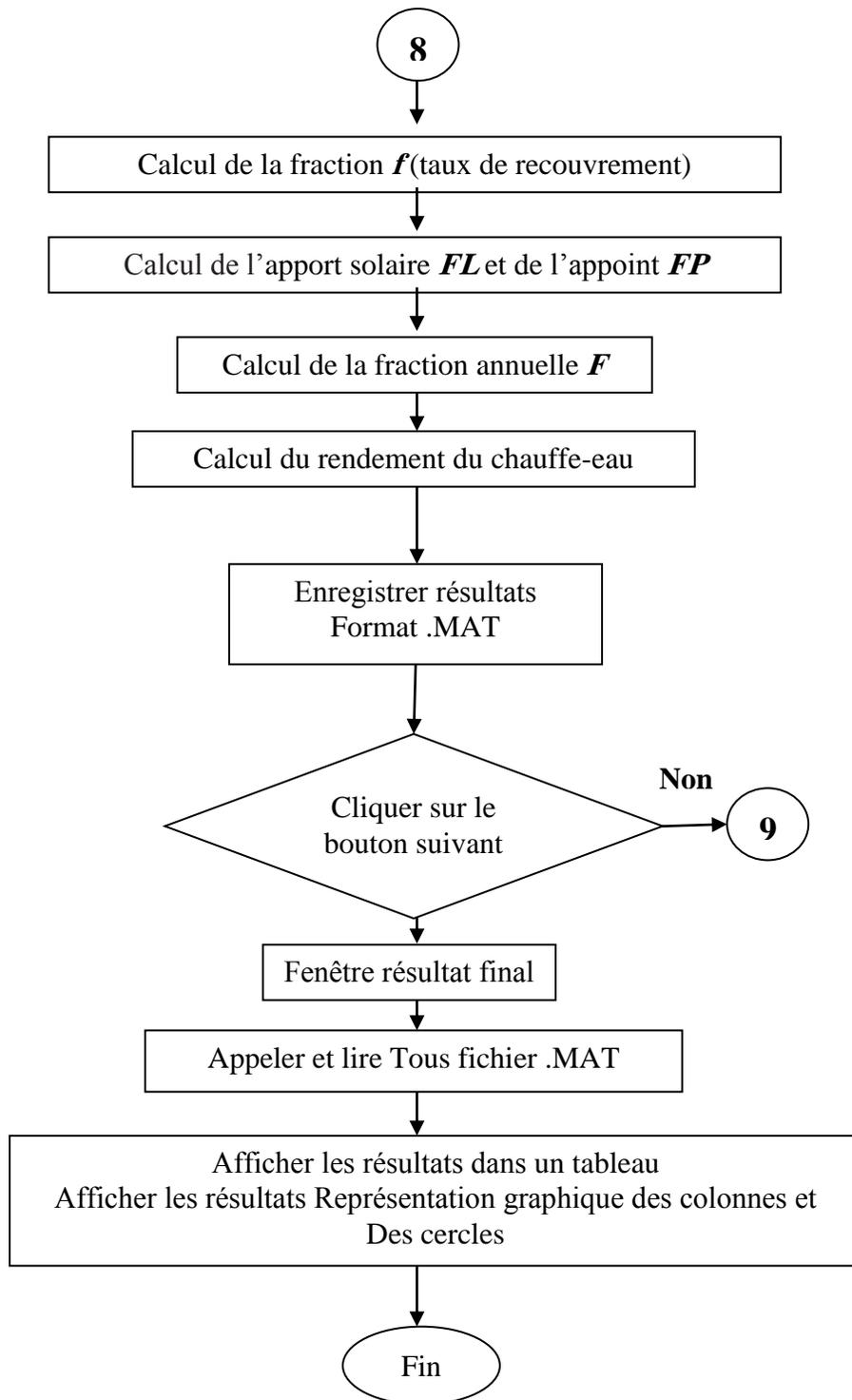


Figure III.1 : Organigramme général du programme de dimensionnement 'SOL Dz'.

III.2.2. Description du programme ‘SOL Dz’

L’objectif initial de ce programme est de calculer la quantité de rayonnement solaire en Algérie pour pouvoir estimer la quantité d’énergie reçue par les capteurs plans solaires et l'utiliser dans le dimensionnement des systèmes de production d'eau chaude solaire. Basé sur la méthode *f*-Chart, le programme ‘SOL Dz’ permet de faire le dimensionnement des installations de production d’eau chaude individuelles en s’appuyant sur le modèle de Capderou pour la modélisation de l’éclairement solaire, et en utilisant la base de données des capteurs plans connus et des température de l'air pour quelques villes de l'Algérie.

Il suffit de choisir le jour, le mois, la latitude et l'altitude du lieu et l’angle d'inclinaison et d’orientation. Les résultats représenteront les valeurs de rayonnement global, direct, diffus sous forme de graphe. Après avoir effectué les calculs nécessaires, nous passons à la 'Fenêtre' suivante basé sur la méthode *f*-Chart, qui permet de faire le dimensionnement et affiche les résultats sur un interface contenant un tableau récapitulatif, des graphiques relative au site choisi.

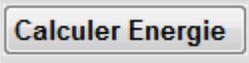
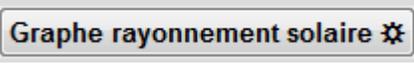
III.2.3. Présentation du programme ‘SOL Dz’

Pour le fonctionnement du programme ‘SOL Dz’, la démarche adoptée est la suivante :

III.2.3.1. Boutons de base du programme ‘SOL Dz’

Le tableau ci-dessous (III.1) présente les boutons de base du programme ‘SOL Dz’
III.1 : boutons de base du programme ‘SOL Dz’

Bouton	Fonction
	Permet de quitter le programme.
	Permet d'affiche le graphique du deuxième site et de calculer le rayonnement du site sélectionné.
	Permet d'effacer toutes les entrées, graphiques et résultats.
	Permet d'aller à la fenêtre suivante

	Permet de calculer l'énergie solaire pour tous les mois avec une largeur de colonnes pour chaque mois durant l'année
	Permet d'afficher le graphique et de calculer le rayonnement du site sélectionné.
	Permet de faire le dimensionnement des systèmes de production d'eau chaude solaire
	Permet d'ouvrir une fenêtre pour comparer le premier site avec un deuxième site
	Permet de retour en arrière
	Permet charger la base de données des températures de l'air ambiant
	Permet de donner comme sortie une fenêtre sous forme PDF
	Permet sélectionner une entrée manuelle ou automatique pour le nombre de capteurs

III.2.3.2. Les fenêtres de dialogues du programme 'SOL Dz'

Les fonctions présentées ci-après permettent d'afficher des fenêtres de dialogues standards. Sauf mention du contraire, elles sont "modale", c'est-à-dire que le programme est suspendu tant que l'utilisateur n'a pas répondu à la sollicitation de la fenêtre, La figures ci-dessous (Fig.III.2) présente les fenêtres de dialogues du programme 'SOL Dz' :



Figure III.2: Fenêtres de dialogues du programme 'SOL Dz'.

III.2.3.3. Fenêtre de présentation du programme 'SOL Dz'

Après l'exécution du programme 'SOL Dz', La fenêtre de la figure (III.3) est affichée, cette fenêtre permet de représenter le programme.



Figure III.3 : Fenêtre de présentation du programme 'SOL Dz'.

III.2.3.4. Fenêtre de calcul du rayonnement solaire

Après environ 20 secondes, s'ouvre une nouvelle fenêtre de la figure (III.4):

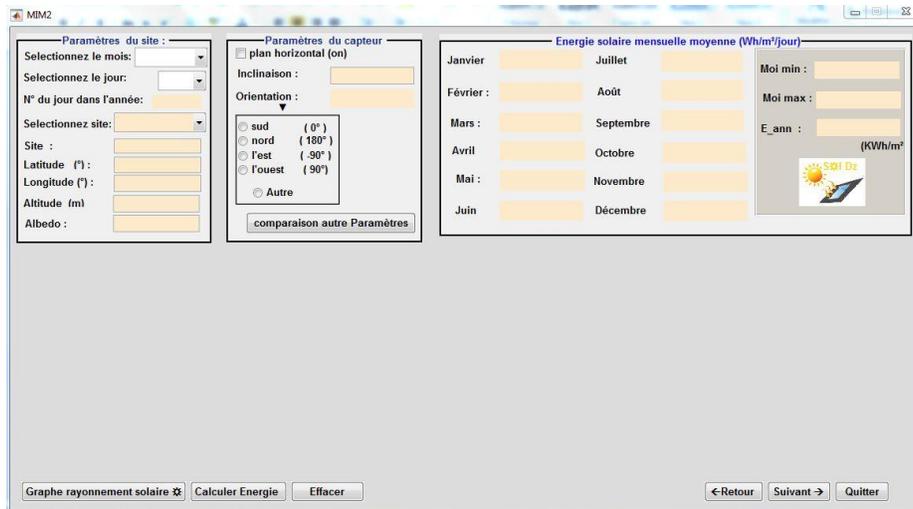


Figure III.4 : Fenêtre de calcul du rayonnement 'SOL Dz'.

Dans l'étape suivante, nous choisissons le mois, le jour, le site et l'orientation et l'utilisateur peut choisir entre un plan horizontal « cliquez sur plan horizontal (on) » ou un plan incliné, Après avoir chargé tous les champs, vous pouvez cliquer sur le bouton « Graphe rayonnement solaire ☀ » pour afficher le graphique du site et la valeur de l'énergie solaire représentée au-dessus du graphique pour le jour sélectionné.

Pour calculer l'énergie solaire pour chaque mois (année), cliquez sur le bouton « Calculer Energie ». Le même bouton vous permet d'afficher un graphique de l'énergie mensuelle sous forme de colonnes avec la couleur du mois le plus favorable en vert et le mois le plus défavorable en rouge, avec la présentation des données pour tous les mois et de l'énergie solaire pour une année complète.

Le site principal peut être comparé avec un autre site en cliquant sur bouton « comparaison autre Paramètres ». Vous verrez une petite fenêtre (Fig III.5) se charger comme la première fois, contenant trois boutons :

Figure III.5: Fenêtre comparaison entre paramètres du programme ‘SOL Dz’.

Cliquez sur le bouton « afficher » pour afficher le graphique à côté du graphique principal (Fig III.6), ou le bouton « Fermer » pour fermer cette dernière fenêtre.

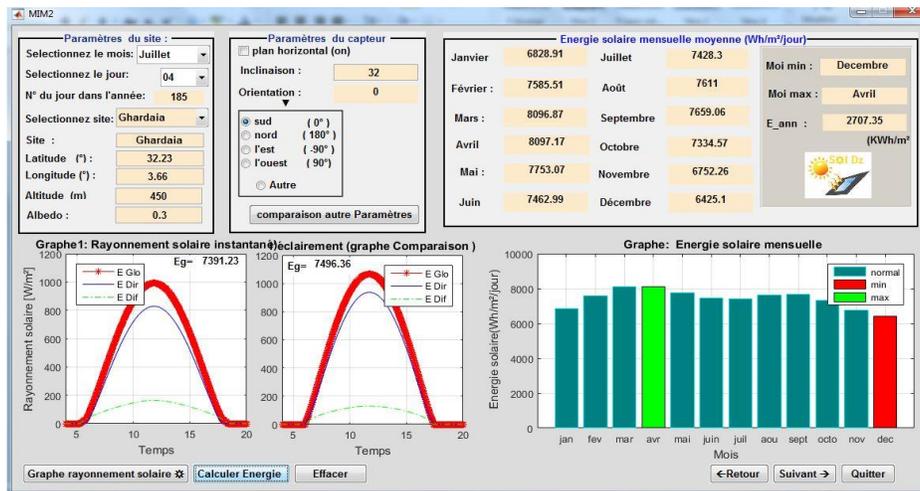


Figure III.6 : Fenêtre permettant d'afficher la comparaison entre les données des sites.

Pour passer à la Fenêtre suivante, cliquez sur « suivant » et pour revenir à la fenêtre précédente, cliquez sur « Retour ». Si l'utilisateur veut quitter le programme ‘SOL Dz’, il peut cliquer sur le bouton « Fermer » à tout moment.

Remarque : Il est nécessaire de cliquer sur le bouton « Calculer Energie » puisque ce dernier est lié à la base de données de la page suivante.

III.2.3.5. Fenêtre de dimensionnement des CES

La fenêtre de la figure (III.7) permet de faire le dimensionnement des chauffe-eau solaires individuels en Algérie, la fenêtre est accessible via le bouton « suivant » Dans Fenêtre rayonnement.

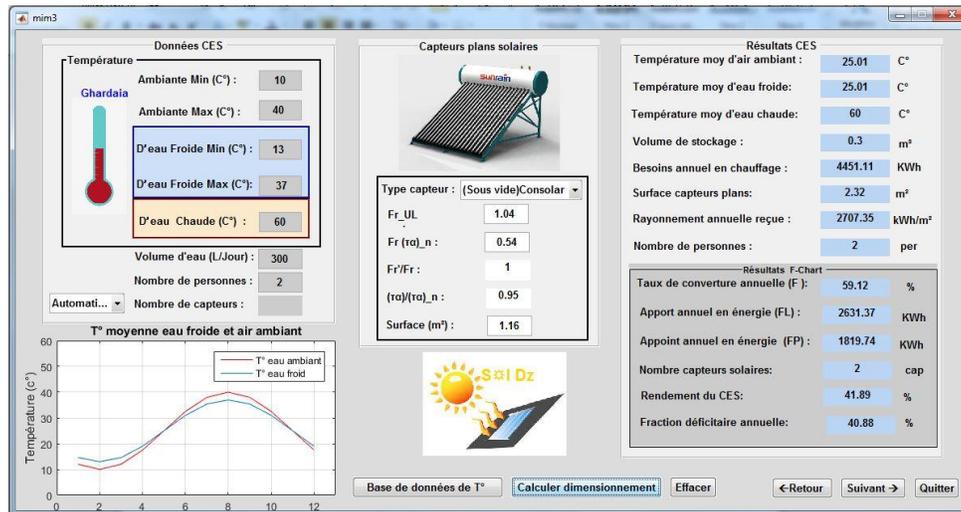


Figure III.7 : Fenêtre de dimensionnement du programme ‘SOL Dz’.

Dans cette fenêtre, nous avons deux cas de données de température ambiante :

- Charger les données manuelles si vous avez sélectionné un site qui n'existe pas dans la base de données (autre site) et remplissez une case de valeur de température minimale et maximale pour chaque mois.
- Charger les données automatiques si vous avez sélectionné un site contenant dans la base de données et cliquez sur le bouton « Base de données de T° ».

Dans la prochaine étape charger la température d'eau froide (Min et Max) et la température requise pour le chauffe-eau solaire (eau chaude) puis charger le volume d'eau.

Dans une étape suivante, choisir le type de capteur plan par sélections soit existant sur la base de données ou que vous ajoutez comme nouveau capteur (cas par défaut).

Maintenant, cliquez sur le bouton « Calculer dimensionnement » pour faire le dimensionnement du chauffe-eau Solaires en utilisant la méthode *f*-Chart, Après avoir cliqué sur le bouton précédent, afficher les résultats chauffe-eau solaires initiaux dans la même fenêtre, cette

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

fenêtre contient également des boutons « Fermer » pour la fermeture du programme et pour revenir à la fenêtre précédent, cliquez sur « Retour ». Pour passer à la Fenêtre suivante, cliquez sur « suivant ».

III.2.3.6. Fenêtre des résultats

Dans cette fenêtre (Fig III.8), on affiche tous les résultats dimensionnement du chauffe-eau solaires en utilisant la méthode f -Chart

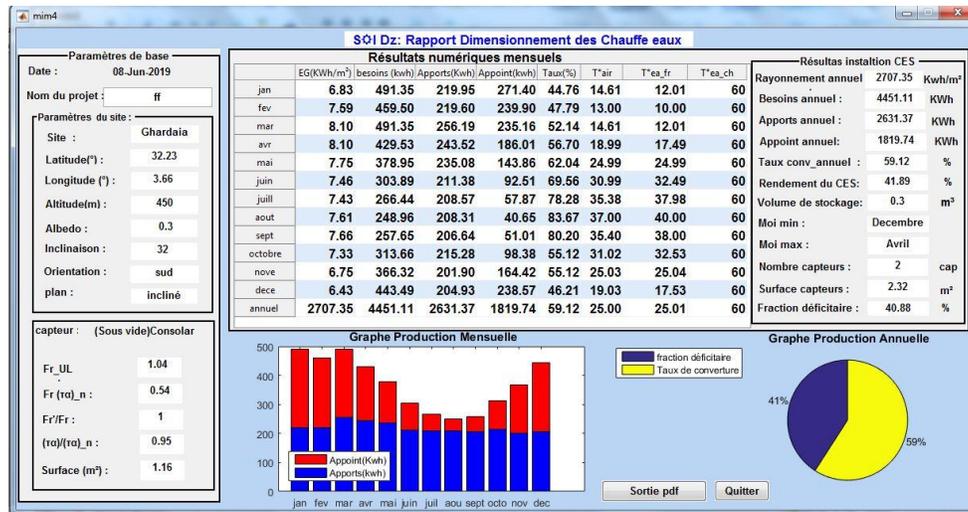


Figure III.8: Fenêtre des résultats de dimensionnement du programme 'SOL Dz'.

Parmi la constitution de cette fenêtre, un affichage graphique sous forme de colonnes de l'apport solaire, l'énergie d'appoint et la production annuelle relative au site choisi. Une table affichant les informations de chaque mois en détail est aussi ajoutée, également le nom du projet, la date du jour et des informations concernant le capteur solaire plan.

III.3. Tests établis et discussions des résultats

Supposant qu'on va dimensionner un chauffe-eau solaire individuel par le programme 'SOL Dz' en prenant ; par exemple, le cas d'une famille de 4 personnes résidante à Ghardaïa, et qui possède une cuve de stockage de 300 litres ; soit une consommation de 75 L/per/jour. La température d'eau chaude souhaitée est de 60 °C, le capteur plan choisit est un capteur vitré du type (Vitré) Sun Vescal. Les résultats obtenus (Fig III.9); tel que donnés par le programme, concernant l'énergie solaire fournie et l'apport solaire sont les suivants :

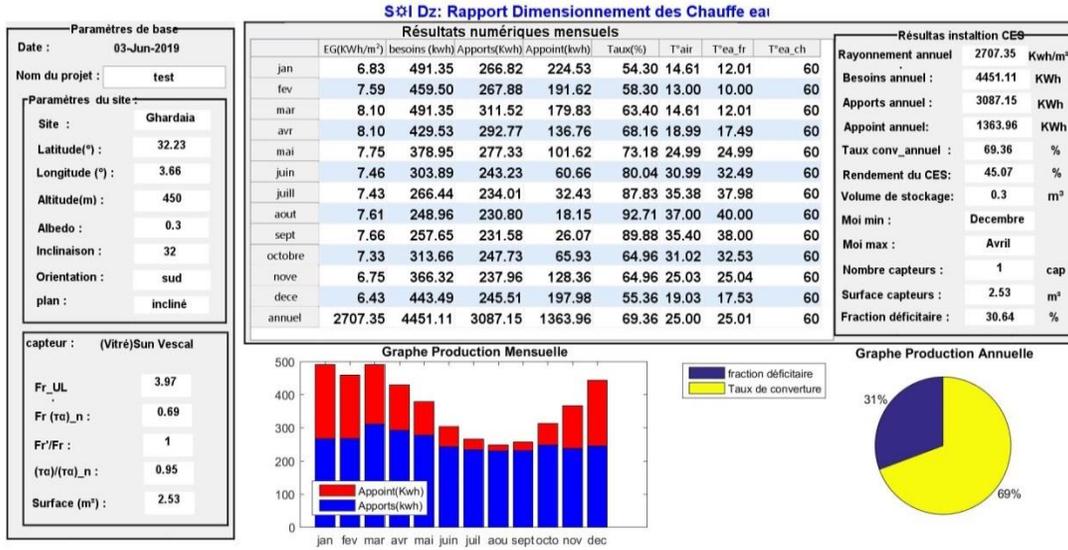


Figure III.9 : Résultats obtenus pour le dimensionnement d'un CESI réalisé par 'S&I Dz' (ville Ghardaïa).

Par la suite nous allons réaliser différentes séries de tests en faisant varier plusieurs paramètres d'entrées, les résultats obtenus sont rapportés sur des tableaux et les sites concernés sont indiqués sur le tableau ci-dessous (tableau III.2).

Tableau III.2: Liste des sites Algériens utilisés pour les tests.

Ville	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Albédo
Alger	36.43N	3. 15E	25	0.24
Annaba	36.50N	7.49 E	4	0.2
Ghardaïa	32.23N	3.66 E	450	0.3
Adrar	27.53 N	- 0.17 E	264	0.35
Tamanrasset	22.47 N	5.31 E	1378	0.3

III.3.1. Tests sur la quantité d'énergie reçue sur le plan des capteurs

Maintenant nous allons faire des tests ; en calculant l'éclairement solaire par le modèle Capderou, pour cela on va prendre l'exemple d'une famille de 4 personnes avec un ballon de stockage de 300 litres, la température d'eau chaude demandée est de 60 °C, le capteur plan

choisit est le capteur (Vitré) Sun Vescal. Pour les différentes villes citées précédemment, on a obtenus les résultats illustrés sur le tableau (III.3).

Pour l'ensemble des tests du tableau, on remarque que les valeurs des apports solaires calculées par plan incliné ($\beta = \text{Lat}$) sont clairement supérieures aux valeurs calculées par le plan horizontal ($\beta = 0$) pour toutes les villes choisies. Ceci est justifié par la valeur de l'éclairement annuel reçu sur le plan des capteurs, qui est nettement supérieure pour plan incliné ($\beta = \text{Lat}$) que pour plan horizontal ($\beta = 0$), cette différence s'est répercutée directement sur la valeur de l'apport solaire, qui peut devenir importante dans certains cas (exemple : Tamanrasset et Adrar). Cette différence influe également sur le nombre de capteurs plans comme pour le cas de Alger et Annaba (1 seul capteur plan pour plan incliné contre 2 capteur pour plan horizontal), ceci conduit à un sous dimensionnement de l'installation et donc un déficit dans la couverture des besoins.

On voit bien que pour le site de Ghardaïa l'énergie solaire reçue sur un plan incliné estimée par le modèle Capderou est également plus élevée que le plan horizontal (Fig III.10). La différence est bien clair entre les mois d'hiver et d'été à l'exception des mois d'été (Mai, Juin, juil), ou on remarque que les valeurs sur plan horizontal sont plus élevées que ceux du plan incliné, cela est dû aux différents angles sur lesquels les rayons du soleil tombent sur la surface des capteurs qui sont directement en relation avec la Latitude du lieu.

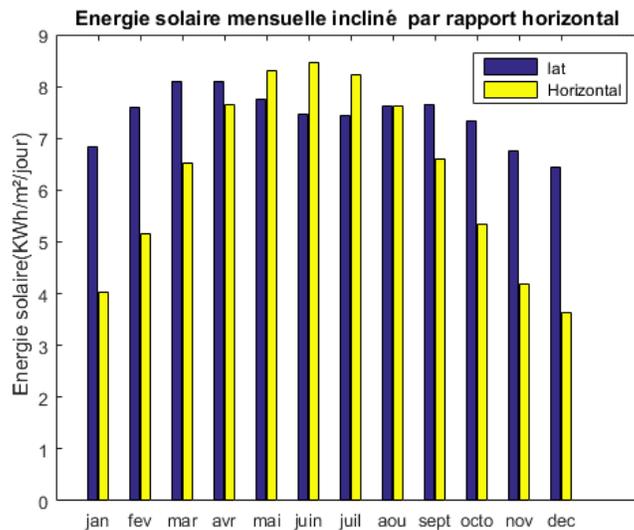


Figure III.10: La différence entre énergie reçue sur plan incliné et plan horizontal pour le site de Ghardaïa.

III.3.2. Tests sur l'angle d'inclinaison des capteurs

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Afin de déterminer l'inclinaison optimale des capteurs plans qui permet de collecter un maximum d'énergie solaire, nous allons calculer l'énergie fournie et l'apport solaire en utilisant le modèle de calcul de l'éclairement solaire Capderou et en faisant varier l'angle d'inclinaison des capteurs. Les résultats obtenus sont rapportés sur le tableau (III.4).

Sur les résultats du tableau (III.4).on peut dire ; qu'en général, il serait mieux d'incliner les capteurs plans selon une inclinaison égale à latitude $+10^\circ$, puisque la couverture solaire est plus intéressante. Cependant, on remarque que l'effet de cette inclinaison ne diffère peu d'une inclinaison à la latitude du lieu et peut parfois être non recommandable (cas d'Alger). En recherchant bien une explication, on trouve que l'apport solaire est un apport annuel, il est calculé à partir de la valeur de l'éclairement annuel reçu sur les capteurs. Et comme l'on peut voir sur la figure (III.11), cette valeur est grande pour une inclinaison 'latitude $+10^\circ$ ' en hiver et petite en été, et elle est en cas inverse pour une inclinaison à la latitude, les moyennes sur l'année seront donc très proches. Or que en projet de CES on cherche toujours un maximum d'énergie en hiver où les besoins en chauffage augmentent. Pour cela nous avons dressé le tableau (III.5), où on a calculé l'éclairement solaire reçu sur les capteurs pour la période d'hiver et la période d'été séparément, puis on a estimé l'apport solaire hivernal pour les trois inclinaisons (horizontal, Lat et Lat $+10^\circ$). Sur ce tableau on voit clairement que la couverture pour une inclinaison à Lat $+10^\circ$ est plus importante pour toutes les villes incluant Alger, à cet effet 'Lat $+10^\circ$ ' sera l'inclinaison la plus optimale.

Sur les résultats du tableau (III.5) on remarque ; qu'avec 2 capteurs plans vitrés du type (Vitré) Sun Vescal, la fraction solaire hivernale (le taux de recouvrement de la charge par énergie solaire) est plus importante au Sud de l'Algérie avec 35% pour Tamanrasset, 38 % pour Adrar et 35 % pour Ghardaïa. Elle est également intéressante au Nord du pays et dans la région des hauts plateaux avec 30% pour Alger et Annaba.

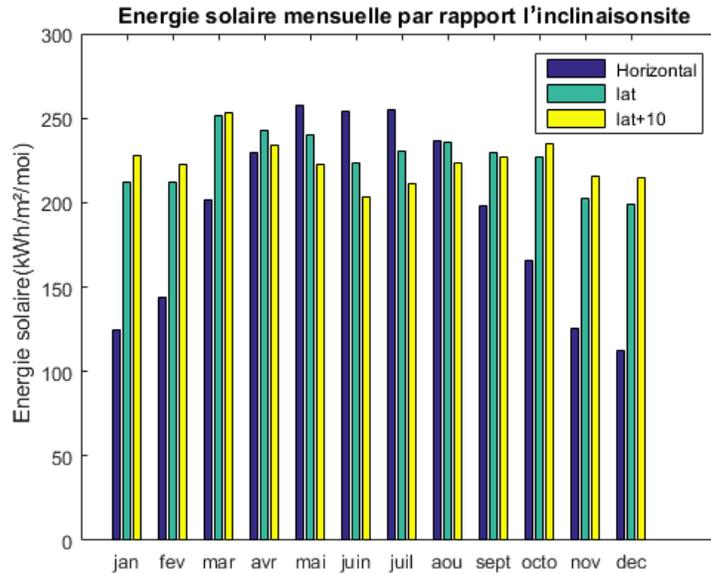


Figure III.11: Effet de l'inclinaison du plan sur l'énergie solaire reçue.

III.3.3. Tests sur le nombre d'unités

Maintenant nous allons prendre l'exemple de plusieurs familles habitants à Alger et à Ghardaïa, en utilisant le modèle de calcul de l'éclairage solaire Capderou avec une inclinaison égal à la latitude du lieu +10°. La consommation est de 75 L/per/jour et la température d'eau chaude est inchangée. Les résultats trouvés sont résumés sur le tableau (III.6).

En considérant une consommation de 75 L/per/jour, le volume de stockage ainsi que les besoins en chauffages augmentent avec l'augmentation du nombre d'unités, ce dernier est inversement proportionnel à la couverture solaire, qui passe de 69 % pour 4 personnes à 84 % pour le double d'unités, avec un à deux capteur plan (Ghardaïa par exemple).

III.3.4. Tests sur le volume de stockage

Cette fois le paramètre variable sera la capacité de la cuve stockage; pour cela, nous avons effectué le dimensionnement du chauffe-eau en prenant la cas d'une famille de 4 personnes à faible consommation (35 L/j), moyenne consommation (55 L/j), forte consommation (100 L/j) et très haute consommation (190 L/j). Le modèle de calcul de l'éclairage solaire étant le modèle Capderou avec une inclinaison des capteurs plans égal à la latitude du lieu +10°. Les résultats de ces tests sont regroupés sur le tableau (III.7).

L'augmentation du volume de stockage conduit automatiquement à une augmentation des besoins et bien évidemment à un surplus de capteurs plans pour couvrir ces besoins. La fraction solaire diminuera à cet effet. Sur ces résultats nous remarquons très bien qu'il existe une grande différence entre les familles à moyenne et les familles à haute consommation, nous passons d'un seul à trois capteurs pour un peu près le même taux de couverture, ce nombre de capteurs important se reflètera sur la surface où seront placés les capteurs et le coût total de l'installation. On peut dire également que ce mode de vie (gaspillage d'utilisation de l'eau chaude) influe directement sur l'environnement.

III.3.5. Tests sur la température d'eau chaude

Afin de connaître l'influence de la température d'eau chaude demandée sur la couverture solaire, nous avons effectués ces tests avec des températures de 40, 60 et 70 °C d'eau chaude pour un volume de 300 L. Les résultats sont indiqués sur le tableau (III.8).

Sur les résultats du tableau (III.8) il apparaît clairement que, plus la température d'eau chaude demandée augmente, plus la couverture solaire diminue et le nombre de capteurs plans nécessaires augmentent (voir test 34 et 37), pour cela il faut bien choisir une température convenable d'eau chaude.

En terme général, on peut dire que pour une famille de 4 personnes habitant un pays méditerranéen (Nord de l'Algérie par exemple), 3 m² de surface des capteurs suffisent pour couvrir presque la totalité de la consommation d'énergie pour l'eau chaude, au Sud de l'Algérie cette couverture devient encore plus importante. A noter ; que pour le programme 'S☀l Dz', la couverture solaire calculée est directement liée aux valeurs d'entrées de la température ambiante et de la température d'eau froide maximales et minimales saisies par l'utilisateur.

III.3.6. Tests sur différents types de capteurs plans

Maintenant nous allons nous servir de la base de donnée des capteurs solaires du programme 'S☀l Dz' afin d'effectuer des tests sur les différents types de capteurs plans et sous vides. Pour une famille de 4 personnes, un volume de 300 L et une température d'eau chaude de 60 °C, on recueille les résultats du tableau (III.9). Les besoins énergétiques annuels d'une telle famille s'élèvent à 5222.11KWh à Alger et à 4451.11 KWh à Ghardaïa, l'éclairement annuel reçu sur le plan des capteurs (en KWh/m²) est de 2549.68 à Alger et 2693.74 à Ghardaïa.

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Concernant le type de capteur, nous avons utilisé des capteurs vitrés et sans vitrage et d'autres sous vides, on a constaté ; que les capteurs plans avec vitrage donnent de bons résultats. Le capteur vitré de 'Sun-vescal' et celui de 'altersol Terza' offrent un rapport rendement - prix recommandable.

On a constaté également que les capteurs sous vides ; qui présentent de très bon performances ' haval Herzog', donnent de plus haut rendement mais sous certaines conditions :

La couverture annuelle avec (1) capteur plan est 83.14 % à Alger et jusqu'à 100 % avec (2) capteur plan et le même pourcentage à Ghardaïa. Dans le cas (1) capteur plan il est de 90.85% à Ghardaïa, le capteur 'consolar' a des performances moyennes comparées au type de capteur (sous vides).

Prenant l'exemple de la famille précédente habitant à Ghardaïa : avec 1 capteurs vitrés (Velux cli u10) elle arrive à couvrir ces besoins à 61% en énergie solaire, si elle utilise le capteur sous vide de 'haval herzog' elle gagnera encore plus (couverture de 90.85 %), tandis qu'avec le capteur sous vide de 'consolar' elle ne gagnera presque rien (32.52%). Ceci est dû au faite que les paramètres $F_R(\tau\alpha)_n$ et $F_R U_L$ de chaque capteur, le coefficient $F_R U_L$ est très sensible une légère variation entraîne un grand écart des résultats (1.60 pour haval herzog) et (1.04 pour consolar) bien qu'égale $F_R(\tau\alpha)_n$ dans la même valeur (0.54). Les résultats trouvés prouvent que le capteur solaire sous vide ' haval herzog 'est très l'efficacité.

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Table III.3: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec variation de la quantité d'énergie solaire reçue.

Test N°	Site	Inclinaison (°)	Nbr capteurs plans	Surface des capteurs (m ²)	Eclairage annuel sur les capteurs (KWh/m ²)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)	Fraction déficitaire annuelle (%)
1	Adrar	Horizontal	1	2.53	2366.64	3684.85	2397.68	1287.17	65.07	34.93
2		Lat	1	2.53	2675.96	3684.85	2759.68	925.17	74.89	25.11
3	Annaba	Horizontal	2	5.06	2111.43	5090.71	3871.17	1219.54	76.04	23.96
4		Lat	1	2.53	2558.31	5090.71	3096.69	1994.02	60.83	39.17
5	Tamanrasset	Horizontal	1	2.53	2669.49	4645.84	3093.1	1552.74	66.58	33.42
6		Lat	1	2.53	2902.2	4645.84	3365.8	1280.03	72.45	27.55
7	Alger	Horizontal	2	5.06	2117.54	5222.11	4054.84	1167.27	77.65	22.35
8		Lat	1	2.53	2572.39	5222.11	3152.58	2069.54	60.37	39.63
9	Ghardaïa	Horizontal	1	2.53	2305.15	1363.96	2596.21	1854.9	58.33	41.67
10		Lat	1	2.53	2707.35	1363.96	3087.15	1363.96	69.3	30.64

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Table III.4: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec différents angles d'inclinaisons des capteurs plans.

Test N°	Site	Inclinaison (°)	Nbr capteurs plans	Surface des capteurs (m ²)	Eclairage annuel sur les capteurs (KWh/m ²)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)	Fraction déficitaire annuelle (%)	Rendement du CES (%)
11	Adrar	Lat	1	2.53	2675.96	3684.85	2759.68	925.17	74.89	25.11	40.76
12	Adrar	Lat+10	1	2.53	2672.35	3684.85	2789.69	895.16	75.71	24.29	41.26
13	Annaba	Lat	1	2.53	2558.31	5090.71	3096.69	1994.02	60.83	39.17	60.83
14	Annaba	Lat+10	1	2.53	2531.18	5090.71	3077.2	2013.5	60.45	39.55	48.05
15	Tamanr asset	Lat	1	2.53	2902.2	4645.84	3365.8	1280.03	72.45	27.55	46.48
16	Tamanr asset	Lat+10	1	2.53	2893.58	4645.84	3364.32	1281.51	72.42	27.58	45.96
17	Alger	Lat	1	2.53	2572.39	5222.11	3152.58	2069.54	60.37	39.63	48.44
18	Alger	Lat+10	1	2.53	2549.68	5222.11	3133.04	2089.07	60	40	48.57
19	Ghardaï a	Lat	1	2.53	2707.35	1363.96	3087.15	1363.96	69.3	30.64	46.07
20	Ghardaï a	Lat+10	1	2.53	2693.7	4451.11	3089.31	1361.79	69.41	30.59	45.33

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Table III.5: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec fraction hivernale et différents angles d'inclinaisons.

Test N°	Site	Inclinaison (°)	Jan (kwh)	Fev (kwh)	Mar (kwh)	Avr (kwh)	Mai (kwh)	Jun (kwh)	Jul (kwh)	Aout (kwh)	Sep (kwh)	Oct (kwh)	Nov (kwh)	Dec (kwh)	Total hiver (kwh)	Total été (kwh)	Couverture hivernale (%)
1	Adrar	Horizontal	140.4	156.0	209.9	230.7	252.0	246	247.7	234.4	203.1	177.0	140.1	129.3	952.7	1413.9	26.19
11		Lat	212.9	211.1	247.4	238.2	235.0	218.4	224.8	231.0	226.2	225.7	233.4	201.5	1332	1373.6	36.87
12		Lat+10	230.0	222.0	250.2	230.4	218.6	199.5	207.1	219.8	224.7	233.4	217.8	219.2	1372.6	1300.1	38.88
3	Annaba	Horizontal	102.6	124.9	183.2	216.0	247.4	246.6	245.8	223.5	181.2	145.4	104.7	90.8	751.6	1360.5	27.06
13		Lat	193.1	198.5	239.0	234.0	232.8	217.5	222.9	226.6	218.1	211.7	184.5	210.2	1237	1351.9	29.07
14		Lat+10	207.0	207.5	240.3	224.7	215.1	196.8	203.7	213.9	215.1	217.6	195.9	193.1	1261.4	1269.3	30.13
5	Tamanra sset	Horizontal	173.6	184.5	237.2	252.0	269.4	260.4	264.4	255.8	228.9	208.0	172.2	162.8	1138.3	1530.9	28.39
15		Lat	238.3	231.0	265.7	252.9	248.0	230.1	237.8	246.8	244.8	248.9	228.9	228.8	1441.6	1460.4	35.99
16		Lat+10	257.9	242.8	268.2	243.3	228.8	208.2	217.0	232.8	242.4	257.3	245.4	249.6	1521.2	1372.5	38.07
7	Alger	Horizontal	102.9	125.2	183.8	216.6	248.0	246.9	246.1	223.8	181.8	145.7	105.0	91.5	754.1	1363.2	27.66
17		Lat	194.3	199.6	178.3	235.2	234.1	218.7	224.1	227.9	219.3	213.0	185.7	180.4	1151.3	1359.3	27.68
18		Lat+10	208.6	208.9	241.8	226.2	216.7	198.6	205.2	215.8	216.6	219.2	197.4	194.7	1270.6	1279.1	29.90
9	Ghardaïa	Horizontal	124.9	144.2	201.8	229.8	257.3	253.8	254.8	236.2	198.3	165.9	125.7	112.8	875.3	1430.2	22.15
19		Lat	211.7	212.5	251.1	243.0	240.3	223.8	230.3	235.9	229.8	227.2	202.5	199.3	1304.3	1403.1	33.39
20		Lat+10	227.9	222.6	253.3	234.3	222.9	203.7	211.4	223.5	227.4	234.7	216	215	1369.5	1323.2	35.30

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Table III.6: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI avec variation du nombre de personnes.

Test N°	Site	Unité-personne	Volume (L)	Nbr capteurs plans	Surface des capteurs (m ²)	Eclairage annuel sur les capteurs (KWh/m ²)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)	Fraction déficitaire annuelle (%)
21	Alger	4	300	1	2.53	2549.68	5222.11	3133.04	2089.07	60	40
22		6	450	2	5.06	2549.68	7833.17	5887.9	1945.27	75.17	24.83
23		8	600	2	5.06	2549.68	10444.2	6399.98	4044.25	61.28	38.72
24	Ghardaïa	4	300	1	2.53	2693.74	4451.11	3089.31	1361.79	69.41	30.59
25		6	450	2	5.06	2693.74	6676.66	5645.96	1030.7	84.56	15.44
26		8	600	2	5.06	2693.74	8902.21	6319.47	2582.74	70.99	29.01

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Table III.7: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI selon différents volumes du ballon de stockage.

Test N°	Site	Volume (L)	Consommation (L/per)	Nbr captures plans	Surface des capteurs (m ²)	Eclairage annuel sur les captures (KWh/m ²)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)	Fraction déficitaire annuelle (%)
27	Alger	140	35	1	2.53	2572.39	2436.99	2312.81	124.18	94.9	5.1
28		400	100	2	5.06	2572.39	6962.82	5671.14	1291.68	81.45	18.55
29		760	190	3	7.59	2572.39	13229.4	9324.12	3905.23	70.48	29.52
30	Ghardaia	140	35	1	2.53	2693.74	2077.18	2049.33	27.85	98.66	1.34
31		400	100	2	5.06	2693.74	5934.81	5304.18	630.62	89.37	10.63
32		760	190	3	7.59	2693.74	11276.1	9034.82	2241.32	80.12	19.88

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Tableau III.8: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI pour différentes températures d'eau chaude.

Test N°	Site	T° eau chaude (°C)	Nbr capteurs plans	Surface des capteurs (m ²)	Eclairement annuel sur les capteurs (MWh/m ²)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)	Fraction déficitaire annuelle (%)
33	Alger	40	1	2.53	2549.68	2673.2	2542.94	130.25	95.13	4.87
34		60	1	2.53	2549.68	5222.11	3133.04	2089.07	60	40
35		70	2	5.06	2549.68	6496.57	5371.63	1124.95	82.68	17.32
36	Ghardaia	40	1	2.53	2693.74	1902.19	1840.35	61.84	96.75	3.25
37		60	1	2.53	2693.74	4451.11	3089.31	1361.79	69.41	30.59
38		70	2	5.06	2693.74	5725.56	5180.11	545.45	90.47	9.53

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

Tableau III.9: Résultats des tests obtenus pour le dimensionnement d'un CESI pour différents types de capteurs plans.

Test N°	Site	Type de capteur	Nbr capteurs plans	Surface brute/ capteur (m ²)	$F_R (\tau\alpha)_r$	$F_R U_L$ (W/m ² /°C)	Besoin annuel (kWh)	Apport annuel (kWh)	Appoint annuel (kWh)	Couverture annuelle (%)
39	Alger	(Vitré) Sun-vescal	1	2.53	0.69	3.97	5222.11	3133.04	2089.07	60
40			2	5.06	0.69	3.97	5222.11	4965.99	256.12	95.1
41		(Sans vitrage) sun trek	1	3.87	0.86	17.68	5222.11	3347.66	1874.45	64.11
42			2	7.74	0.86	17.68	5222.11	4633.33	588.78	88.73
43		(Sous vide) haval herzog	1	4.58	0.54	1.60	5222.11	4322.55	880.6	83.14
44			2	9.16	0.54	1.60	5222.11	5222.11	0	100
45		(Vitré) Velux cli u10	1	2.22	0.68	4.18	5222.11	22767.88	2454.23	53
46			2	4.44	0.68	4.18	5222.11	4537.6	684.52	86.89
47		(Sans vitrage) Heliocol	1	2.7	0.87	21.31	5222.11	2436.14	2785.98	46.65
48			2	5.4	0.87	21.31	5222.11	3799.44	1422.68	72.76
49		(Sous-vide) consolar	1	1.16	0.54	1.04	5222.11	1401.43	3820.69	26.84
50			2	2.32	0.54	1.04	5222.11	2602.85	2619.26	49.84
51	Ghardaïa	(Vitré) Sun-vescal	1	2.53	0.69	3.97	4451.11	3089.31	1361.31	69.41
52			2	5.06	0.69	3.97	4451.11	4384.24	66.86	98.5
53		(Sans vitrage) sun trek	1	3.87	0.86	17.68	4451.11	3185.91	1265.2	71.58
54			2	7.74	0.86	17.68	4451.11	4218.7	232.41	94.78
55		(Sous vide) haval herzog	1	4.58	0.54	1.60	4451.11	4043.69	407.42	90.85
56			2	9.16	0.54	1.60	4451.11	4451.11	0	100
57		(Vitré) Velux cli u10	1	2.22	0.68	4.18	4451.11	25752.89	1698.22	61.85
58			2	4.44	0.68	4.18	4451.11	4168.29	282.82	93.65
59		(Sans vitrage) Heliocol	1	2.7	0.87	21.31	4451.11	2394.97	2056.13	53.81
60			2	5.4	0.87	21.31	4451.11	3724.15	726.96	83.67
61		(Sous-vide) consolar	1	1.16	0.54	1.04	4451.11	1447.35	3003.76	32.52
62			2	2.32	0.54	1.04	4451.11	2628.9	1822.2	59.06

III.4. Validation des résultats

III.4.1. Résultats obtenus et validation

Afin de valider notre programme, nous avons comparé les résultats obtenus concernant l'éclairement solaire (Fig III.12) et température moyenne mensuelle (Fig III.13) ainsi que la couverture solaire et rendement du système solaire (Fig III.14) avec ceux d'un autre programme. Nous avons choisi pour cela le programme 'RETScreen', qui se présente sous forme de fichier Excel. Pour; exactement, les mêmes données d'entrées et pour site Ghardaïa, les résultats obtenus sont les suivants:

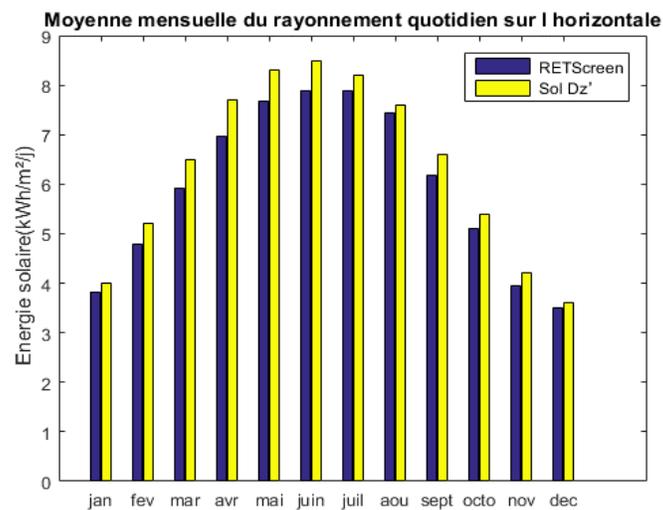


Figure III.12: Comparaison des résultats obtenus concernant l'éclairement solaire entre 'Sol Dz' et RETScreen pour le site Ghardaïa.

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

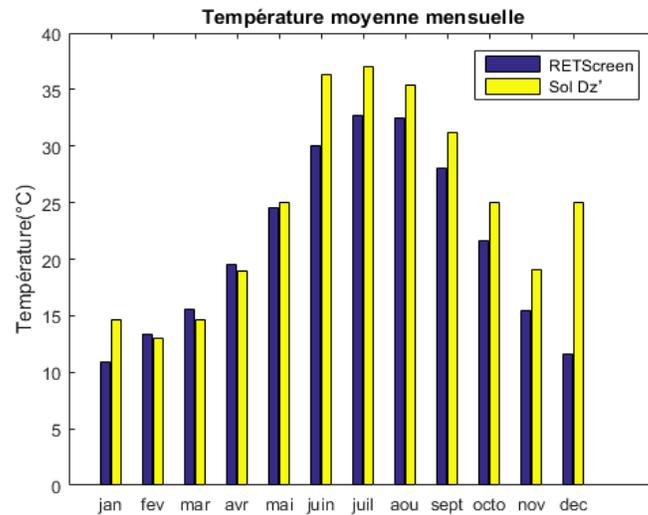


Figure III.13: Comparaison des résultats obtenus concernant la température moyenne mensuelle entre 'Sol Dz'' et RETScreen pour le site Ghardaïa.

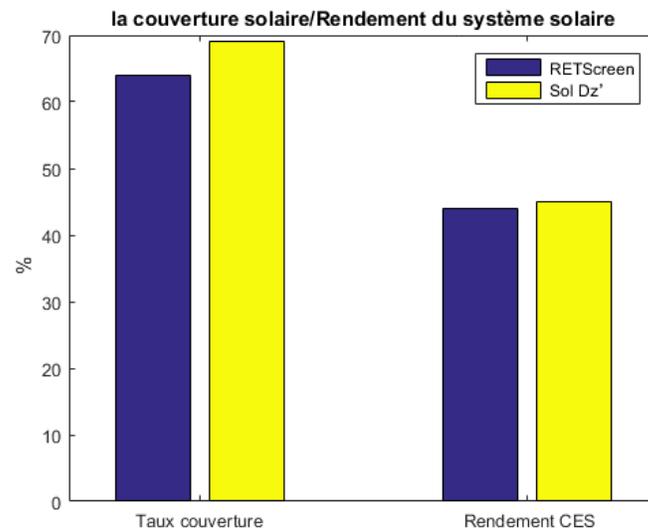


Figure III.14: Comparaison des résultats concernant la couverture solaire et rendement du système solaire en utilisant le capteur (Vitré) Sun Vescal sur le site de Ghardaïa.

CHAPITRE III : Programme de dimensionnement réalisé ,résultats et discussion.

La figure (III.15) et figure (III.16) représentent des exemples de fenêtre du logiciel ‘RETscreen’ utilisé pour la validation des résultats et du programme ‘SOL Dz’ durant le calcul, respectivement :

Capteurs solaires		Vitrés	
Type de capteurs	-	Vescal	
Manufacturier de capteurs solaires	-	Vescal	<i>voir note technique 7</i>
Modèle de capteur solaire	-	Ceriti SKF 225	<i>voir la base de données de produits</i>
Surface brute par capteur	m ²	2.53	1,00 à 5,00
Surface de captage par capteur	m ²	2.32	1,00 à 5,00
Coefficient Fr (tau alpha)	-	0.69	0,50 à 0,90
Coefficient Fr UL	(W/m ²)*°C	3.97	0,30 à 3,00
Coefficient de température de Fr UL	(W/(m ² *C) ²)		0,000 à 0,010
Nombre de capteurs suggéré		1	
Nombre de capteurs		1	
Surface totale brute de capteurs	m ²	2.5	
Stockage thermique			
Volume de stockage par m ² de capteur	L/m ²	45.9	37,5 à 100,0
Volume total de stockage	L	106	
Infrastructures connexes			
Système utilisé en conditions de gel ?	oui/non	Non	
Diamètre de tuyauterie suggéré	mm	10	8 à 25 ou PVC 35 à 50
Diamètre de tuyauterie	mm	1	8 à 25 ou PVC 35 à 50
Puissance de pompe par m ² de capteur	W/m ²	3	3 à 22, ou 0
Pertes de chaleur (tuyaux et stockage)	%	0%	1% à 10%
Pertes dues à la neige et aux salissures	%	0%	2% à 10%
Dist. horiz. des capteurs au local technique	m	0	5 à 20
Nombre d'étages du local technique aux capteurs	-	0	0 à 20
Production annuelle d'énergie (3.50 mois considérés)		Données	
Puissance solaire thermique installée	kW _{th}	2	Notes/Plage
	MWh	0.002	
Électricité à fournir pour le pompage	MWh	0.01	
Production annuelle d'énergie au m ²	kWh/m ²	34.1	
Rendement du système solaire	%	44%	
Taux de recouvrement de la charge	%	64%	
Énergie renouvelable fournie	MWh	0.86	
	kWh	863	<i>compléter la feuille Analyse des coûts</i>

Version 3.1 © Ministère de Ressources naturelles Canada 1997-2005. RNCan/CTEC - Varennes

Intro **Modèle énergétique** Ressource solaire et besoins Analyse des coûts Analyse des

Figure III.15: Illustration des résultats la couverture solaire et du rendement du système solaire en utilisant le logiciel ‘RETscreen’ (capteur Vitré Sun Vesca) de site Ghardaïa.

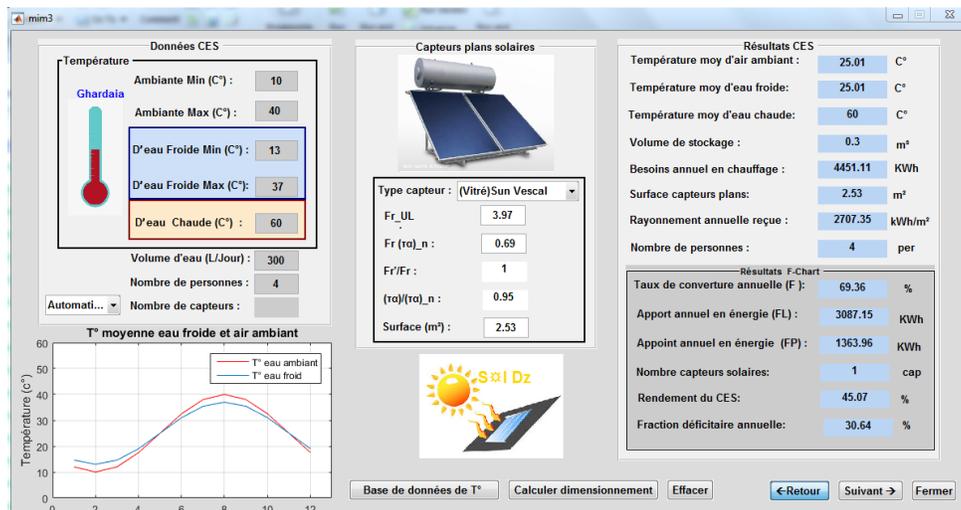


Figure III.16: Illustration des résultats de la couverture solaire et du rendement du système solaire en utilisant le programme ‘SOL Dz’ (capteur Vitré Sun Vesca) de site Ghardaïa.

III.4.2. Discussions et interprétation des résultats

La validation du programme réalisé ‘S☀l Dz’ par le logiciel ‘RETscreen’ a permis de distinguer un écart plus ou moins important concernant la ville Ghardaïa. Exemple : la couverture solaire et rendement du système (Fig III.15 et Fig III.16) est de 69.36% pour le premier programme et de 64% pour le second. Dans le cas de l’éclairement solaire et la température moyenne mensuelle, on constate une légère différence, qui est dû au faite que le logiciel ‘RETscreen’ utilise des données mondiales d’enseillements, peu précises pour le cas de l’Algérie. Par contre ; pour le cas de notre programme, on s’est basé sur les données fournies par la modélisation de l’éclairement solaire à partir du programme ‘S☀l Dz’.

Dans l'ensemble, nous trouvons que la validité du programme est bonne et qu’il existe une convergence claire entre les deux logiciels, de sorte que l'on peut affirmer que les résultats du programme ‘S☀l Dz’ sont fiables au regard des données précédentes.

III.5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on s’est proposé de développer un outil informatique pour la gestion des projets de chauffe-eau solaires en Algérie. Après un exposé de nos résultats obtenus par programme ‘S☀l Dz’ on conclut qu’il serait mieux d’incliner les capteurs plans selon une inclinaison égale à la latitude + 10 puisque la couverture solaire sera plus intéressante. Nous notons également que les capteurs sous vides ; qui présentent des performances excellentes (exemple ;haval herzog) selon les résultats obtenus, mais ce dernier reste cher en raison de la technologie de sa fabrication. La meilleure solution reste d'utiliser un capteur vitré pour son efficacité et cout réduit. Le capteur sans vitrage peut être utilisé pour les piscines et les zones très chaudes. Nous terminons le chapitre par une validation du programme ‘S☀l Dz’ élaboré et destiné pour le dimensionnement des chauffe-eau solaires individuels en Algérie.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Un choix centralisateur nous amène souvent à privilégier plusieurs sources énergétiques, sans véritablement analyser le bien-fondé de cette attitude. Dans ce mémoire, nous avons utilisé l'énergie la plus appropriée à l'usage (Le solaire). Cette source énergétique a des avantages planétaires, on cite à titre d'exemple :

- ✓ Le coût de son extraction (le soleil est gratuit).
- ✓ Le caractère renouvelable.
- ✓ L'impact sur l'environnement.

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 est un pays potentiellement intéressant pour l'exploitation de l'énergie solaire. Il dispose en effet sur un territoire d'un gisement solaire considérable.

Dans le cadre de ce travail on s'est proposé de développer un outil pour le dimensionnement des projets de chauffage solaire de l'eau en Algérie, le programme est baptisé « S☀l Dz ». Après une étude bibliographique sur le sujet, on a procédé à la programmation de la méthode de dimensionnement en considérant le cas de l'Algérie et on s'appuyant sur le modèle mathématique pour le calcul de l'éclairement solaire, dont le paramètre essentiel est le facteur de trouble de Linke.

Les tests entrepris pour vérifier aussi bien le bon fonctionnement et la fiabilité du logiciel réalisé, montrent que le programme de travail défini initialement a été réalisé dans son ensemble. L'approche que nous avons présentée montre la faisabilité de ce genre de projets en Algérie, les résultats obtenus sont satisfaisants, et ne constituent qu'une partie d'un vaste domaine.

Enfin, nous estimons atteindre les objectifs qui nous ont été assignés à savoir : la conception et développement du programme de dimensionnement des systèmes de production d'eau chaude solaire avec les connaissances acquises, et il reste à d'autres étudiants de tirer le meilleur de nos résultats et de les utiliser comme base de départ pour d'autres sujets

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Benkhelifa Abdelaziz . Modélisation et expérimentation d'un capteur solaire plan à eau Influence de l'intensité de l'éclairage solaire et de l'inclinaison du capteur solaire sur le rendement du capteur. Mémoire Présenté pour l'obtention du diplôme de master. Université Kasdi Merbah Ouargla.2012.
- [2] M. Capderou, 'Atlas solaire de l'Algérie', Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, T1, Office des Publications Universitaires, EPAU, Algérie, 1987
- [3]. Magazine Info Ressources Focus N°2/06 deuxième parution de l'an 2006.
- [4]. Projet Maghreb – Europe . Production d'Hydrogène Solaire , 2IWH 2007. Ghardaïa – Algeria. 27-29 October 2007.
- [5] Baroud Hinde , Djekaoua Habiba. Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semi-empiriques dans la région de Ghardaïa. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université De Ghardaïa 2017.
- [6] Mlle Mekki Dahbia , Mlle Tahri Fatima Zohra . Etude d'un système solaire avec réservoir.
- [7] Mr Bouziane Housseyn , Mr Chalabi MedRéda . Amélioration le rendement des capteurs solaires plans à eau par qualité des matériaux. Mémoire de Fin d'études , Université de Tlemcen 5/10/2013.
- [8] Thomas Letz , Xavier Cholin . Intégrer Le Solaire Thermique Dans Le Bâtiment Formation présentation de technologies solaires . INES Education , Janvier 2007-Décembre.
- [9]. 'Matlab/Simulink Tutorial', School of Electrical, Electronic and Computer Engineering, Release 13, Version R 2015 b.
- [10] Ben Guehza Mohammed Lakhdar . Impact De L'espace Entre Les Deux Vitrages Sur Le Rendement D'un Capteur Solaire. MEMOIRE Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister .Université De Kasdi Merbah Ourgla le : 24 - 2 – 2009.
- [11] Benjamin Dessus , François Pharabod . l'énergie solaire . presses universitaires de France. Paris.1996
- [12] Bouden Abdelmalek .Analyse optimisée de système de pompage photovoltaïque . Université Mentouri de Constantine, 2008.

BIBLIOGRAPHIE

- [13] Site Web : Blanca, <https://locuraviajes.com/paralelos-y-meridianos,25/02/2019>.
- [14] F. Linke, 'Transmissions - koeffizient und trübungsfaktor'. beiträge zur physik der atmosphere. vol. 10, pp. 91 – 103, 1922.
- [15] F. Kasten, 'A simple parameterization of two pyrheliometric formulae for determining the linke turbidity factor'. Meteorology rdsch. vol. 33, pp. 124 - 127, 1980.
- [16] K. Feussner and P. Dubois . 'Trübungsfaktor, precipitable water'. Staub. gerlands beitr., geophysical. vol. 27, pp. 132 - 175, 1930.
- [17] A. Louche, G. Peri and M. Iqbal. 'An analysis of linke turbidity factor'. Solar Enegy.vol. 37, n°6, pp.393 - 396, 1986.
- [18] Gama Fatiha Née Yettou , Mohand Oussaid Kahina . Système de Régulation et decontrôle des installations photovoltaïques. Université Saâd Dahlab de Blida . Faculté des sciences de l'ingénieur.2005.
- [19] Anil Kalyanpur, Marc-Etienne Mercadier, Philippe Blanc . Gisement solaire en France caractérisation de la ressource énergétique. Profil de répartition et volatilité. Environnement et Technique. 2013.
- [20] Mouhous Chaouchi . Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné. Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen . URMER .2012.
- [21] Samira Mouhous Chaouchi. Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné. Université Abou Bekr Belkaid. 2012
- [22] Hadja Guedaouria . Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire LPDS au sien de l'université de Béchar. Université Bechar. Faculté des sciences exactes.2017.
- [23] Site Web : inconnu, <https://www.blet-mesure.fr/premiere-classe/pyrheliometre-pyhh0-1tcp.html>, 09/03/2019.
- [24] Belhadj Mohammed. Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome .thèse de magister. Université de Béchar. 2007-2008.
- [25] P. Bessemoulin , J. Olivieri. Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette. Document Meteo-france (Service central d'exploitation de la meteorology and centr radiometrique de carpentras). 2000.
- [26] Yettou F. Optimisation d'un système solaire de production d'eau chaude. Mémoire de Magister. Ecole Nationale polytechnique. Alger 2009.

BIBLIOGRAPHIE

- [27].Hadri Oussama, Benlamnour Ahmed Amine. Dimensionnement d'un Chauffe-eau Solaire .Mémoire Master Professionel Spécialité Instrumentation. Le 25/05/2017.
- [28] Site Web : inconnu,<https://www.climamaison.com/lexique/chauffage-solaire.htm>,03/04/2019
- [29] Site Web : inconnu, <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/chauffe-eau-solaire/fonctionnement-chauffe-eau-solaire> 4/03/2019.
- [30] Site Web : <http://outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/thermosiphon-monobloc+a91.html> ,18/03 /2019.
- [31] Site Web : inconnu ,http://www.alterenergies.fr/cesi_thermosiphon.html ,04/04/2019
- [30] Site Web : inconnu, <http://outilssolaires.com/installation/chauffe-eau-solaire/thermosiphon/>, 04/04/2019
- [33] Talamali Donia, Mougrai Nour el islam. Simulation des performances d'un chauffe-eau solaire. mémoire de fin d'études Master en Génie Mécanique Université M'Hamed Bougara de Boumerdès,2015/2016.
- [34] J, Bernard.Energie solaire. Calculs et optimisation. (2004).
- [35] Kalla Fayçal. Conversion thermodynamique de l'énergie solaire. Etude et modélisation d'un apteur solaire. Memoire Présenté pour l'obtention du diplôme de Magister. Université De - SOUTENU LE 15/01/2014.
- [36] Site Web: inconnu, https://chauffe-eau.ooreka.fr/astuce/voir/746633/appoint-pour-votre-chauffe-eau-solaire?fbclid=IwAR2Hr2aN2HR38mel_FL36GrGzawmy5pSQU9wXtkVXMxlogGhdZhzNmQ0P3Y , 15/02/2019.
- [37].F. Bouhired. Développement des Chauffe-Eau Solaires en Algérie. Division solaire thermique et géothermique, n° %117, p. 2010.

ملخص

في السنوات الاخيرة , قامت العديد من البلدان بالمضي قدما نحو الاستفادة من الطاقات المتجددة, تعتبر الطاقة الشمسية طاقة واعدة ومتاحة على نطاق واسع في الجزائر.

في هذا العمل قمنا بدراسة تحجيم السخان المائي الشمسي الفردي من خلال تطوير برنامج يعتمد على قاعدة المجمعات الشمسية المسطحة, حساب الطاقة الشمسية تم باستخدام نموذج رياضي مطبق بالجزائر . استخدام نماذج الاشعة الشمسية هي عمليا واحدة من الطرق الوحيدة للتغلب على ندرة محطات الاشعاع الشمسي في البلاد, لذلك تم انجاز برنامج باستخدام برمجة لغة MATLAB ويتم التحجيم بواسطة طريقة F-Chart. ستكون هناك حاجة الى معلمات اخرى للبرنامج مثل الحرارة المحيطة ودرجة حرارة المياه البارد . ان اختبار هذا البرنامج يعد ضروريا وحتمية التأكد من صحة النتائج المعطاة من العمل في مختلف المدن الجزائرية.

الكلمات المفتاحية : الطاقات المتجددة , الطاقة الشمسية , السخان المائي الشمسي , الإشعاع الشمسي , نمذجة الاشعاع, طريقة F-Chart .

ABSTRACT

In recent years, many countries have moved forward to take advantage of renewable energies. Solar energy is a promising and widely available energy in Algeria.

This work is to study the sizing of the individual solar water heaters developing an program based on using a data base of flat plat collectors and since applied to Algeria, the use of solar radiation models is practically one of the only ways to overcome the lake of solar radiation measurement stations in our country. Therefore, a program was performed using MATLAB programming and the sizing will be done by the *f*-Chart method. Other program parameters such as ambient temperature and cold water temperature will be also needed. The test of this program is necessary and it is imperative to verify the validity work results at the different cities of Algeria.

Keywords: renewable energy, solar energy, solar water heater, solar radiation, Capderou model, *f*-Chart method.