

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA 01



FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DES ENERGIES RENOUVLABLES

**Mémoire de Fin d'Etudes
de MASTER
ACADEMIQUE**

Option : Conversion Thermique.

Thème :

**Dimensionnement et expérimentation d'une
installation de chauffe-eau solaire destinée
pour une maison individuelle**

Présenté par :

Nedjai Ilyes

Devant le jury composé de :

Pr. Merzoug Mustapha	Président
M^{me}.Fatiha Sahnoune	Encadreur
Dr. Lafri Djamel	Co-encadreur
Mr. Kaci Karim	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciements

Je voudrais dans un premier temps adresser toute ma reconnaissance à la directrice de ce mémoire, Madame F. SAHNOUNE, pour sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter ma réflexion. Je tiens à lui exprimer ma gratitude et mon profond respect.

Mes vifs remerciements à monsieur le docteur LAFRI DJAMEL qui m'avez aussi honoré de guider ce travail, collaborer à son enrichissement par ses directions judicieuses.

Je désire aussi remercier les professeurs du département des énergies renouvelables Blida 01, qui m'ont fourni les outils nécessaires à la réussite de mes études universitaires.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi, pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Dédicace

Avec l'expression de ma reconnaissance, je dédie ce modeste travail à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverais jamais à leur exprimer mon amour sincère.

A l'homme, mon précieux offre du dieu, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect : mon cher père.

A la femme qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non âmes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureux : mon adorable mère.

A mes chères sœurs que Dieu les protège et leurs offre la chance et le bonheur.

A ma famille, mes proches et à ceux qui me donnent de l'amour et de la vivacité. Que Dieu leur donne une longue et joyeuse vie.

A tous les amis que j'ai connu jusqu'à maintenant. Merci pour leurs amours et leurs encouragements.

NOMENCLATURE

Symbole	Nomenclature	Unité
A	Surface	m ²
A _e	Surface d'échange	m ²
a	Azimut du soleil	Degré
a*	Albedo du sol	/
δ	La déclinaison	Degré
φ	La latitude	Degré
θ _z	Angle zénithale	Degré
V _j	volume d'eau chaude consommé quotidiennement	l
V _{ja}	consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement.	l
V _{jété}	consommation moyenne journalière	l
K _{iso}	conductivité thermique de l'isolant	w/m.°c
e _{ios}	épaisseur de l'isolant	m
I _{bβ}	Rayonnement solaire direct	w/m ²
I _{dβ}	Rayonnement solaire diffus	w/m ²
I _{rβ}	Rayonnement réfléchi	w/m ²
I _β	Rayonnement globale	w/m ²
I _{dh}	Les composantes diffuse	w/m ²
I _{gh}	Les composantes globale	w/m ²
I _{bh}	La composante direct	w/m ²
I _{CS}	La constante solaire	w/m ²
V _{s0}	Le volume de stockage	l
D _i	Diamètre intérieur mm	mm
Q''	Débit nominal	l/h
ρ	Masse volumique du fluide	kg/m ³
T _{sv}	Temps solaire vrai	/
T _L	Temps légal	/
E _t	Equation du temps.	/
L _{ref}	Longitude du méridien de référence	Degré

L_{lieu}	Longitude du lieu	Degré
D_j	La durée du jour	h
T_{CF}	Temps civil du fuseau horaire	h
T_U	Temps universel	h
I_0	Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère	w/m ²
I_{bn}	L'intensité du rayonnement solaire direct reçu par une surface réceptrice normale aux rayons du soleil.	w/m ²
S_b	Surface extérieure du ballon	m ²
V_b	Volume du ballon	m ³

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I- 1: Caractéristiques principales du soleil.	10
Tableau I- 2: Organigramme du diagramme solaire pour une latitude donnée.....	16
Tableau I- 3: Composition de l'atmosphère près de la surface.....	18
Tableau I- 4 : Caractéristiques optiques de quelques verres.	27
Tableau I- 5: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.	28
Tableau I- 6: Revêtements des surfaces d'absorbeur.	28
Tableau I- 7: Quelques propriétés des isolants.....	29
Tableau II- 1: les différents types des thermocouples et leur domaine de température	51

LISTE DES FIGURES

Figure I- 1: Vue en coupe partielle du Soleil	9
Figure I- 2: Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil	10
Figure I- 3: Mouvement apparent du Soleil en un point de l'équateur	11
Figure I- 4: Coordonnées horizontales	12
Figure I- 5: Coordonnées équatoriales.	13
Figure I- 6: Variations annuelles de l'équation du temps	15
Figure I- 7: La divergence de l'énergie du soleil vers la terre	17
Figure I- 8: variation annuelle de l'éclairement globale	17
Figure I- 9: Spectre du rayonnement solaire	20
Figure I- 10: Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur	20
Figure I- 11: héliographe d'après Campb II. Stock	23
Figure I- 12: Pyranomètre	Error! Bookmark not defined.
Figure I- 13: Radiomètre	23
Figure I- 14: Pyrhéliomètre	23
Figure I- 15: Le capteur plan vitré.....	24
Figure I- 16: Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré	25
Figure I- 17: Capteur non vitré.....	25
Figure I- 18: Le capteur sous vide.....	26
Figure I- 19: Coupe schématique d'un capteur plan vitré	26
Figure I- 20: Raccordement en série	30
Figure I- 21: Raccordement en parallèle	31
Figure I- 22: Raccordement de 2 rangées de capteurs en série	31
Figure I- 23: Raccordement de 2 rangées de capteurs en parallèles	31
Figure I- 24: Ballon de stockage d'un CES.....	32
Figure I- 25: Conduites de liaison isolées	33
Figure I- 26: Les types d'échangeur à plaque et serpentins.....	34
Figure I- 27: Moyenne mensuelle de la production d'un chauffe-eau solaire et de l'appoint.	35
Figure I- 28 : Le Schéma représentative d'une installation Chauffe-eau Solaire.	35
Figure I- 29: Chauffe- eau solaire thermosiphon sans échangeur de chaleur.	36
Figure I- 30: Chauffe-eau Solaire en Thermosiphon avec Echangeur	37
Figure I- 31: Chauffe-Eau avec Circulateur et Echangeur à l'Intérieure de réservoir	38
Figure I- 32: Chauffe-Eau avec Circulateur et Echangeur à l'extérieur du réservoir	38
Figure III- 1: Banc d'essai du CESI à BOUZAREAH.....	50
Figure III- 2: l'opération de l'étalonnage	52
Figure III- 3: mesure de la température à l'entrée du capteur.	53
Figure III- 4: mesure de la température à la sortie du capteur.	53
Figure III- 5: mesure de la température à l'entrée de la cuve de stockage.....	45
Figure III- 6: mesure de la température à la sortie de la cuve de stockage.	53
Figure III- 7: mesure de la température ambiante.	54
Figure III- 8: La mesure de l'éclairement globale par un pyranomètre de type.....	54
Figure III- 9: l'enregistreur OMGA	55
Figure III- 10 : L'affichage des mesures	56
Figure IV- 1: L'évolution de la température ambiante.	57
Figure IV- 2: L'évolution de la l'éclairement globale.	57
Figure IV- 3: Mesure de température à l'entrée du capteur.	58

Figure IV- 4: Mesure de température à la sortie du capteur.....	58
Figure IV- 5: La température à l'entrée et sortie du capteur.	59
Figure IV- 6: Mesure de température à l'entrée de la cuve.....	59
Figure IV- 7: Mesure de température à la sortie de la cuve.	60
Figure IV- 8: La température à l'entrée et sortie de la cuve.....	61

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : GENERALITES SUR LES INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SOLAIRES	2
I.1-introduction :.....	2
I.2-Etat de l'art :	2
I.3-principes généraux :.....	8
I.3.1- Généralités sur le soleil :	8
I.3.2- Aspects géométriques :.....	10
I.3.3- Paramètres astronomiques :.....	12
I.3.4- Le diagramme solaire :	15
I.3.5- Aspects énergétiques :	16
I.4-Description de l'installation solaire :.....	23
I.4.1.-Capteurs solaires thermiques :.....	23
I.4.2- La cuve de stockage :.....	32
I.4.3- La tuyauterie :	33
I.4.4- L'échangeur :.....	33
I.4.5- L'appoint :	34
I.4.6- Le chauffe-eau solaire :	35
I.5- conclusion :.....	39
Chapitre II : DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SOLAIRE	40
II.1 Introduction :	40
II.2. Dimensionnement de l'installation :.....	40
II.2.1. Dimensionnement des capteurs solaires :.....	40
II.2.2. Dimensionnement du stock :	40
II.2.3 Dimensionnement de l'appoint électrique :.....	41
II.2.4. Dimensionnement de l'isolant thermique du ballon :.....	41
II.2.5. Dimensionnement de la canalisation :	42
II.3. Application de la méthode de calcul :.....	42
II.3.1 Condition d'un bon dimensionnement :	43
II.3.2 Paramètre de calcul :.....	43
II.4. Résultats de calculs :.....	46
II.5. Interprétation des résultats de dimensionnement :	49
II.6. Conclusion :.....	49
Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel	50

III .1- Introduction :	50
III. 2-Paramètres caractérisant le site de BOUZAREAH (nord) :	50
III .3-Description du banc d'essai (BOUZAREAH) :	50
III.4. Déroulement de l'expérimentation :	51
III .5.-Paramètres à mesurer :	51
III.6-Mesure des températures de l'eau :	51
III.7. Choix des thermocouples :	51
III.8-Normalisation des thermocouples :	51
III.9-Mesure de l'éclairement global incliné :	54
III.10- Enregistrement des données par l'enregistreur OM-300 SERIES :	55
III.11-Affichage des valeurs de mesure :	55
III.12. Conclusion :	56
Chapitre IV : RESULTATS ET INTERPRETATION	57
IV.1 Introduction :	57
IV.2 Interprétation :	57
IV.3- Conclusion :	61
Conclusion générale	62
Bibliography	

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Pour une préservation environnementale et une utilisation plus économique de l'énergie, il faut une transition vers le développement et l'utilisation des énergies renouvelables qui ont des avantages particuliers par rapport aux autres sources d'énergies d'origines fossiles car l'utilisation de ces dernières se traduit inévitablement par des rejets gazeux qui contribuent à l'aggravation du phénomène de l'effet de serre et la pollution de l'atmosphère, pollution des sols, ...etc. Parmi les énergies renouvelables on trouve le soleil, le vent et la biomasse...etc. Cependant, l'énergie solaire est plus importante que toutes les autres sources d'énergie, parce qu'elle est très proche de nos activités quotidiennes, elle doit constituer l'axe principal de toute politique de développement durable et soutenable.

L'énergie solaire a connu plusieurs applications majeures, elle est basée essentiellement sur la thermique et le photovoltaïque. Parmi les applications du solaire thermique on distingue : le chauffage solaire, le froid solaire, le séchage solaire, la distillation solaire, les serres solaires, ...etc.

Dans notre travail nous nous intéressant au solaire thermique, plus particulièrement à la production d'eau chaude sanitaire pour satisfaire les besoins d'une maison individuelle en utilisant une installation de chauffe-eau solaire à thermosiphon sans échangeur.

Le travail que nous avons élaboré consiste à faire un dimensionnement et une expérimentation des performances thermique d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon. Au niveau de CDER (centre de développement des énergies renouvelables) de Bouzaréah ALGER.

Nous avons traité lors de notre travail les points suivants :

- ❖ Le premier chapitre est consacré à des généralités sur l'installation de production d'eau chaude solaire à savoir les données générales du gisement solaire, les différents types des capteurs solaires thermiques et les différents chauffe-eau solaires...etc.
- ❖ Le deuxième chapitre expose le dimensionnement de l'installation solaire, et le calcul prévisionnel des performances énergétiques, en utilisant le logiciel SOLO développé par le CSTB France.
- ❖ Le troisième chapitre consiste à faire une étude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel à thermosiphon sans échangeur.
- ❖ Le dernier chapitre est consacré aux résultats et interprétations.
- ❖ Et nous clôturons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Chapitre I : GENERALITES SUR LES INSTALLATIONS DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SOLAIRES

I.1-introduction :

L'énergie solaire est une énergie non polluante et durable au long terme. Elle conserve l'environnement, préserve la santé et les ressources énergétiques fossiles, et ne produit pas de déchets ni d'émissions polluantes, notamment de dioxyde de carbone. En outre les enjeux environnementaux et l'impact sur les gaz à effet de serre, l'eau chaude représente une partie importante de la consommation énergétique des bâtiments ou des institutions publiques et individuelle, qui consomment une grande quantité d'eau chaude, et peuvent faire des économies grâce à l'utilisation de l'eau chaude solaire.

I.2-Etat de l'art :

En 1985 C.D. RAKOPOULOS et Al ont fait une étude théorique et expérimentale de chauffe-eau solaires domestiques à thermosiphon Avec chauffage indirect. Ils ont montré que malgré la grande variété des conditions réelles (ensoleillement, température, profil de tirage) utilisées pour tester le présent modèle à différences finies, l'analyse a correctement prédit les performances du présent système thermosiphonique avec un échangeur de chaleur, dans des conditions de prélèvement d'eau chaude. Son succès pour les prédictions quantitatives s'est avéré élevé, en particulier compte tenu de sa relative simplicité et de son faible coût.

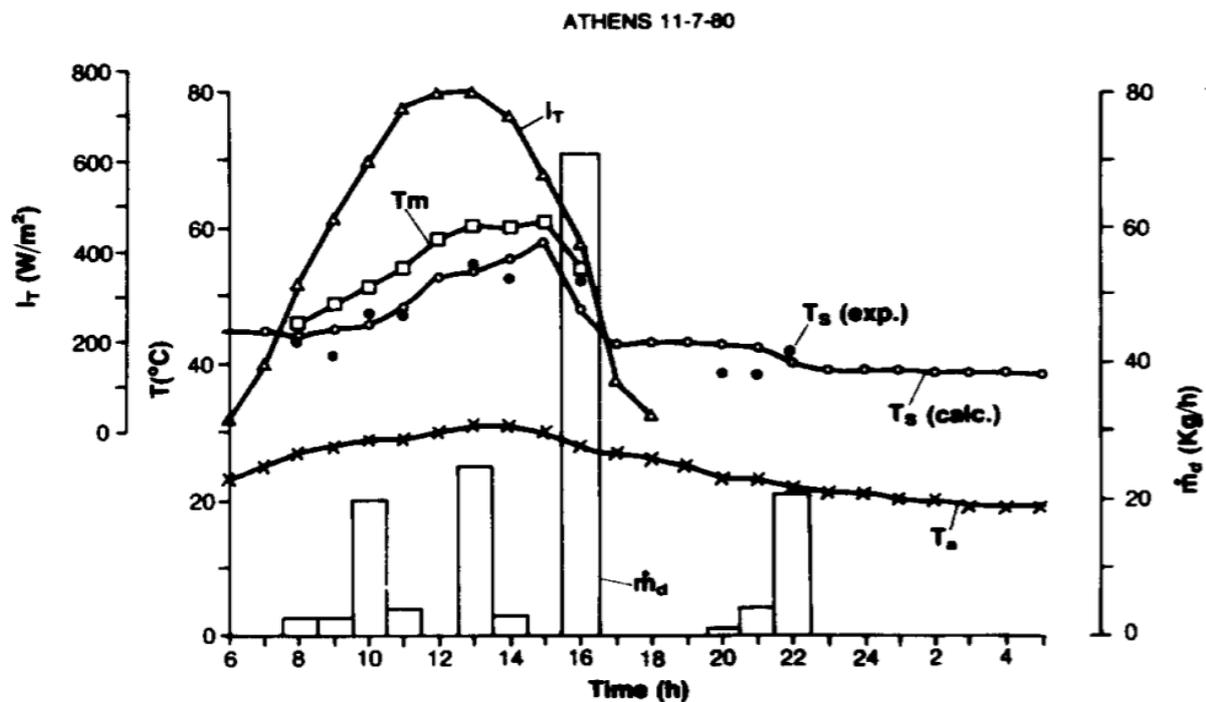


Figure : Courbes mesurées de l'ensoleillement (I), de la température ambiante (T_a), du profil de tirage (m_d) et de la température de l'eau du réservoir (T_s). Courbes prédites pour les températures du fluide du capteur (T_m).

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

En 2005 Mehmet Esen et Al ont fait une étude expérimentale sur les fluides caloporteurs pour chauffe-eau solaire biphasé fermé à thermosiphon, pour déterminer les performances thermiques de ce dernier dans des conditions réelles de fonctionnement. Il s'est avéré que le fluide frigorigène ayant le meilleur rendement de collecte de l'énergie solaire thermique parmi les fluides de travail utilisés dans cette étude expérimentale était le fluide frigorigène, fluides utilisés dans cette étude expérimentale était le R410A.

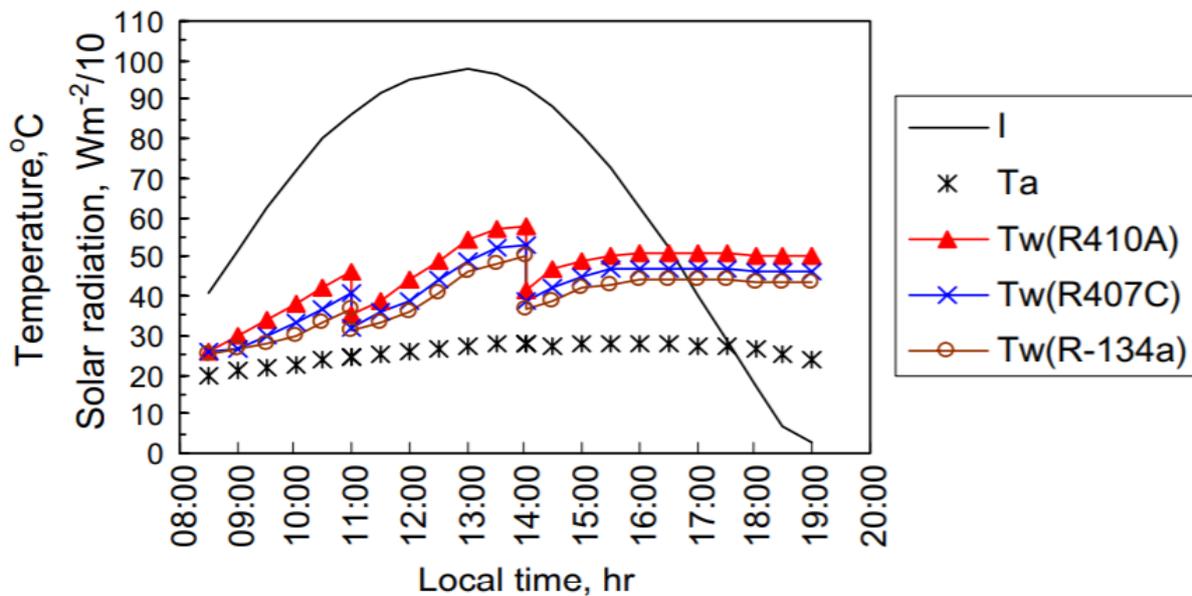


Figure : Variations quotidiennes du rayonnement solaire (I), de la température ambiante (Ta) et de la température moyenne de l'eau (Tw) pour différents réfrigérants dans les 3 test.

En 2008 S. A. Hakem et Al ont étudié le dimensionnement de chauffe-eau solaire individuel par un programme informatique en se basant sur une base de données de capteurs et une modélisation de l'éclairement solaire en Algérie. Ils ont eu une nette influence du rayonnement sur la variation de la température comme résultat. Donc une détermination de la performance instantanée du capteur solaire plan pour la détermination de ces caractéristiques.

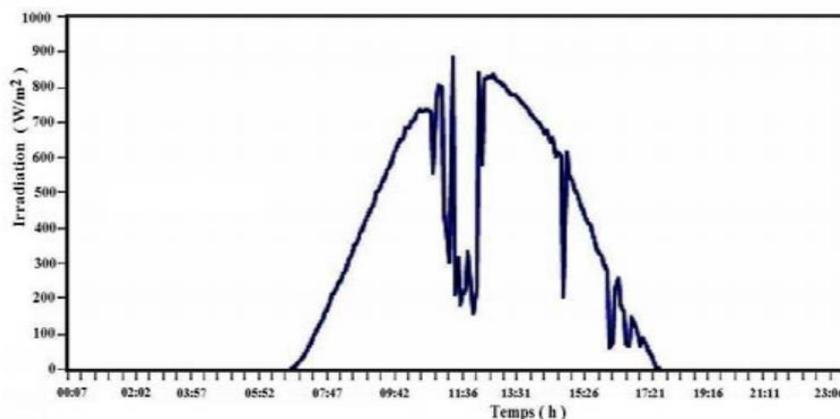


Figure : Variation de l'irradiation solaire durant la journée du 10 octobre

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

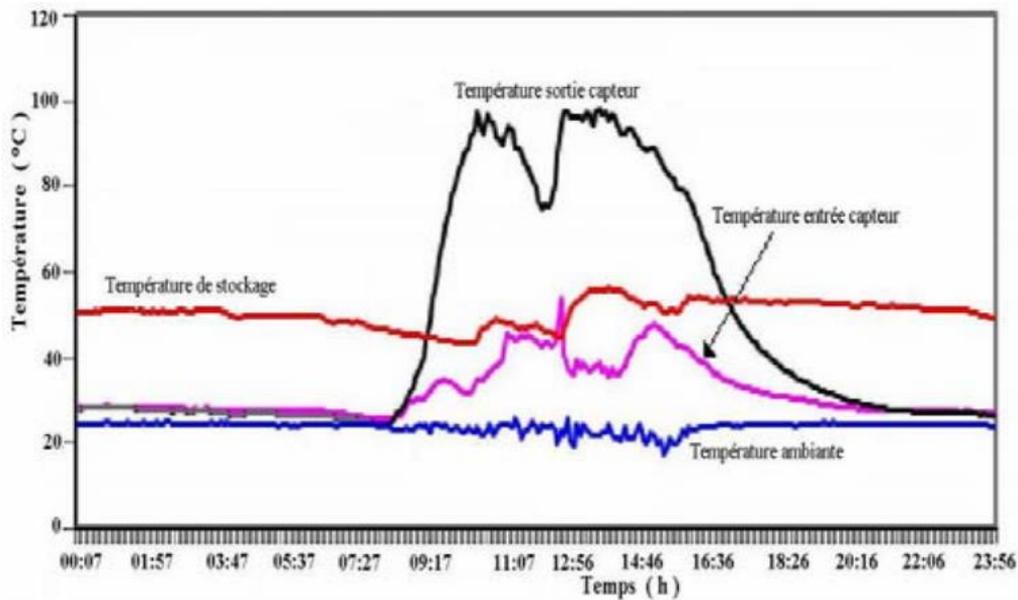


Figure : Variation des différentes températures en une journée

En 2011 F. Sahnoune et Al ont fait une étude comparative des performances thermiques d'un prototype de chauffe-eau solaire pour deux sites algériens. Leur objectif est de définir la rentabilité d'une installation de production d'eau chaude solaires en Algérie. Ils ont acquis à un résultat que ce dernier est très rentable, que ce soit au sud ou en nord du pays. On peut satisfaire un grand pourcentage des besoins en eau chaude, si l'installation est bien dimensionnée.

Tableau 1: Résultats de dimensionnement de l'installation à Alger

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
Temp. Ext.	11,0	12,0	13,0	15,0	18,0	21,0
Temp Eau	14.2	14.7	15.2	16.2	17.7	19.2
Mois	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Temp. Ext.	24,0	25,0	23,0	19,0	15,0	12,0
Temp Eau	20.7	21.2	20.2	18.2	16.2	14.7

Taux de couverture solaire	64.4 %	Apports solaires annuels	1758 kWh/an
Besoin annuel	2772 kWh/an	Productivité annuelle	440 kWh/m ² .an

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Tableau 2: Résultats de dimensionnement de l'installation à Adrar

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin
Temp. Ext.	12,0	16,0	19,0	24,0	28,0	34,0
Temp. Eau	18.2	20.2	21.7	24.2	26.2	29.2
Mois	Juil.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
Temp. Ext.	36,0	36,0	32,0	25,0	18,0	13,0
Temp. Eau	30.2	30.2	28.2	24.7	21.2	18.7
Taux de couverture solaire	87.5 %		Apports solaires annuels		1898 kWh/an	
Besoin annuel	2169 kWh/an		Productivité annuelle		475 kWh/m ² .an	

En 2013 Nay Zar Aung et Al ont fait une analyse numérique de l'effet du diamètre et de l'inclinaison de sur les paramètres du système dans un chauffe-eau solaire biphasé à thermosiphon en boucle fermée. Ce travail a permis de comprendre et de fournir des informations utiles pour la conception et la construction d'un système de thermosiphon à deux phases. L'efficacité maximale du collecteur augmente avec l'augmentation de la taille de la colonne montante. L'efficacité du collecteur dans une boucle de thermosiphon à deux phases augmente fortement avec l'augmentation de l'inclinaison du collecteur jusqu'à la condition optimale. Ensuite, il montre une tendance plate au-delà de.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

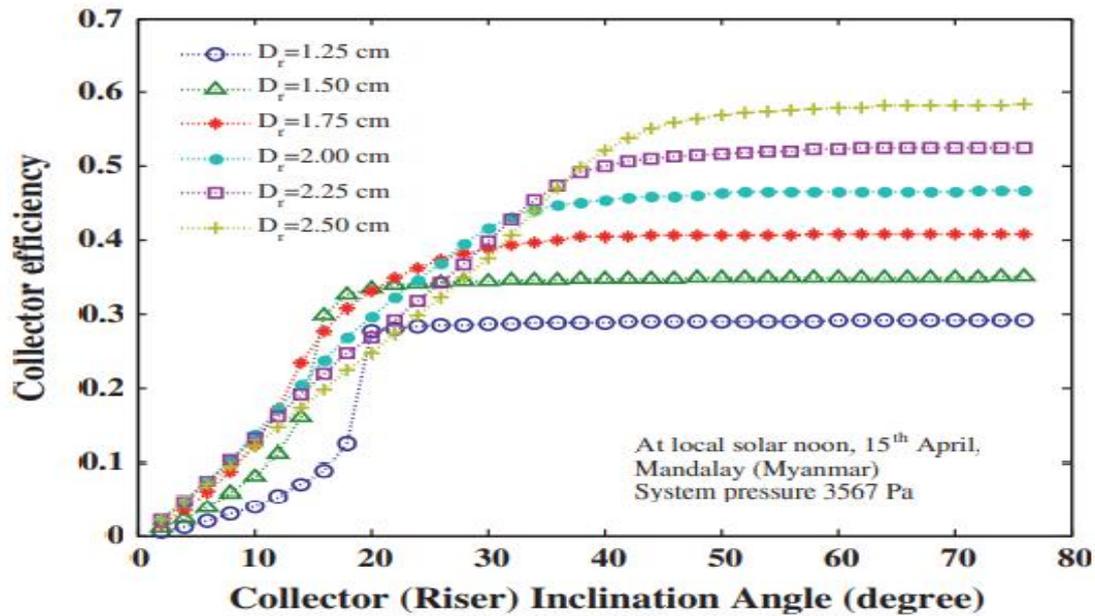


Figure : Efficacité du collecteur à différentes inclinaisons du collecteur (en chine).

En 2014 Khaled Zelzouli et Al ont fait une étude numérique et expérimentale d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon en Tunisie. Un modèle dynamique pour les chauffe-eau solaires domestiques avec un réservoir de stockage horizontal a été développé. Les résultats numériques montrent un assez bon accord avec les mesures expérimentales. Les résultats numériques montrent que la solution technique des équations différentielles permet de prédire la performance réelle du système. Ils ont montré que le polyuréthane est un très bon matériau pour l'isolation des systèmes thermiques. Ils ont affirmé également que la dégradation de la température de l'eau dans le réservoir de stockage thermique est fortement influencée par le capteur et les coefficients de perte de stockage, et ont affectés que la performance du ballon de stockage est plus influencée par les pertes du stockage que par les pertes du collecteur.

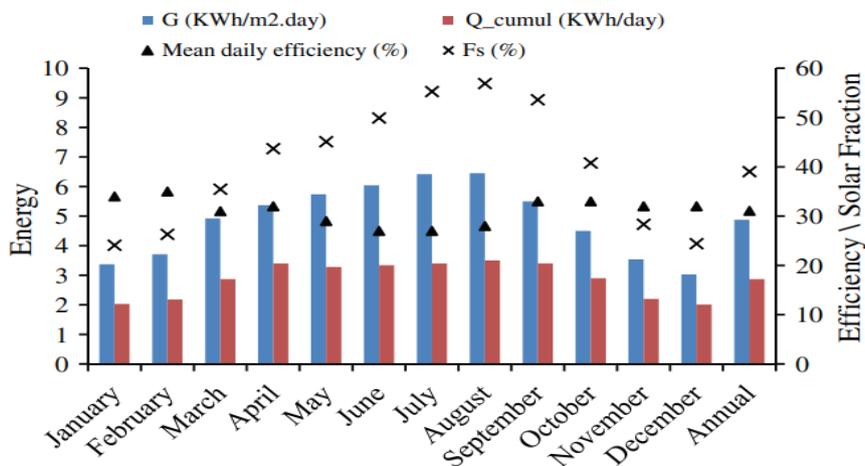


Figure : les performances du système

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

En 2020 Touhami BAKI et Al ont fait une étude des performances d'un chauffe-eau solaire individuel installé à Oran, à partir de l'étude de l'évolution de la température à l'intérieur du ballon, en se basant sur le bilan d'énergie des entrées et des sorties et de l'accumulation à l'intérieur du ballon. ils ont conclu que la couverture de l'énergie solaire peut atteindre les 60% avec un minimum de 7% au mois de janvier pour un seul panneau, l'efficacité d'une telle installation est prouvée.

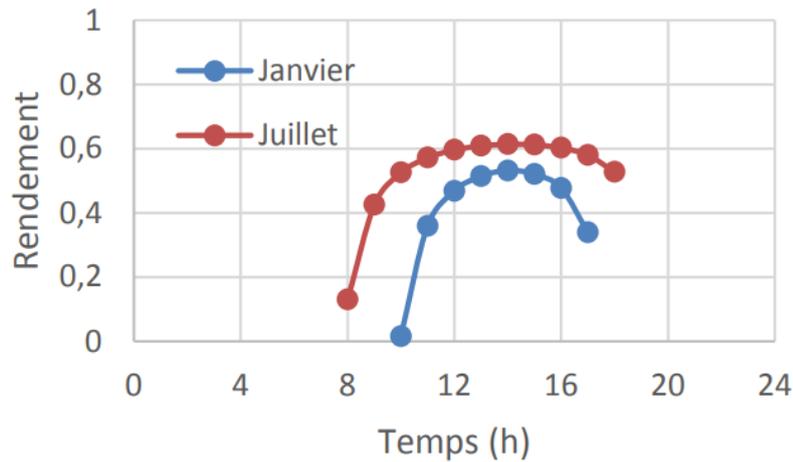


Figure : Rendement horaire du panneau

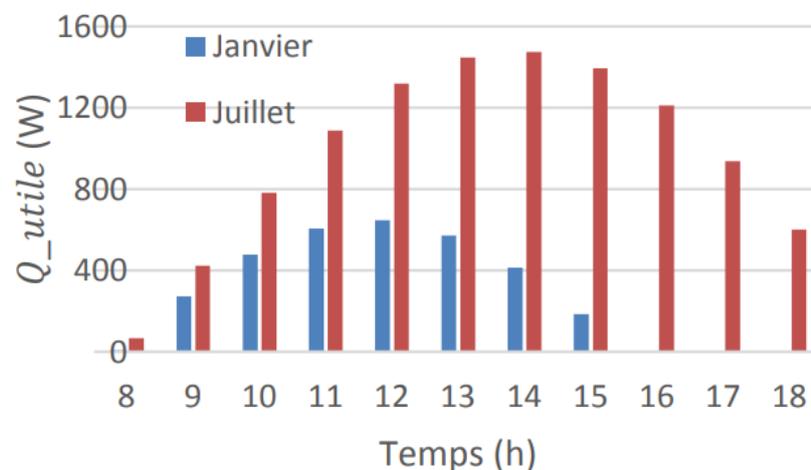
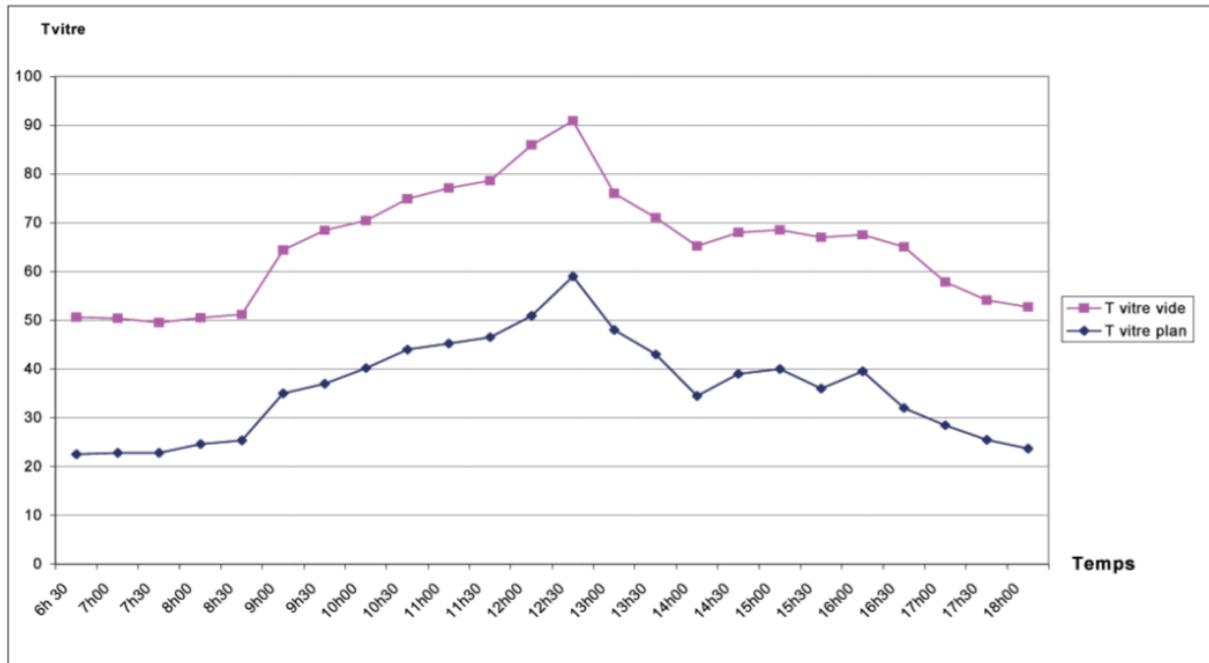


Figure : Puissance utile fourni par le panneau

En Juin 2007 Karim KACI a fait une étude sur des applications des Chauffe-Eau Solaire à L'URAER de GHARDAIA après le choix de ce lieu il a dimensionné la surface nécessaire pour couvrir les besoins en eau chaude, le travail a été fait sur 4 différents types de capteurs avec une inclinaison à latitude du lieu. Après un mois de test il a constaté que la disponibilité de l'eau chaude était régulière durant toute la journée comme est présenté sur la figure si dessous , ce qui nous confirme bien la rentabilité et l'importance des applications de chauffe-eau solaire ici à Ghardaïa.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires



I.3-principes généraux :

I.3.1- Généralités sur le soleil :

I.3.1.1- Description du soleil :

Le soleil est une étoile autour de laquelle gravite la terre. Il se compose essentiellement de 73,46 % H_2 , de 24,85 % He. Son énergie provient des réactions thermonucléaires de fusion de l'hydrogène en hélium. Sa température superficielle moyenne est estimée à 5800K. La surface lumineuse habituellement visible, ou photosphère, est d'environ 100 km d'épaisseur. La chromosphère est la couche inférieure de l'atmosphère solaire, entre la photosphère et la couronne. Les taches solaires sont des taches sombres sur la surface de la photosphère qui correspondent à des zones plus froides, elles ont une très grande diversité de forme et d'étendue. Les observateurs comme Galilée, ont vu que les taches se déplaçaient au fil du temps, toujours dans le même sens, ainsi montrant la rotation du soleil. Le globe solaire limité par la photosphère à un rayon égal à 696000km, soit environ 109 fois le rayon équatorial de la terre. Sa densité moyenne n'est que de 1,41 de sorte que sa masse est seulement 333.000 fois celle de la terre, pour un volume 1300000 fois plus important. La distance moyenne de la terre au soleil est voisine de 150 millions de km. Le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour nous parvenir [2]

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

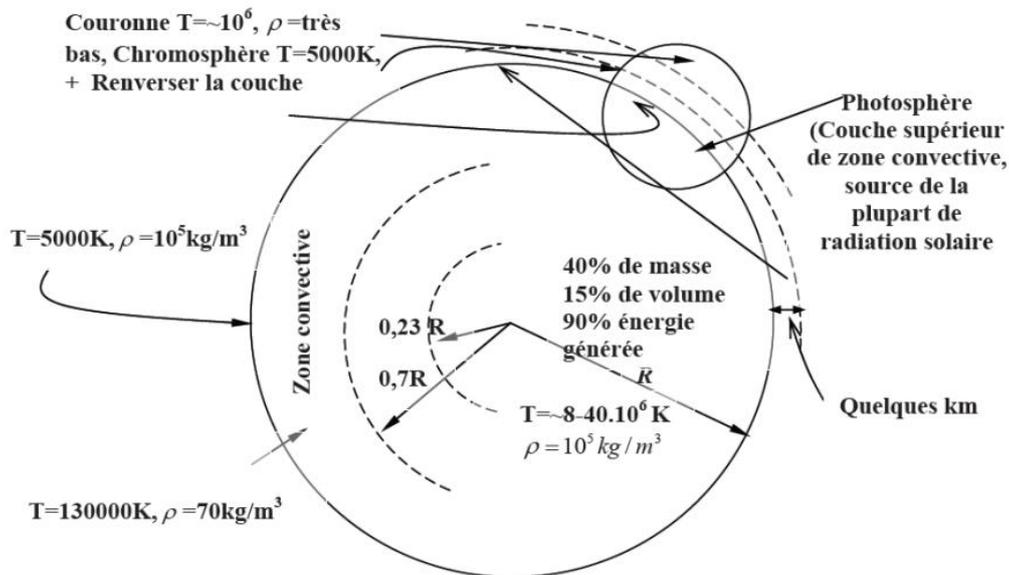
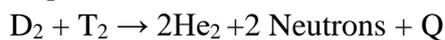


Figure I- 1: Vue en coupe partielle du Soleil [2]

I.3.1.2- Origine de l'énergie solaire :

Le soleil tire son énergie des réactions thermonucléaires se produisant en permanence dans son noyau, dont la température atteint 15 millions de degrés. Compte tenu des températures et des pressions énormes qui y règnent, toute la matière se trouve à l'état gazeux ou sous forme de plasma. La couche externe du soleil, la photosphère, celle qui est visible de la terre, a une température considérablement plus faible qui décroît vers l'extérieur, jusqu'à environ 5800°K. Les réactions thermonucléaires qui se produisent dans le noyau du soleil transforment chaque seconde, 564 millions de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium selon l'équation suivante :



Avec :

D_2 : Deutérium, isotope de H2

T_2 : Tritérium, isotope de H2

Q : Chaleur dégagée par la réaction thermonucléaire

I.3.1.3- Caractéristiques du Soleil :

Les principales caractéristiques du soleil sont regroupées dans le tableau I.1 : [3]

Caractéristique	Valeur
Masse	$1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre	$1.392 \cdot 10^6 \text{ km}$
Masse volumique moyenne	1410 kg/m^3
Surface	$6,09 \cdot 10^{12} \text{ km}^2$
Volume	$1,41 \cdot 10^{18} \text{ km}^3$
Puissance rayonnée	$3.83 \cdot 10^{20} \text{ MW}$

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Gravité à la surface		273,95 m.s ⁻¹
Température	Au centre	15,1 MK
	A la surface	5770 K

Tableau I- 1: Caractéristiques principales du soleil.

I.3.2- Aspects géométriques :

Nous allons nous intéresser aux aspects géométriques du rayonnement solaire intercepté par la terre dans le but ultérieur de calculer le flux reçu par un plan incliné placé à la surface de la terre et orienté dans une direction fixée .la connaissance de ce flux est la base du dimensionnement de tout système solaire. [4]

I.3.2.1- Mouvements de la terre :

La trajectoire de la terre autour du soleil est une ellipse dont le soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé l'écliptique.

L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance terre soleil ne varie que de ($\pm 1.7\%$) par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106 Km. [4]

La terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'équateur.

L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *déclinaison* et qui vaut $23^{\circ}27'$. Les mouvements de la terre autour de son axe et autour du soleil sont schématisés sur la figure I.2.

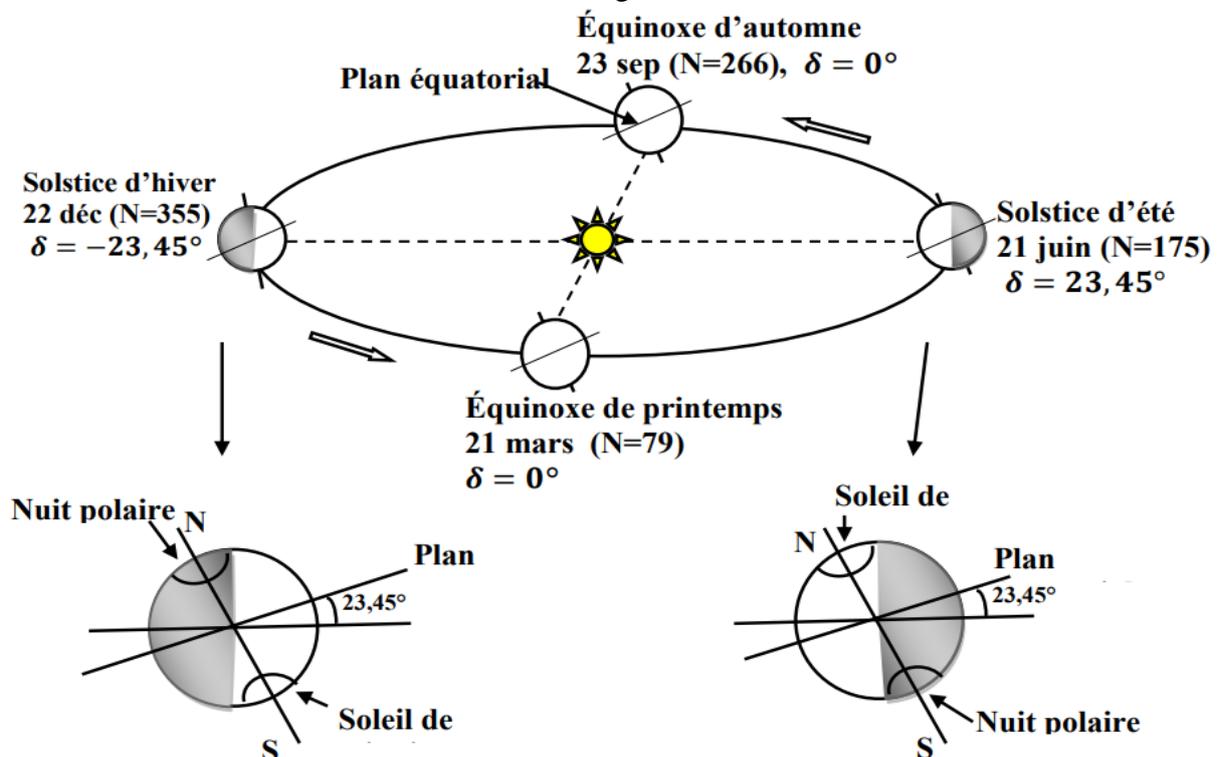


Figure I- 2:Schématisation du mouvement de la terre autour du soleil [4]

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

I.3.2.2- Mouvement apparent du soleil :

Pour étudier le mouvement du soleil nous examinerons le mouvement apparent du soleil pour un observateur sur terre. Le mouvement apparent du soleil observé d'un point quelconque de l'équateur est représenté sur la figure I.3. Aux équinoxes, le soleil se lève à l'est, passe à la verticale à midi (heure solaire) et se couche à l'ouest. Entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil passe au nord de la verticale et pendant la deuxième moitié de l'année il passe au sud de la verticale. [5]

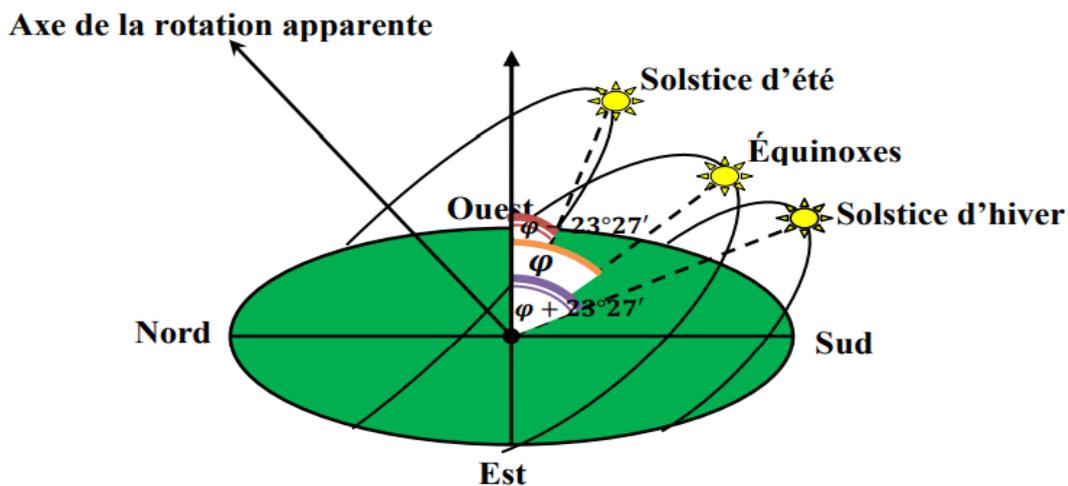


Figure I- 3: Mouvement apparent du Soleil en un point de l'équateur

En un point de latitude φ au Nord de l'équateur est représenté sur la Figure I.3. On notera qu'aux équinoxes, le soleil décrit un arc de cercle de 180° dans la voûte céleste à raison de 15° par heure, ce qui donne des journées de 12 heures. Au midi solaire, l'angle que fait la direction du soleil avec l'axe vertical est égal à latitude du lieu φ

Entre le 23 septembre et le 21 mars, ou plus particulièrement au solstice d'hiver, le 21 décembre, le soleil décrit dans la voûte céleste un arc de cercle inférieur à 180° . L'intersection du plan de rotation apparent du soleil avec le plan horizontal de l'observateur est une ligne

Parallèle à la direction Est-Ouest mais se trouvant vers le sud. Le soleil décrivant toujours un arc de 15° par heure. Au solstice d'été et plus généralement entre le 21 mars et le 23 septembre, le soleil décrit un arc de cercle supérieur à 180° . L'angle que fait la direction du soleil avec le vertical du lieu est appelé « Distance Zénithale (ou angle zénithal) » noté θ_z . Elle varie quotidiennement et annuellement entre

$$\varphi - 23^\circ 27' \leq \theta_z \leq \varphi + 23^\circ 27'$$

- Aux équinoxes (EA et EP) $\rightarrow \theta_z = \varphi$, Les journées ont une durée de 12h.
- Au solstice hiver (SH) $\rightarrow \theta_z = \varphi + 23^\circ 27'$, Les journées ont une durée inférieure à 12h.
- Au solstice été (SE) $\rightarrow \theta_z = \varphi - 23^\circ 27'$, Les journées ont une durée supérieure à 12h.
- En un point de l'équateur ($\varphi = 0$) $\rightarrow -23^\circ 27' \leq \theta_z \leq +23^\circ 27'$, La durée des jours est de 12h = constante

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

En un point de l'attitude, le mouvement du soleil sera identique si on inverse les positions du sud et du nord.

I.3.2.3- Les coordonnées géographiques

Les coordonnées géométriques utilisées afin de déterminer la localisation d'un point sur la surface terrestre sont :

I.3.2.3.1- La latitude φ :

C'est l'angle que fait le plan de l'équateur avec la direction reliant le centre de la terre au point considéré. Donne la localisation d'un point par rapport à l'équateur, elle varie de 0° à l'équateur à 90° N (ou S) aux pôles. Elle représente la distance angulaire du site S par rapport au plan de l'équateur. φ varie de -90° à $+90^\circ$ tel que :

- ❖ $\varphi > 0$ vers le nord.
- ❖ $\varphi < 0$ vers le sud.

I.3.2.3.2- La longitude λ :

Une des coordonnées terrestres d'un point de notre planète. C'est l'angle que fait le méridien local passant par le point considéré avec le méridien d'origine passant par la ville de Greenwich. λ varie de -180° à $+180^\circ$ tel que :

- ❖ $\lambda > 0$ à l'est du méridien du Greenwich.
- ❖ $\lambda < 0$ à l'ouest du méridien du Greenwich.

I.3.2.3.3- L'inclinaison du plan β :

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

$\beta = 0$: pour un plan horizontal tourne vers le haut.

$\beta = 90^\circ$: pour un plan vertical

$\beta = 180^\circ$: pour un plan horizontal tourne vers le bas

I.3.2.3.4- L'angle d'incidence θ :

C'est l'angle formé par la direction des rayons solaire avec la normale du récepteur.

I.3.3- Paramètres astronomiques :

I.3.3.1- Coordonnées horizontales :

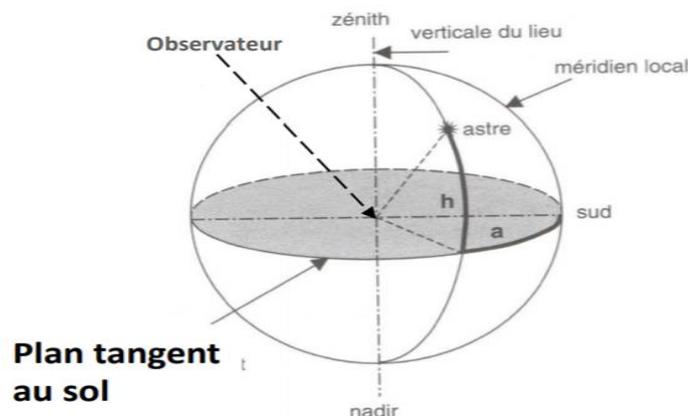


Figure I- 4: Coordonnées horizontales

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

I.3.3.1.1- Azimut a :

Angle entre le méridien local et le plan vertical passant par le Soleil. [6]

$$\cos a = \frac{\sinh \sin \varphi - \sin \delta}{\cosh \cos \varphi} \quad (\text{I. 1})$$

I.3.3.1.2- Hauteur h :

Angle compté dans le plan vertical passant par l'astre, à partir du plan horizontal, positif vers le haut, de -90° pour le Nadir à $+90^\circ$ pour le zénith. La hauteur du soleil varie à chaque instant de la journée et de l'année selon la relation suivant [7]

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (\text{I. 2})$$

Ces deux coordonnées sont simples mais extrêmement variables avec une périodicité d'environ 24h.

I.3.3.2- Coordonnées équatoriales :

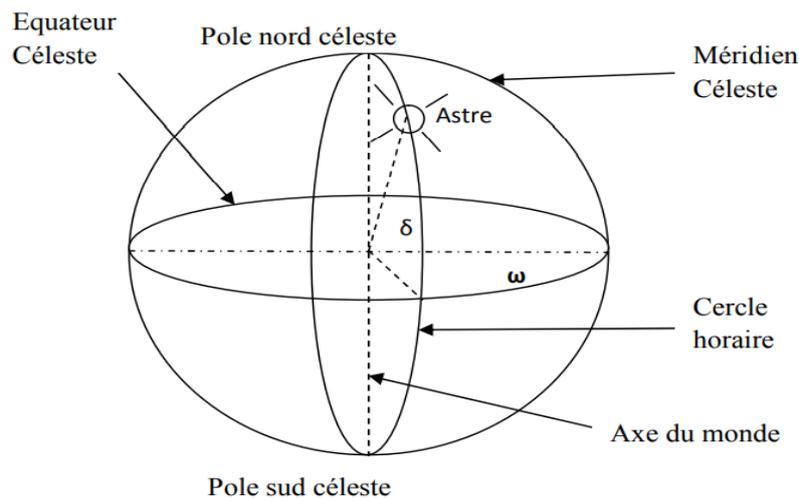


Figure I- 5: Coordonnées équatoriales. [8]

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles (δ , ω).

I.3.3.2.1- Déclinaison δ :

Angle que fait le plan de l'équateur terrestre avec la direction Terre-Soleil. L'angle de déclinaison δ varie entre $:23,45^\circ < \delta < -23,45^\circ$ [9]. Elle est calculée par une équation simple approximative [10] :

$$\delta = 23.45 \sin \left[\frac{360}{365} (284 + j) \right] \quad (\text{I. 3})$$

J : Numéro du jour annuelle

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

I.3.3.2- Angle horaire (ω) :

Angle que fait le plan contenant le cercle horaire du Soleil (astre) avec le plan contenant le méridien céleste. ω Dépend du lieu d'observation contrairement à l'angle de déclinaison δ . On peut à partir des lois régissant les mouvements apparents du soleil par rapport à un observateur terrestre, calculer les coordonnées du soleil en tout point de la terre et à tout instant, l'angle horaire est donné par la formule suivante [11]:

$$\omega = 15^\circ (T_{sv} - 12) \quad (\text{I.4})$$

La valeur de l'angle horaire est nulle à midi solaire, négative le matin, positive en après-midi et augmente de 15° par heure.

T_{sv} : Le temps Solaire Vrai en 1 point du globe est donné par :

$$T_{sv} = T_L + E_t + 4(L_{ref} - L_{lieu}) + D \quad (\text{I.5})$$

Avec :

T_L : Temps légal

D : Décalage horaire (en Algérie) $DD = +1$ toute l'année,

L_{ref} : Longitude du méridien de référence (Greenwich pour l'Algérie),

L_{lieu} : Longitude du lieu comptée positivement à l'ouest et négativement l'est,

E_t : Equation du temps.

I.3.3.3- Notions de l'heure et du temps :

I.3.3.3.1- La durée du jour :

Le jour est le temps qui sépare le lever et le coucher du soleil. Deux instants particuliers de la journée qui donne une hauteur h du soleil nul sont appelés : le lever et le coucher du soleil. [12]

$$Dj = \left(\frac{2}{15}\right) \text{acos}(-\tan\phi \tan\delta) \quad (\text{I.6})$$

I.3.3.3.2- Relation entre le temps légal et le temps solaire :

Les relations se rapportant au mouvement du soleil utilisent le temps solaire qui diffère du temps légal T_L (l'heure sur les montres), la différence entre T_L et l'heure civil du fuseau horaire dans lequel il se trouve [13], est donnée par :

$$\begin{aligned} C &= T_L - T_{CF} \\ T_{CF} &= T_U \end{aligned} \quad (\text{I.7})$$

T_{CF} : Temps civil du fuseau horaire.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

T_U : Temps universel augmenté de la valeur du décalage horaire la variation de la vitesse de la terre sur sa trajectoire autour du soleil introduit un terme correctif appelé Equation du Temps.

I.3.3.3- L'équation du temps :

C'est l'écart entre le temps solaire moyen T_{SM} et le temps solaire vrai T_{SV} selon le jour de l'année considéré [6].

$$E_t = T_{SV} - T_{SM} \quad (I.7)$$

La figure I.6 montre la variation de E_T durant l'année donnée par la formule suivante [10] :

E_t : Equation du temps donné par :

$$E_t = 9,87 \sin 2B_1 - 7,53 \cos B_1 - 1,5 \sin B_1 \quad (I.8)$$

Ou en plus précis :

$$E_t = 229,2 (0,000075 + 0,001868 \cos B - 0,032077 \sin B - 0,014615 \cos 2B - 0,04089 \sin 2B) \quad (I.9)$$

Avec : $B = \frac{360(J-81)}{364}$ et $B_1 = \frac{360(J-1)}{365}$

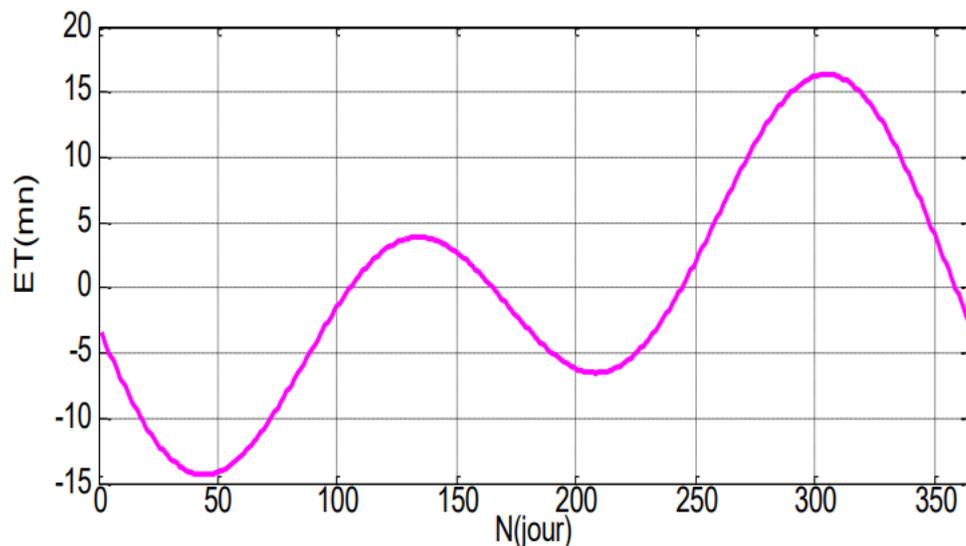


Figure I- 6: Variations annuelles de l'équation du temps

I.3.4- Le diagramme solaire :

Pour évaluer les paramètres solaires rapidement et sans calculs fastidieux, on utilise des diagrammes ou des abaques qui fournissent des valeurs approchées.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Le diagramme circulaire ou solaire est le plus utilisé, représente l'azimut α par des rayons issus de centre de diagramme et la hauteur h par des cercles concentriques.

Le diagramme solaire est très utilisé pour l'évaluation des effets de masque. [14]

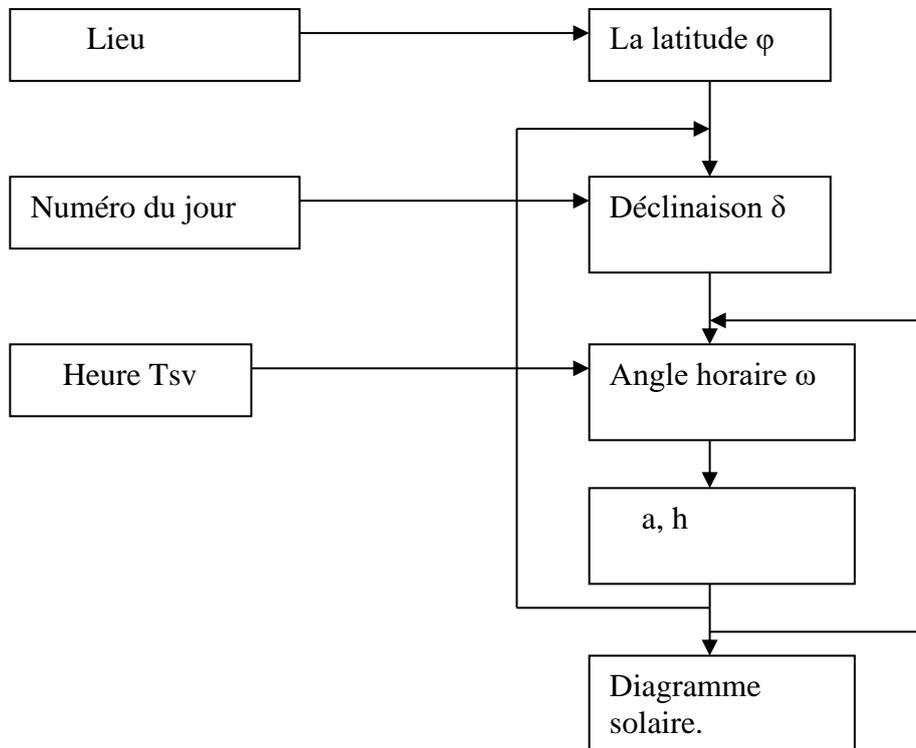
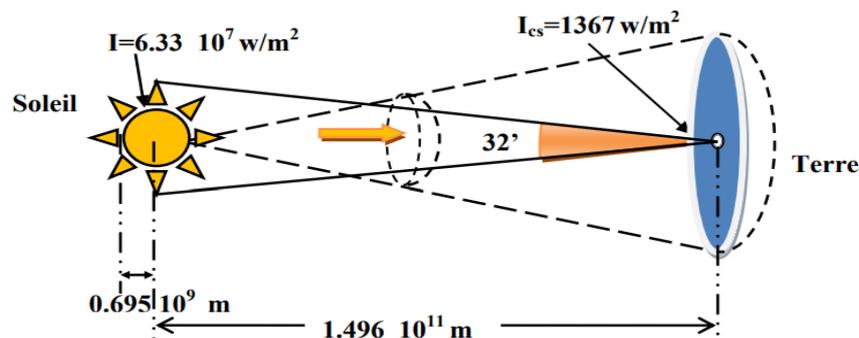


Tableau I- 2: Organigramme permettant de construire le diagramme solaire pour une latitude donnée.

I.3.5- Aspects énergétiques :

I.3.5.1- La constante solaire :

La constante solaire (I_{cs}) est la densité de flux solaire sur une surface exposée perpendiculairement au rayonnement solaire mesurée à une distance Terre-Soleil moyenne de $149,5 \cdot 10^6$ km. Mesurée à la distance moyenne, la constante solaire adoptée par le Centre International de Radiomètre (WRC) dépendant de l'ONM est de 1367 W/m^2 [4] avec une incertitude de 1% (Beckman, Iqbal).



Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Figure I- 7: La divergence de l'énergie du soleil vers la terre

I.3.5.2- Rayonnement solaire à la limite de l'atmosphère :

La variation de la distance Terre – Soleil durant l'année entraîne une variation de l'éclairement solaire, reçu hors atmosphère, de l'ordre de $\mp 3\%$. L'équation suivante permet de corriger les écarts induits par cette variation saisonnière [10]:

$$I_0 = I_{CS} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360}{365} J \right) \quad (\text{I. 10})$$

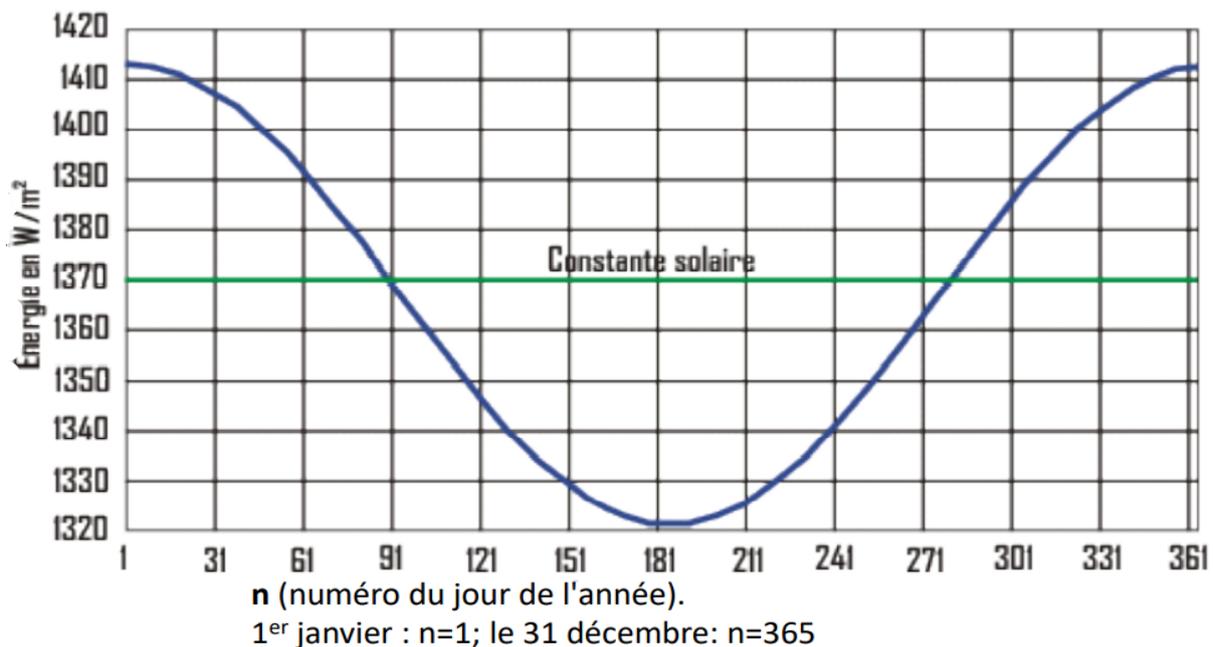


Figure I- 8: variation annuelle de l'éclairement globale

I.3.5.3- Influence de l'atmosphère sur le rayonnement solaire :

I.3.5.3.1- Structure de l'atmosphère :

Pour caractériser la composition de l'atmosphère trois régions sont ainsi définies : l'homosphère (qui comprend la troposphère, la stratosphère et la mésosphère) dans laquelle la composition de l'air est uniforme et invariable en première approximation, l'hétérosphère dans laquelle la composition de l'air a une variation verticale et la photosphère formée exclusivement de protons et d'électrons libres, seule l'homosphère intervient dans les phénomènes de propagation du rayonnement solaire car elle contient les principaux éléments qui modifient la composition spectrales de la lumière, à savoir, l'air sec, la quasi-totalité de l'eau atmosphérique et les aérosols.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Ce découpage en trois groupes n'est pas hasardeux, les radiations solaires pénétrants dans l'atmosphère sont affectées par chacun de ces groupes, en outre la composition en eau et en aérosols varie fortement en fonction du temps et du lieu tandis que la présence des constituants de l'air sec est moins aléatoire. À ces trois ensembles on ajoute un quatrième, défini par la couverture nuageuse composée principalement d'eau sous divers états, les nuages modifient le rayonnement solaire de façon notable et particulière.

Pour donner un exemple global de la composition de l'atmosphère on retient le tableau déterminé en 1976 aux Etats-Unis par le US Standard Atmosphere, il détaille les quantités d'éléments présents dans l'atmosphère en distinguant les constituants permanents de ceux dont la composition varie largement, remarquant que l'azote et l'oxygène et l'argon représentent 99.9% des gaz permanents. Le gaz carbonique est classé parmi les gaz permanents alors que sa composition varie selon les activités naturelles et industrielles

Composition de l'atmosphère			
Constituants permanents		Constituants variables	
Constituants	%volume	Constituants	%volume
Azote (N ₂)	78,084	Vapeur d'eau (H ₂ O)	0-0,04
Oxygène (O ₂)	20,948	Ozone (O ₃)	0-12. 10 ⁻⁴
Argon (Ar)	0,934	Dioxyde de soufre (SO ₂)	0,001.10 ⁻⁴
Dioxyde de carbone (CO ₂)	0,033	Dioxyde d'azote (NO ₂)	0,001.10 ⁻⁴
Néon (Ne)	18,18.10 ⁻⁴	Ammoniac (NH ₃)	0,004.10 ⁻⁴
Hélium (He)	5,24.10 ⁻⁴	Monoxyde d'azote (NO)	0,0005.10 ⁻⁴
Krypton (Kr)	1,14.10 ⁻⁴	Sulfate d'hydrogène (H ₂ S)	0,00005.10 ⁻⁴
Xénon (Xe)	0,089.10 ⁻⁴	Vapeur d'acide nitrique (HNO ₃)	Traces
Hydrogène (H ₂)	0,5 .10 ⁻⁴	Chlorofluorocarbones	Traces
Méthane (CH ₄)	1,5 .10 ⁻⁴		
Protoxyde d'azote (N ₂ O)	0,27.10 ⁻⁴		
Monoxyde de carbone (CO)	0,19.10 ⁻⁴		
Concentrations près de la surface, données d'après U.S Standard Atmosphere, 1976			

Tableau I- 3: Composition de l'atmosphère près de la surface.

I.3.5.3.2- Masse d'air :

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit des modifications spectrales et directionnelles. Les phénomènes d'absorption et de diffusion sont générés par les particules atmosphériques si bien que la lumière connaît une redistribution spatiale donnant lieu à une source de lumière secondaire provenant de l'hémisphère céleste au-dessus de l'horizon. Plus grande est la longueur du parcours de la lumière solaire dans l'atmosphère terrestre, plus grande est l'atténuation de celle-ci avant d'atteindre un éventuel capteur.

Pour tenir comptes du trajet parcouru par les photons, on utilise la notion de masse d'air. Celle-ci est égale au rapport, noté, de la distance parcourue dans l'atmosphère par un rayon en provenance du soleil à l'épaisseur verticale de l'atmosphère mesurée au niveau de la mer.

La masse d'air traversées et définie par [15] :

$$m = \frac{1}{\sin h} \quad (\text{I. 11})$$

h : La hauteur angulaire du soleil.

I.3.5.3.3- Trouble atmosphérique :

Dans la méthode de Linke, on introduit le facteur de trouble total T_L , défini comme le nombre atmosphérique pures et sèches (sans aérosol, ni vapeur d'eau, ni nuage) c'est-à-dire la manifestation uniquement l'absorption et la diffusion les constituants de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , gaz rares, ...)

Le facteur de trouble Linke T_L permet une évaluation de l'extinction atmosphérique par les gaz et l'aérosol selon la formule suivante [16] :

$$T_L = 2,4 + 14,6\beta + 0,4(1 + 2\beta) \ln \rho_V \quad (\text{I. 12})$$

Où est le coefficient de trouble atmosphérique qui prend les valeurs de :

β : 0,02 pour un lieu en montagne.

β : 0,05 pour un lieu rural.

β : 0,10 pour un lieu urbain.

β : 0,20 pour un lieu industriel (atmosphère polluée).

La pression atmosphérique en fonction de l'altitude du point local [15] :

$$\rho_V = 1013 \left[1 - \frac{2,26 \times Z}{10^{-5}} \right]^{5,264} \quad (\text{I. 13})$$

I.3.5.3.4- Atténuation du rayonnement solaire par l'atmosphère :

L'énergie solaire est atténuée par différents composants atmosphériques comme les molécules d'air, les aérosols, les gaz, les gouttelettes d'eau nuageuses ou les cristaux de glace en suspension dans l'atmosphère.

Les molécules d'air diffusent le rayonnement (diffusion de Rayleigh), et absorbent une partie de ce rayonnement, alors que les particules d'aérosols diffusent principalement le rayonnement solaire à travers l'atmosphère.

Les propriétés de diffusion et d'absorption dépendent des compositions chimiques de l'atmosphère, des propriétés physiques des particules solides en suspension dans l'atmosphère et de la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. La vapeur d'eau, l'ozone, le

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

dioxyde de carbone et l'oxygène sont les importants gaz absorbants du rayonnement solaire. L'absorption de l'ozone se produit dans les domaines du visible et de l'ultraviolet du spectre solaire, alors que la grande partie de la bande d'absorption de la vapeur d'eau et du dioxyde de carbone se produit dans les domaines spectraux du proche infrarouge et rouge. Par ailleurs, l'oxygène se caractérise par de petites bandes d'absorption dans le spectre visible.

On retrouve l'influence de ces composants atmosphériques sur la distribution spectrale du rayonnement solaire direct et diffus, comme on peut le constater sur la figure suivante :

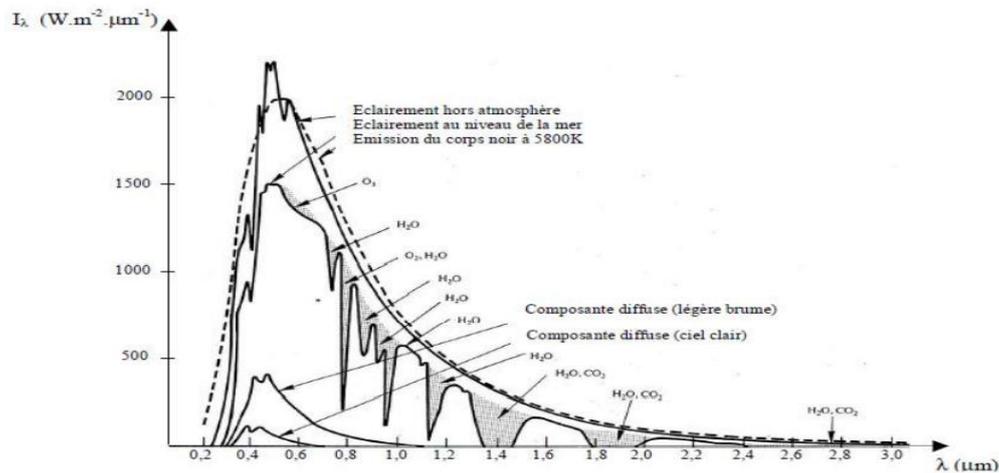


Figure I- 9: Spectre du rayonnement solaire [17]

I.3.5.4- Rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'énergie solaire représentée par la constante solaire moyenne à l'entrée de l'atmosphère ($I_{cs} \approx 1367 \text{ W/m}^2$) subit une altération à sa traversée de l'atmosphère, seulement une partie de cette énergie arrive au sol sous différentes formes. Ainsi, on définit :

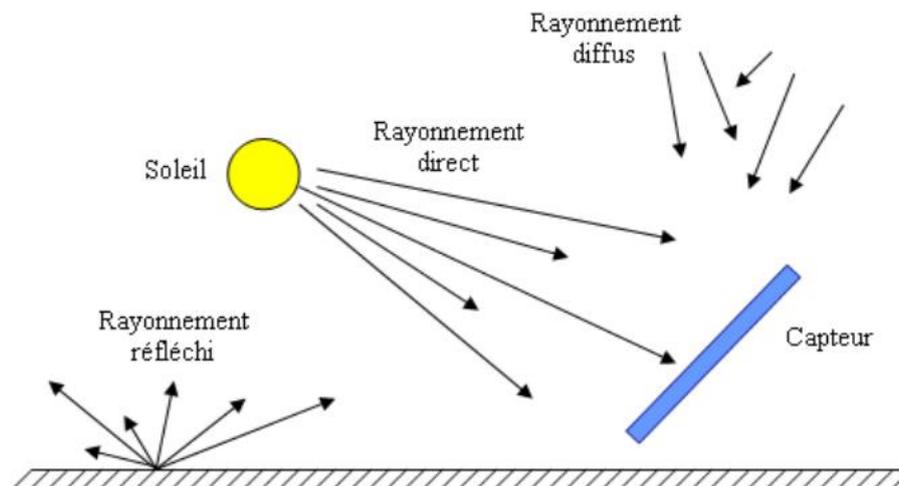


Figure I- 10: Les trois composantes du rayonnement incident sur le capteur [18]

I.3.5.4.1- Rayonnement direct $I_{b\beta}$:

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Le rayonnement solaire direct se définit comme étant le rayonnement provenant du seul disque solaire. Il est donc nul lorsque le soleil est occulté par les nuages [6]. Il est calculé à partir de la relation :

$$I_{b\beta} = I_{bn} \times \cos \theta \quad (\text{I. 14})$$

I_{bn} : L'intensité du rayonnement solaire direct reçu par une surface réceptrice normale aux rayons du soleil.

Avec :

$$I_{bn} = \frac{I_{bh}}{\sin h}$$

Donc :

$$I_{b\beta} = I_{bh} \times \frac{\cos \theta}{\sin h} = I_{bh} \times R_b \quad (\text{I. 15})$$

I.3.5.4.2- Rayonnement diffus $I_{d\beta}$:

Dans sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire est diffusé par les molécules de l'air et les particules en suspension. Il n'est pas donc nul que la nuit [5]. Le rayonnement solaire diffus reçu par une surface quelconque est donné par la relation :

$$I_{d\beta} = I_{dh} \times \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{I. 16})$$

I_{dh} : la composante diffuse du rayonnement solaire d'une surface horizontale.

$\frac{1 + \cos \beta}{2}$: Le facteur de forme entre le plan et le ciel.

I.3.5.4.3- Rayonnement réfléchi $I_{r\beta}$:

Le rayonnement solaire réfléchi par le sol environnant est calculé à partir de l'expression suivante :

$$I_{r\beta} = \rho \times I_{gh} \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{I. 17})$$

I_{gh} : le rayonnement solaire globale reçu par une surface horizontale.

ρ : coefficient de réflexion du sol ou albédo qui varie selon la nature du sol, et dont la valeur moyenne est estimée à : $\rho = 0,25$

$\frac{1 - \cos \beta}{2}$: facteur de forme entre le plan et le sol.

I.3.5.4.4- Rayonnement globale I_{β} :

C'est la somme des trois types de rayonnements direct, diffus et réfléchi. L'éclairement énergétique solaire reçu par une surface horizontale à partir d'un angle solide de $2\pi \text{sr}$.

$$I_{\beta} = I_{bh} \times R_b + I_{dh} \times \frac{1 + \cos \beta}{2} + \rho \times I_{gh} \times \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{I. 18})$$

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Les composantes diffuse I_{dh} et globale I_{gh} sont estimées dans le modèle de Capderou avec une bonne approximation à partir des relations :

$$\begin{aligned}I_{dh} &= 125(\sin h)^{0.4} \\ I_{gh} &= 1080(\sin h)^{1.22}\end{aligned}$$

La composante direct I_{bh} est déduite par la différence entre la composante global et la composante diffuse :

$$I_{bh} = I_{gh} - I_{dh}$$

I.3.5.5- Instrument de mesure de rayonnement :

Les premières mesures solarimétriques ont été entreprises par POUILLET en 1837, entre 1893 et 1939 des progrès considérables sont dus aux travaux de K. ANGSTROM et d'ABBOT

- **Radiomètre :**

Appareil destiné à la mesure du rayonnement, le radiomètre de Crookes est un appareil permettant de mettre en évidence l'énergie transportée par les radiations, il est constitué d'une ampoule de verre contenant de l'air à faible pression et un petit moulin à quatre pales ayant chacune une face noire et une face blanche. Voir fig (I.13)

- **Le pyranomètre :**

Instrument destiné pour mesurer le rayonnement global I_{β} parvenant sur une surface plane à partir d'un angle solide 2π stéradians.

Si cet appareil est muni d'un pare-soleil il peut mesurer le rayonnement diffus $I_{d\beta}$

Voir Figure I.12 l'un des appareils les plus répandus dans le monde est le pyranomètre KIPP.

- **Le pyréliomètre :**

Appareil mesurant le rayonnement solaire direct $I_{b\beta}$, il est orientable de façon à ce que sa surface réceptrice soit normale aux rayons solaires Fig. (I.14)

Il se présente sous trois types selon sa constitution :

- Le pyréliomètre à disque d'argent d'Abbott.
- Le pyréliomètre à circulation d'eau d'Abbott.
- Le pyréliomètre d'angström (1893).

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires



*Figure I- 11: héliographe d'après
Campb II. Stock [19]*



Figure I- 12: Pyranomètre [19]



Figure I- 13: Radiomètre [19]



Figure I- 14: Pyrhéliomètre [19]

I.3.5.6-Captation Du Rayonnement Solaire :

Pour exploiter ou stocker l'énergie solaire il faut la convertir en une autre forme d'énergie, pour cela on utilise les capteurs solaires. Selon la conversion d'énergie on distingue deux catégories de capteurs solaires :

- Capteurs solaires photovoltaïques.
- Capteurs solaires thermiques.

Dans notre travail on s'intéressera uniquement au capteur solaire thermique.

I.4-Description de l'installation solaire :

I.4.1.-Capteurs solaires thermiques :

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Ce sont des capteurs qui transforment l'énergie solaire en énergie thermique, utilisés pour le chauffage des locaux, la production d'eau chaude sanitaire à basse température, on distingue deux catégories de capteurs solaires thermiques :

- Capteurs à circulation de fluide.
- Capteurs à air.

I.4.1.1-Capteurs à circulation de liquide :

Le capteur plan vitré :

Le capteur plan solaire le plus couramment utilisé comprend un coffre isolant, à l'intérieur duquel est disposé un verre transparent, une feuille métallique noire appelé absorbeur, constitué de tuyaux dans lesquels circule le fluide caloporteur, en contact avec cette surface absorbante est intégré un isolant aussi bien à l'arrière que sur les côtés pour, afin de réduire les déperditions thermiques. L'ensemble est monté dans un boîtier en aluminium. La plupart des capteurs plans vitrés permettent des gains de température allant jusqu'à 70°C par rapport à la température ambiante et sont de ce fait parfaitement adaptés à la production d'eau chaude sanitaire [20].



Figure I- 15: Le capteur plan vitré

- **Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré :**

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

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide, il faut donc minimiser les pertes avec l'environnement proche. [21]

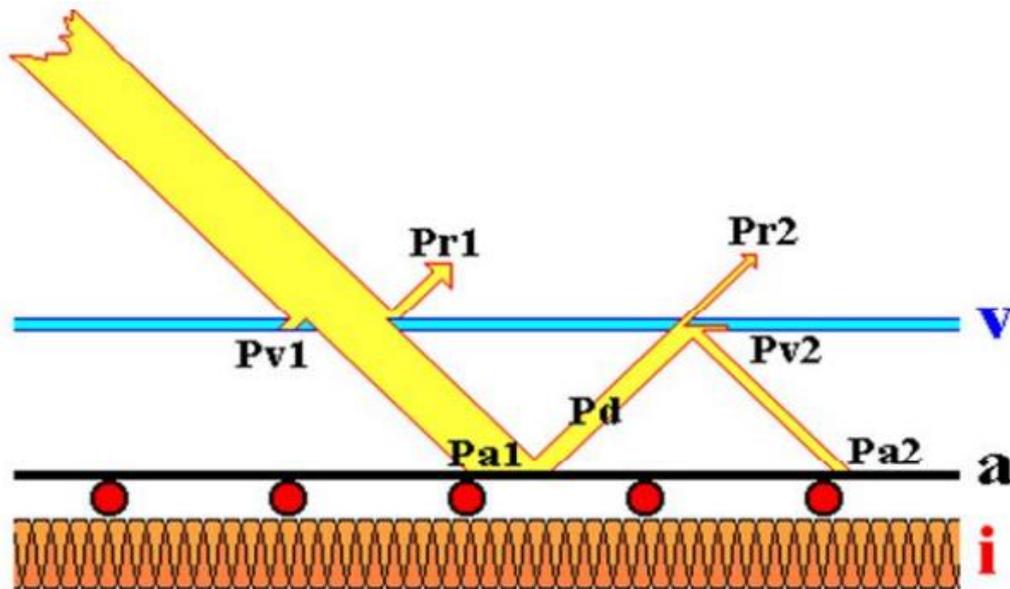


Figure I- 16: Principe de fonctionnement d'un capteur plan vitré

Le capteur plan sans vitrage :

Sans vitrage ni isolant, c'est le capteur qui a les plus grosses déperditions thermiques. Il peut cependant être très efficace lorsqu'on souhaite avoir des températures d'eau peu élevées, soit pour « préchauffer » l'eau chaude sanitaire, soit pour le chauffage de l'eau des piscines. Il est en matière plastique « souple » et donc facile à installer. Il est très bon marché.



Figure I- 17: Capteur non vitré

Le capteur sous vide :

Le capteur sous vide est constitué d'une série de tubes de verre sous vide à l'intérieur desquels se trouve un absorbeur avec un circuit hydraulique, qui capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur. Grâce aux propriétés isolantes du vide, les déperditions de chaleur sont faibles. Ainsi, on peut obtenir des gains de température de 100°C et plus. Ce type

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

de capteur est particulièrement bien adapté aux applications nécessitant des hautes températures. [22]



Figure I- 18: Le capteur sous vide

I.4.1.2-Capteurs à air :

Comme leur nom l'indique produisant de l'air chaud, ces capteurs sont indiqués dans certaines installations de ventilation, d'aération douce, de chauffage des locaux et dans le cas du chauffage à air : on peut directement faire passer l'air à réchauffer à travers le capteur. Une application particulière de ces capteurs est le séchage du foin, ils sont légers et n'ont pas de problème de refroidissement ni d'ébullition c'est l'avantage par rapport aux capteurs à liquide.

I.4.1.3- Éléments de construction d'un capteur plan :

Un capteur plan vitré est constitué principalement d'une couverture transparente, d'un absorbeur et d'une isolation thermique :

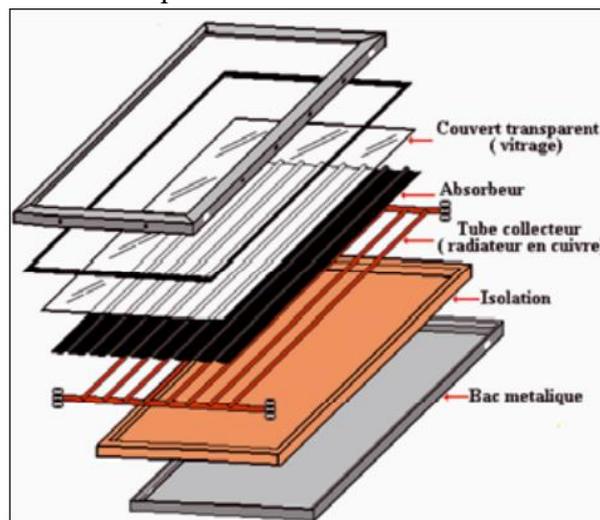


Figure I- 19: Coupe schématique d'un capteur plan vitré [22]

❖ La couverture transparente :

Du fait de sa résistance aux agressions mécaniques (chocs, grêle, neige, ...etc) et aux agressions thermiques (brusque refroidissement, ...etc), le verre sécurisé est spécialement

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

utilisé comme couverture transparente. Afin d'être le plus possiblement transparent et transmettant du rayonnement solaire, il est de préférence que le vitrage soit pauvre en oxyde de fer.

Pour les capteurs intégrés en toiture, des matériaux synthétiques sont parfois utilisés. Ils sont plus légers, moins chers et plus facile à mettre en place, mais leurs durées de vie sont moins que celle du verre ordinaire.

Plus souvent, le vitrage est légèrement structuré, ainsi, il répond à la fraction réfléchie du rayonnement solaire incident, pour diminuer un éventuel éblouissement.

Les principales caractéristiques d'un vitrage sont :

- ✓ Son coefficient de transmission (τ)
- ✓ Son coefficient d'émission (ε)

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

Le tableau récapitule les divers types de verre utilisés :

Verre	Réflexion	Absorption	Transmission
Verre clair	8%	9%	83%
Verre basse teneur en Fe_2O_3	8%	2%	90%

Tableau I- 4 : Caractéristiques optiques de quelques verres.

La particularité d'un bon vitrage est sa faible absorption du rayonnement solaire d'où sa transmission maximale d'énergie vers l'absorbeur. Actuellement le verre le plus souvent adopté pour le capteur plan est le verre prismé. Sa spécificité est sa faible réflexion du rayonnement (1.5%). Il peut transmettre jusqu'à 96% du rayonnement.

❖ L'absorbeur :

Le rôle principal d'un absorbeur est le captage du rayonnement solaire et sa conversion en énergie calorifique. Il est généralement peint en noir pour absorber tous les rayonnements dans le spectre du visible, du l'ultraviolet et une faible quantité dans l'infrarouge.

L'absorbeur est choisi selon les caractéristiques suivantes :

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

Le choix du matériau et le procédé de construction ont une grande influence sur la qualité d'un capteur. Du fait de leurs conductivités élevées, le cuivre, l'acier et l'aluminium sont les matériaux les plus couramment utilisés.

Les caractéristiques de divers matériaux utilisés comme absorbeur sont données au tableau :

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Matière	Conductibilité (w/m °C)	Coefficient de dilatation
Aluminium	230	2,38
Cuivre	380	1,65
Zinc	112	2,9
Acier	52	1,15
Inox	52	1,15
Plastique	0,2-0,4	7-20

Tableau I- 5: Caractéristiques des matériaux utilisés comme absorbeur.

Afin de diminuer les pertes par rayonnement, les absorbeurs sont généralement revêtus d'une couche sélective. Le nickel et le chrome sont les principaux métaux utilisés pour les revêtements sélectifs pour la plupart des capteurs.

Les modes de revêtement les plus souvent utilisés sont donnés dans le tableau suivant :

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

Tableau I- 6: Revêtements des surfaces d'absorbeur.

❖ Le fluide caloporteur :

Pour évacuer la chaleur stockée par la plaque absorbante on utilise généralement comme fluide caloporteur soit de l'air, soit de l'eau.

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

- ✓ Il ne présente pas de problèmes de gel pendant l'hiver ou d'ébullition pendant l'été.
- ✓ L'air sec ne présente pas de problèmes de corrosion.
- ✓ Une fuite d'air est sans conséquence.
- ✓ Il n'est pas nécessaire d'utiliser un échangeur de chaleur dans le cas du chauffage de locaux.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

- ✓ Le système à mettre en place est plus simple et plus fiable.

L'utilisation de l'air par rapport à l'eau entraîne les inconvénients suivants :

- L'air ne peut servir qu'au chauffage de locaux.
- Les conduites doivent avoir une grande section pour laisser passer un débit suffisant.
- Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau.

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

❖ L'isolant :

Un capteur doit être bien isolé thermiquement, et cela avec des matériaux appropriés. Ces derniers doivent avoir une faible conductivité thermique, afin de minimiser les pertes thermiques par conduction à travers les faces du capteur. Généralement, l'épaisseur de l'isolant est de l'ordre de 5 à 10 cm. Les laines minérales, les matières synthétiques (de laine de verre, mousses expansives de polyuréthane ou polystyrène) sont généralement les matières isolantes utilisées. Elles doivent résister aux hautes températures qui peuvent être atteintes à l'intérieur d'un capteur. Pour un choix optimal d'un matériau isolant, les paramètres suivants doivent être considérés :

- ✓ Masse volumique.
- ✓ Température maximale d'utilisation.
- ✓ Résistance aux feux, aux rongeurs et à la putréfaction.
- ✓ Sensibilité à l'humidité.
- ✓ Son coût.

Les propriétés des isolants les plus utilisés sont citées au tableau :

Isolant	Conductivité thermique à 500w/m °C max	Température max
Laine de verre	0,041	150
Laine de roche	0,05	150
Polyuréthane	0,027	110
Polystyrène	0,039	85
Liège expansé	0,042	110

Tableau I- 7: Quelques propriétés des isolants

❖ Le boîtier :

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale du capteur, il est constitué de matériau choisis, tels que les métaux en feuille ou profilé, matériaux en plastique armé et même le contreplaqué ; les métaux les plus utilisés sont l'acier galvanisé ou galvanisé prélaqué et les alliages d'aluminium.

On rencontre deux structures de boîtier :

- **Le boîtier simple :**

Il est constitué d'une seule épaisseur de matériau en forme de bac dans lequel sont montés l'isolation et l'absorbeur.

- **Le boîtier double :**

Possède une structure en caisson qui lui confère une plus grande rigidité et permet une meilleure intégration de l'isolation.

I.4.1.4- Orientation et inclinaison d'un capteur plan :

- **Orientation :**

A cause de répartition intégrale de l'ensoleillement pendant toute la journée, il est nécessaire d'orienter le capteur de telle façon que l'énergie recueillie soit maximale, généralement on oriente les capteurs en plein sud (Pour l'hémisphère nord).

- **L'inclinaison :**

Le problème de l'inclinaison est le plus délicat et nécessite une étude chiffrée, mais nous constatons néanmoins que la position verticale du capteur favorise la période hivernale, alors que la position horizontale conduit à des meilleurs rendements pendant l'été, la solution idéale serait d'incliner différemment les capteurs suivant la période de l'année. Comme les capteurs seront nécessairement fixes on les inclinera sur l'horizontale d'un angle égale à latitude du lieu pour une utilisation annuelle.

I.4.1.5- Raccordement des capteurs :

- **Raccordement des capteurs en série :**

Dans ce type de montage, la sortie du premier capteur est reliée à l'entrée du deuxième capteur dont la sortie est reliée à l'entrée du troisième capteur et ainsi de suite. Plus le parcours du fluide caloporteur est long, plus les températures obtenues à la sortie du dernier capteur sont élevées

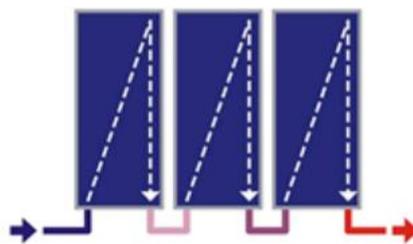


Figure I- 20: Raccordement en série

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

- **Raccordement des capteurs en parallèle :**

Dans ce cas, l'eau arrive à chaque capteur par une conduite de distribution qui parcourt les bords inférieurs, alors que l'eau chaude est prélevée par l'intermédiaire d'une autre conduite placée le long du bord supérieur du capteur. Il est donc important dans ce type de raccordement que le circuit soit bien équilibré de façon à ce que le débit du fluide caloporteur soit distribué également dans les divers capteurs. Voir figure (I.17)

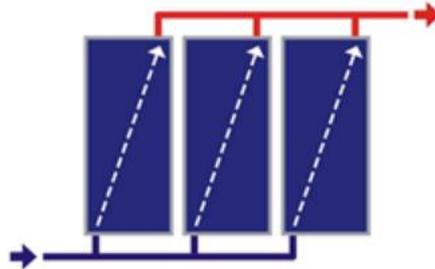


Figure I- 21: Raccordement en parallèle

- **Raccordement mixte :**

Il s'agit d'un montage qui combine le mode série et le mode parallèle. Il en résulte une distribution plus uniforme de l'écoulement et donc des températures. Il existe deux types de raccordement mixte, particulièrement indiqués pour les installations de grande dimension [23].

- Le raccordement série parallèle.
- Le raccordement parallèle série.

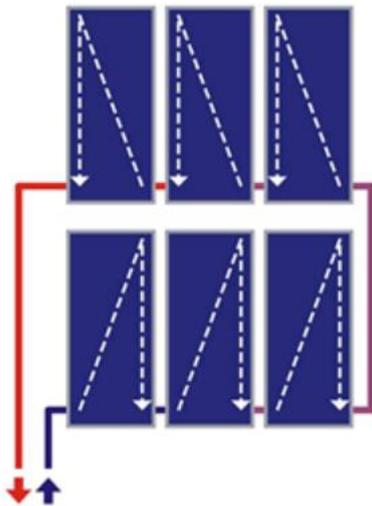


Figure I- 22: Raccordement de 2 rangées de capteurs en série

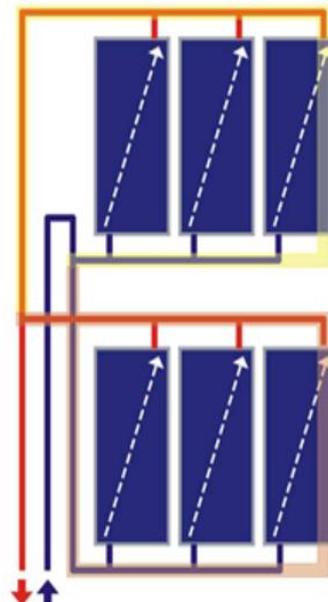


Figure I- 23: Raccordement de 2 rangées de capteurs en parallèles

I.4.1.6- Implantation des capteurs :

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Indépendamment des considérations sur l'orientation du capteur azimut et angle d'inclinaison, les éléments architecturaux et visuels jouent un rôle important dans le positionnement d'un champ de capteurs.

➤ Types d'implantation du capteur solaire :

Quel que soit le type d'implantation, on doit porter une attention particulière aux matériaux utilisés, ainsi qu'à la mise en œuvre. Comme les composants sont exposés aux intempéries pendant une très longue période (20 à 30 ans environ) ils doivent résister :

- À la variation de température dans les limites prévues.
- A la pluie, la grêle et la neige.
- Au rayonnement U.V.
- Aux matières polluantes et corrosives (telles que le sel dans la région côtière).

Dans la pratique on trouve plusieurs types d'implantation.

- ❖ Montage au sol.
- ❖ Montage sur toiture inclinée
 - Posés sur toiture.
 - Intégration à une toiture inclinée.
- ❖ Montage en toiture-terrasse.

I.4.2- La cuve de stockage :

Sauf cas spécifique (surface de capteur inférieure à 20-30m²), les ballons de stockage sont des ballons type « tampon ECS » dépourvus d'échangeurs de chaleur incorporés. En effet, pour des raisons de coût et de performances, des échangeurs à plaques sont préconisés pour transférer l'énergie à l'eau chaude sanitaire.

Pour certaines applications, ou plus spécialement certaines implantations des ballons de stockage avec des températures basses, on utilise des ballons avec échangeur interne pour éviter les risques de gel dans les canalisations et dans l'échangeur à plaques. Dans ce cas, les canalisations d'eau froide et d'eau chaude doivent être isolés efficacement. Une attention particulière est portée à la tenue en température des ballons d'eau chaude sanitaire.

Certains produits sont garantis uniquement si la température de stockage est inférieure ou égale à 60°C. Tenue en température minimale de 80°C est nécessaire pour les ballons de stockage solaire.

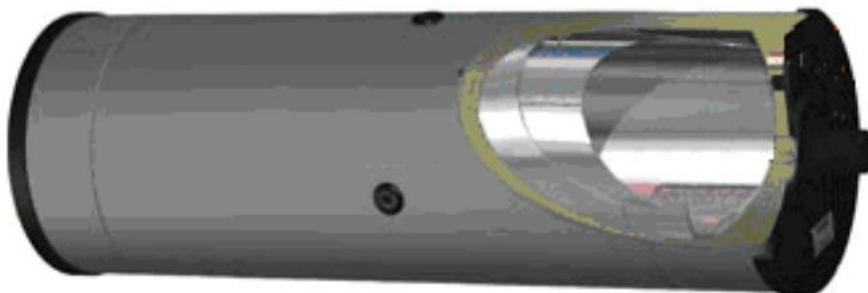


Figure I- 24: Ballon de stockage d'un CES

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

I.4.3- La tuyauterie :

Habituellement, les matériaux utilisés pour les tuyauteries sont des tubes en cuivre ou des tubes en acier simple.

Des systèmes complets comprenant les tuyauteries allées et retour ainsi que le câble pour la sonde de température de capteur et l'isolation. Ce système de la tuyauterie permet un gain de temps à l'installation.

Les tuyauteries du circuit primaire ont intérêt à être isolée de manière à limiter les pertes de chaleur entre les collecteurs et le ballon de stockage.

L'isolation de ces systèmes ne peut en aucun cas être réalisée au moyen d'isolant pour les tuyauteries sanitaires habituelles, car il est indispensable de tenir compte des températures, auxquelles celles-ci seront explorées, l'isolant habituellement utilisé peut résister à une température continue de 150 à 180 °C



Figure I- 25: Conduites de liaison isolées

I.4.4- L'échangeur :

Un échangeur de chaleur est un appareil dans lequel circulent deux fluides séparés par une paroi et qui échangent de la chaleur ; l'un se refroidit pendant que l'autre s'échauffe

Le plus souvent, il est intégré dans la cuve de stockage mais il peut aussi être à l'extérieur

De part sa fonction de transfert thermique, l'échangeur doit offrir une surface de contact le plus grand possible entre fluides, c'est pourquoi la plupart des échangeurs ont l'aspect d'un serpent

Remarque : les échangeurs externes seront des échangeurs à plaques et les échangeurs internes seront du type à serpent. La figure (I. 20) montre les deux types des échangeurs.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires



Échangeur à plaque



Échangeur à serpent

Figure I- 26: Les types d'échangeur à plaque et serpent [24]

I.4.5- L'appoint :

Un chauffe-eau solaire ne peut pas fournir de l'eau chaude en cas de faible ensoleillement, dans ce cas, il faut se servir d'un chauffage d'appoint utilisant une source d'énergie conventionnelle (gaz, fioul, électricité, bois). Cependant :

- Le fonctionnement du chauffage d'appoint ne doit pas réduire le rendement du chauffe-eau solaire et la priorité doit être donnée à l'énergie solaire toujours.
- Le ballon de stockage aura besoin d'une bonne isolation thermique afin de conserver l'énergie solaire au mieux et réduire le recours au chauffage d'appoint.
- Un voyant doit montrer que le chauffe-eau solaire marche correctement. Sinon, l'eau chaude pourrait être fournie exclusivement par l'appoint sans que l'utilisateur se rende compte.

Lorsque on étudie les besoins globaux en énergies et ceux de l'appoint solaire pour un chauffe-eau, la situation paraît favorable, puisque les besoins en eau chaude sont a priori constante tous au long de l'année. [12] la (Figure) illustre un exemple de l'appoint solaire et de l'énergie d'appoint pour une maison de 4 personnes en zone méditerranéenne, avec 4 mètres carré de capteurs, et un ballon de 200 litres, où la consommation d'énergie peut être réduite jusqu'à la moitié pendant les mois les plus défavorable [25]

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

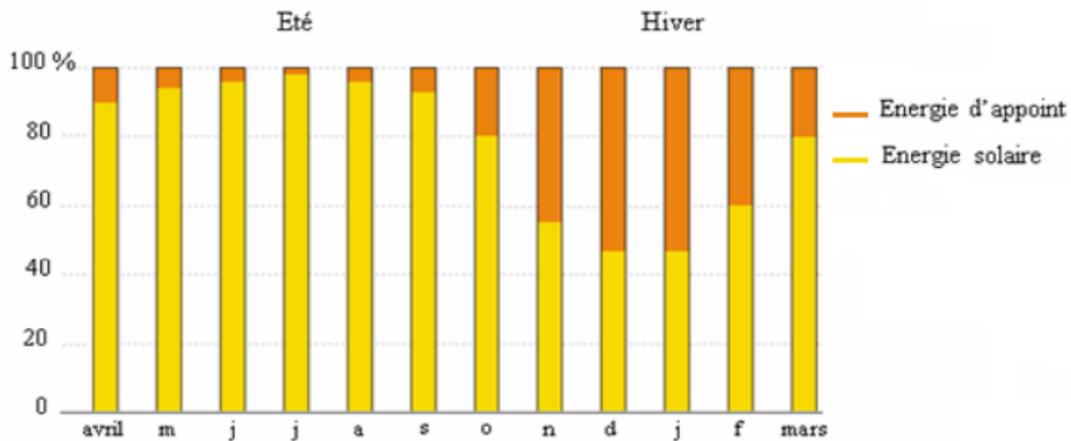


Figure I- 27: La moyenne mensuelle de la production d'un chauffe-eau solaire et de l'appoint.

I.4.6- Le chauffe-eau solaire :

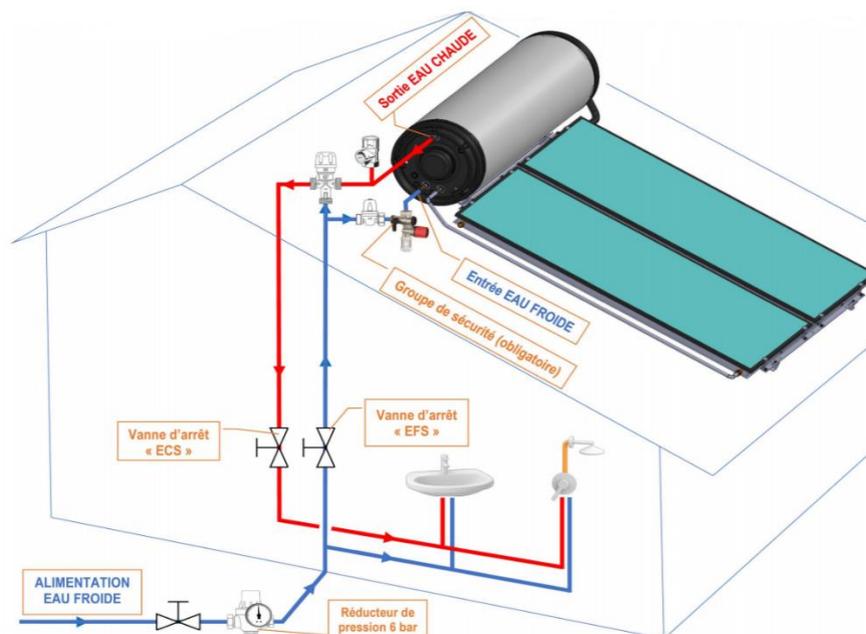


Figure I- 28 : Le Schéma représentative d'une installation Chauffe-eau Solaire. [12]

I.4.6.1- Le Fonctionnement d'un Chauffe-eau Solaire (CES) :

Le chauffe-eau solaire individuel est un équipement robuste et fiable, conçu et fabriqué pour tirer le meilleur parti du moindre rayon de soleil. Un CES permet de couvrir 50 à 70% de la demande annuelle d'eau chaude sanitaire d'une famille (et jusqu'à 99% en période estivale). Il assure un ensemble de fonction :

- Captage de l'énergie solaire et conversion du rayonnement en chaleur par les capteurs solaires thermiques.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

- Transfert de la chaleur des capteurs vers l'eau chaude sanitaire par une boucle fermée à circulation naturelle ou forcée.
- Stockage de l'énergie dans le ballon solaire.
- Distribution de l'eau chaude vers le système d'appoint et les points de puisage.

Le CES doit être préservé des risques de gel et de détérioration par surchauffe, ses différents composants doivent être optimisés pour limiter les pertes d'énergie captée et les consommations d'énergie d'appoint.

I.4.6.2- Les types de chauffe-eau solaire :

I.4.6.2.1- Le Chauffe-eau Solaire à Circulation Naturelle (thermosiphon) :

- **Chauffe-eau solaire à thermosiphon sans échangeur :**

L'eau chauffée dans le capteur est envoyée dans le réservoir de stockage, elle est remplacée dans le capteur par l'eau froide, qui s'échauffe à son tour et ainsi de suite. La circulation de l'eau dans le circuit doit être continue tant qu'il y a du soleil et de l'eau à réchauffer, elle est généralement assez lente. L'eau chaude plus légère que l'eau froide s'accumule dans le haut du réservoir. [26]

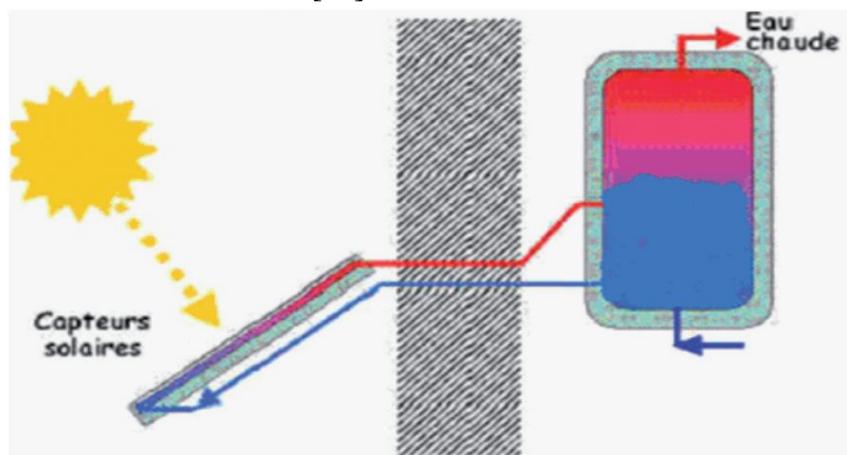


Figure I- 29: Chauffe- eau solaire thermosiphon sans échangeur de chaleur.

- **Chauffe-eau solaire à circulation naturelle avec échangeur :**

L'eau chaude venant du capteur circule à l'intérieur du réservoir dans un échangeur de chaleur : au contact de l'eau froide du réservoir, elle cède ses calories à travers la paroi de l'échangeur et retourne se réchauffer dans le capteur. L'eau chauffée dans le capteur reste ainsi dans un circuit fermé appelé « Circuit primaire ». L'eau chauffée au contact de l'échangeur, monte au haut du réservoir, l'eau froide descend et se fait réchauffer dans le bas du réservoir. Nous verrons à propos du gel et de l'entartrage l'intérêt qu'on peut avoir en utilisant un échangeur. [26]

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

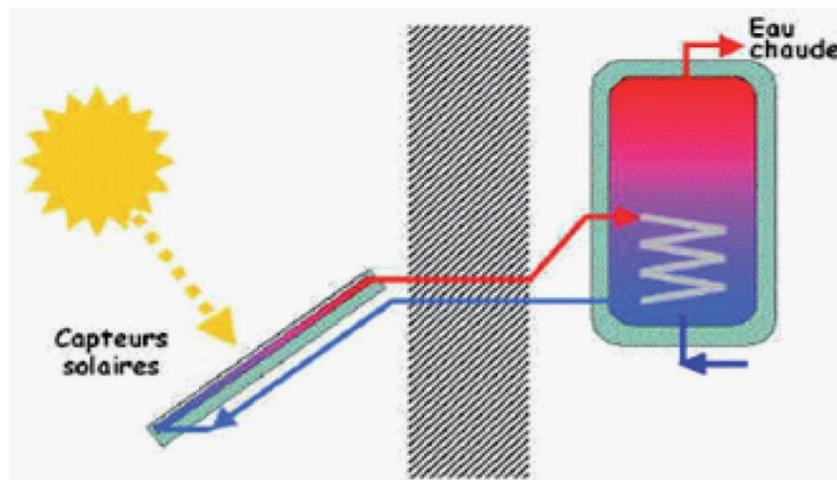


Figure I- 30: Chauffe-eau Solaire en Thermosiphon avec Echangeur

I.4.6.2.2- Le Chauffe-eau Solaire avec Circulateur (circulation forcée) :

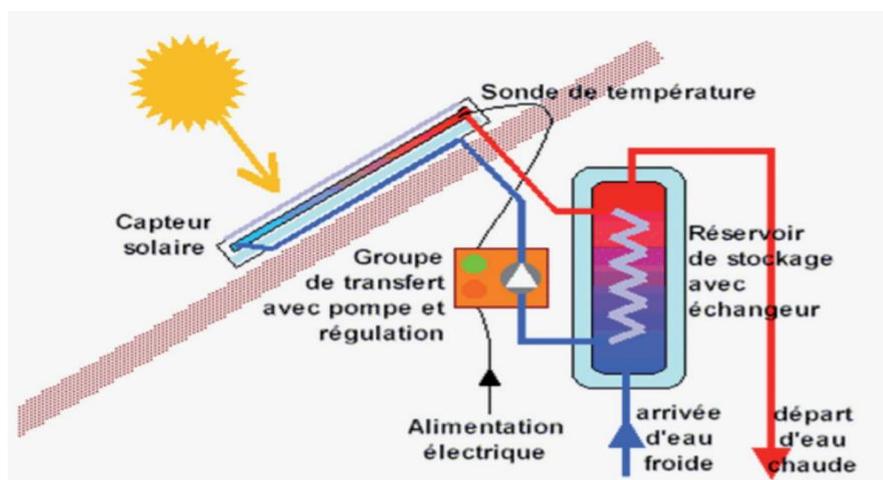
On fait appel à un circulateur électrique (pompe) pour faire circuler l'eau, ce dernier donne une charge plus grande qu'en thermosiphon et la vitesse de l'eau est plus importante, de même, cela nous permet d'utiliser de tuyaux de petit diamètre.

Le débit de l'eau est en fonction de :

- La puissance de circulateur.
- Les pertes de charge du circuit.

- **Le Chauffe-Eau Solaire avec Circulateur et Echangeur à l'Intérieur de la cuve**
:

Le fluide circulant dans le circuit primaire (capteur, échangeur- capteur), est en général différent de l'eau stockée dans la cuve, ainsi un certain fluide caloporteur va circuler dans le circuit primaire en absorbant de l'énergie calorifique à l'intérieur du capteur, en suite il va céder le maximum de cette énergie à travers l'échangeur à l'eau stockée dans la cuve.



Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

Figure I- 31: Chauffe-Eau avec Circulateur et Echangeur à l'Intérieur de réservoir de stockage

L'avantage de ce chauffe-eau est que le capteur n'est pas soumis à la pression du réservoir et l'inconvénient est qu'il y a moins d'énergie calorifique.

- **Chauffe-eau solaire avec circulateur et échangeur à l'extérieur de réservoir de stockage :**

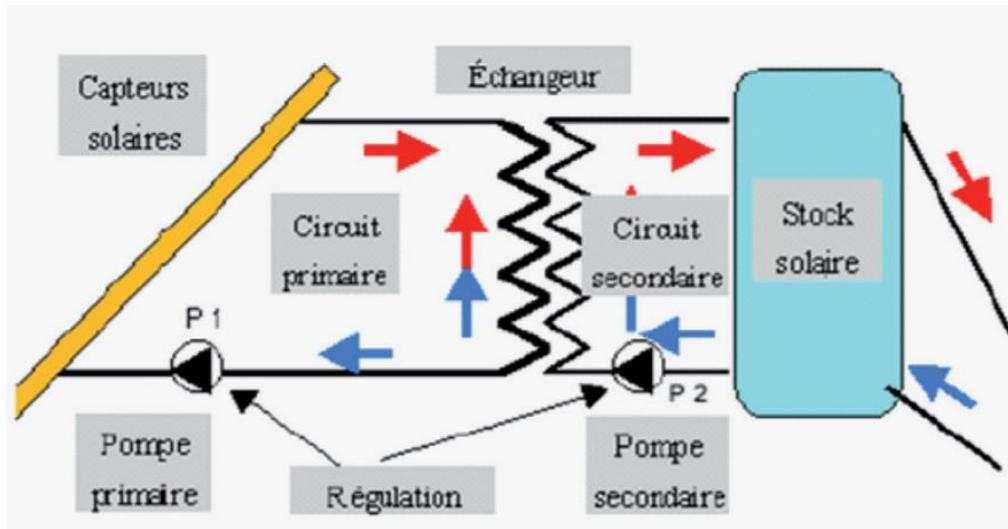


Figure I- 32: Chauffe-Eau avec Circulateur et Echangeur à l'extérieur du réservoir de stockage [27]

La boucle primaire : c'est une boucle fermée entre les capteurs et l'échangeur, le fluide est chauffé dans les capteurs solaires puis se refroidit en transmettant sa chaleur à la boucle secondaire dans l'échangeur.

La circulation se fait lorsque l'énergie solaire disponible est suffisante pour chauffer l'eau dans les capteurs, le système de régulation pilote la marche et l'arrêt de la pompe primaire en fonction de l'ensoleillement, et/ou des températures dans les circuits primaires et secondaires. La boucle secondaire : c'est une boucle ouverte entre l'échangeur et le stocke solaire, c'est l'eau chaude sanitaire qui circule dans cette boucle.

L'eau de stockage solaire est chauffée dans l'échangeur, elle se refroidit lorsqu'il y a utilisation d'eau chaude, la température de l'eau se situe dans une fourchette un peu plus restreinte que dans la boucle primaire avec un maximum de l'ordre 90°C.

La circulation se fait lorsque la boucle primaire est en mesure de chauffer la boucle secondaire, le système de régulation pilote la marche et l'arrêt de la pompe secondaire en fonction des températures dans les circuits primaires et secondaires et de l'état de la pompe primaire.

La boucle de distribution : c'est une boucle ouverte, l'eau froide en provenance du réseau pénètre dans le bas du réservoir, l'eau chaude sort par le haut.

Chapitre I : Généralités sur les installations de production d'eau chaude solaires

I.5- conclusion :

Les chauffe eau solaires sont composées essentiellement d'un capteur solaire et d'une cuve de stockage. Ils sont destinés pour la production de l'eau chaude sanitaire. Selon la capacité d'utilisation, on trouve les chauffe eau solaires à circulation naturelle (thermosiphons) pour une utilisation individuelle et les chauffe eau solaires à circulation forcée pour une utilisation collective ou industrielle. Leurs performances dépendent essentiellement de la capacité de captation de l'énergie solaire par le capteur et de la transmettre au fluide caloporteur. Pour cela, une étude sur les performances des capteurs solaires ainsi sur les paramètres influençant leurs rendements est primordiale pour une meilleure utilisation et une meilleure conception.

Chapitre II : DIMENSIONNEMENT DE L'INSTALLATION DE PRODUCTION D'EAU CHAUDE SOLAIRE

II.1 Introduction :

Le point de départ pour le dimensionnement d'une installation solaire de production d'eau chaude sanitaire (ECS) est le besoin en eau chaude solaire. Il est donc primordial d'estimer correctement ce besoin.

Autres facteurs tels que la situation géographique, la surface disponible pour l'installation solaire, l'orientation et l'inclinaison des capteurs, le budget, etc. joueront également un rôle important. Un bon dimensionnement doit conduire à produire un maximum d'énergie d'origine solaire entre 50 et 80 % des besoins d'eau chaude sanitaire, entraînant une économie financière, et évitant le rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

II.2. Dimensionnement de l'installation :

II.2.1. Dimensionnement des capteurs solaires :

- **La surface des capteurs A :** est la variable essentielle car elle conditionne le coût et la production utile de l'installation.

Le dimensionnement de A est fait sur la base du volume d'eau chaude consommé quotidiennement V_j .

On définit A_0 de façon à avoir un ratio V_j/A_0 à 75 litres par m^2 . [28]

Exemple : pour une consommation de 300 litres/jour $\Rightarrow A_0 = V_j/75 = 300/75$ soit $4 m^2$

$$\Rightarrow A_0 = 4 m^2$$

- Définition de la plage de variation autorisée ($A_0 - 50\%$, $A_0 + 50\%$)

- **Choix de l'inclinaison :** Il dépend essentiellement de deux paramètres : la latitude et la saisonnalité des besoins.

Exemple : A Alger l'inclinaison est égale à la latitude de lieu qui est 36.7° pour une consommation annuelle.

II.2.2. Dimensionnement du stock :

Le volume des ballons de stockage est déterminé en fonction de la consommation journalière: [28]

$$V_{s0} = \max(V_{ja}, V_{jété}) \quad (II.1)$$

Avec :

- V_{ja} : consommation moyenne journalière sur la période de fonctionnement.
- $V_{jété}$: consommation moyenne journalière sur la période Mai-Août.

On veillera à tenir compte, prioritairement de la consommation d'été, car le stockage à autres fonctions, de limiter les surplus temporaires de production qui sont plus probables en été.

La plage autorisée est définie de manière similaire à la plage autorisée pour le dimensionnement de la surface de capteurs : [28]

$$[V_{sMin}, V_{sMax}] = [V_{s0-50\%}, V_{s0+50\%}] \quad (\text{II.2})$$

Soit pour notre exemple : [100 l, 300 l].

II.2.3 Dimensionnement de l'appoint électrique :

Le dimensionnement de l'appoint vis à assurer :

- Le service en eau chaude en toutes circonstances.

La puissance de résistance électrique doit être comprise entre 10 et 15 W/litre du volume d'appoint (V_{ap}) chauffé par l'électricité, la valeur nominale étant de 12 W/litre. Le volume d'appoint est délimité par le haut du ballon et le bas de la résistance électrique. Si la résistance électrique est placée au centre du ballon, le volume V_{ap} correspondra à la moitié du volume nominal du ballon. [17]

II.2.4. Dimensionnement de l'isolant thermique du ballon :

Les caractéristiques de l'isolant thermique du ballon doivent être telles que la constante de refroidissement du ballon équivalent soit inférieure ou égale à la valeur : $Cr \leq 4.2 V-0.45$
Où V est le volume du ballon équivalent exprimé en litres.

La constante de refroidissement du ballon équivalent se calcule de la manière Suivante :

$$CR = \frac{24}{V_b} \left(1.1 + \frac{0.05}{V_b} \right) \times h \times S_b \text{ avec } \frac{1}{h} = \frac{1}{10} + \frac{e_{iso}}{k_{iso}} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

V_b : volume du ballon (m³) ;

S_b : surface extérieure du ballon (m²)

e_{iso} : épaisseur de l'isolant (m) ;

k_{iso} : conductivité de l'isolant (W/m. K)

La détermination de l'épaisseur de l'isolation. Pour cela, nous avons besoin de déterminer le flux de chaleur à travers celle-ci.

La quantité de chaleur à travers l'isolation est donnée par la relation :

$$Q = \frac{2\pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{\log\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad (\text{II.4})$$

Posons : $r_e = r_i + e$

L'équation (II.4) devient :

$$Q = \frac{2\pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{\log\left(1 + \frac{e}{r_i}\right)} \quad (\text{II.5})$$

D'où

$$e = r_i \cdot \left(\exp\left(\frac{2\pi \times \lambda \times L_0 \times (T_i - T_e)}{Q}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.5})$$

En plus des hypothèses du, nous supposons que $T_e = 20^\circ\text{C}$, $L_0 = 1,2 \text{ m}$ et que l'isolant est le polyuréthane expansé th ($\lambda = 0,028 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$).

On a :

$$v = 0.001 \times \pi \times r_i^2 \times L_0 \quad (\text{II.6})$$

\Rightarrow

$$\Rightarrow r_i = \sqrt{\frac{v}{0.001 \times \pi \times L_0}} \quad (\text{II.7})$$

$r_i = 257 \text{ mm}$

En mettant, ces valeurs numériques dans num de l'eqt, on obtient :

$$e = 49.7 \text{ mm} \approx 5 \text{ cm}$$

II.2.5. Dimensionnement de la canalisation :

Les canalisations sont dimensionnées, en fonction des paramètres suivants :

- Débits de fluide
- Pertes de charge admissibles

Calcul manuel par la formule approchée

$$D_i = 33,3 \times (Q'' / (\rho \times \pi)) \quad (\text{II.8})$$

Avec :

D_i = diamètre intérieur (mm)

Q'' = débit nominal (l/h)

ρ = masse volumique du fluide (kg/m^3)

II.3. Application de la méthode de calcul :

Pour le dimensionnement nous avons utilisé le logiciel SOLO qui utilise une méthode de calcul développée par le CSTB, France, dont les calculs réalisés par le logiciel sont les suivants :

a) Calcule les besoins journaliers en moyenne mensuelle

- Consommation journalière et température d'eau froide en moyenne mensuelle.
- Température de consigne de l'eau chaude supposée constante sur toute l'année.

b) Calcule le rayonnement global journalier moyen mensuel sur le plan des capteurs

- Rayonnement global horizontal journalier en moyenne mensuelle

c) Calcule le taux de couverture solaire en moyenne mensuelle par une équation utilisant les résultats de a et b

- Chauffe solaire individuel à thermosiphon,
- Capteur : surface totale S, paramètre B et K
- Stock : volume V constante de refroidissement CR.
- Inclinaison et orientation des capteurs

II.3.1 Condition d'un bon dimensionnement :

Une bonne connaissance des besoins en eau chaude sanitaire est indispensable car un surdimensionnement ou sous dimensionnement provoque la diminution du rendement de l'installation.

II.3.2 Paramètre de calcul :

Les paramètres nécessaires d'introduire dans le calcul sont :

1. le climat
2. les besoins en eau chaude
3. le ballon de stockage
4. L'isolant (épaisseur)
4. constante de refroidissement
5. la surface de captation

- **Le climat :**

Pour le climat nous avons choisi :

- pays : Algérie
- station : Alger
- la latitude : $36^{\circ}72$

Choix de la station

Pays	Station
Algérie	Adrar
Allemagne	Alger
Autriche	Biskra
Belgique	Sidi Bel Abes
Benin	
Brésil	
Bulgarie	
Burkina Faso	
Cameroun	
Chine	

Station sélectionnée : Alger Latitude : $36^{\circ}72$

- **Les besoins en eau chaude :**

On doit connaître la consommation moyenne d'eau chaude sanitaire en litres/jour, soit en moyenne annuelle, soit en moyenne mensuelle en cas de variations saisonnières.

Dans notre cas nous avons choisi :

- La consommation moyenne annuelle 300 l/jour.

Consommation

- Calcul de la consommation annuelle 
- Vous connaissez la consommation annuelle

- Consommation annuelle L/jour
- Consommation moyenne mensuelle :

- **Les ballons (solaire et appoint) :**

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de ballon suivantes :

Situation par rapport à l'habitation : extérieur

Type de l'installation : thermosiphon sans échangeur

Volume de stockage total : 300 L

Nombre de ballons : 1

Stockage

Situation par rapport au bâtiment

- Extérieur
- Intérieur

Type installation  

Température de l'eau °C 

Volume de stockage total Litres 

Nombre de ballons

- **Isolant :**

La valeur de constante de refroidissement est obtenue par un essai normalisé, et indique les pertes caractéristiques du ballon. Elle est fournie par le fabricant en fonction de la nature de l'isolant.

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de l'isolant suivantes :

- Type d'isolant : polyuretane
- Epaisseur de l'isolant : 5 cm

Constante de refroidissement

Vous connaissez sa valeur : 

<p>non <input checked="" type="radio"/></p> <p>Type d'isolant <input type="text" value="Polyuretane"/></p> <p>Epaisseur de l'isolant <input type="text" value="5"/> cm</p>	<p>oui <input type="radio"/></p> <p>Constante de refroidissement</p> <p><input type="text" value="0.1807"/> Wh/jour.l.°C</p>
---	---

- **Le capteur solaire :**

Pour cette installation nous avons choisi les caractéristiques de capteur suivantes :

- Modèle : JACQUES GIORDANO INDUSTRIES
- $K = 4.2 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$
- $B = 0,759$
- Surface : 4 m^2
- Nombre de capteurs : 2
- Orientation : peine sud
- L'inclinaison : $36^\circ 7$

Capteurs I



Choisir un capteur



Vous trouverez dans la rubrique "capteurs solaires" du menu ci-contre, des estimations des coefficients B et K que vous pourrez entrer manuellement ci-dessous, pour certains capteurs ne figurant pas dans cette liste.

Fabricant

Modèle

ou Entrer coefs Solo (CSTB)

ou Entrer coefs internationaux

B K W/m².
°C

Frτα FrUL
W/m².°C

Capteurs II

Inclinaison Capteur °/Horiz.

Orientation °/ Sud.

Surface Entrée Totale m²

Valider

II.4. Résultats de calculs :

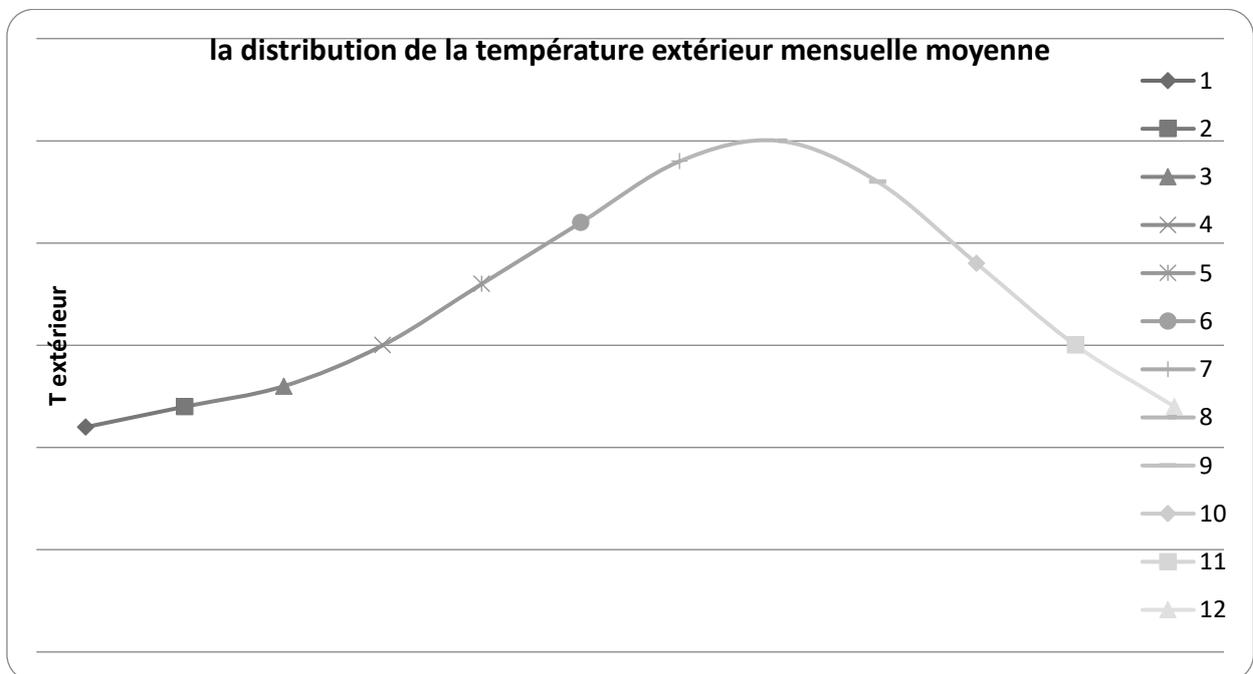
Les résultats de dimensionnement de l'installation solaire en utilisant le logiciel « SOLO » sont présentés dans les tableaux et courbes ci-dessous :

Alger, Latitude: 36°72	02/06/2021
------------------------	------------

Donnees meteo

Mois	Janv	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec
T° exterieure	11	12	13	15	18	21	24	25	23	19	15	12
T° eau froide	14,16	14,66	15,16	16,16	17,66	19,16	20,66	21,16	20,16	18,16	16,16	14,66

T° eau froide : Methode ESM2



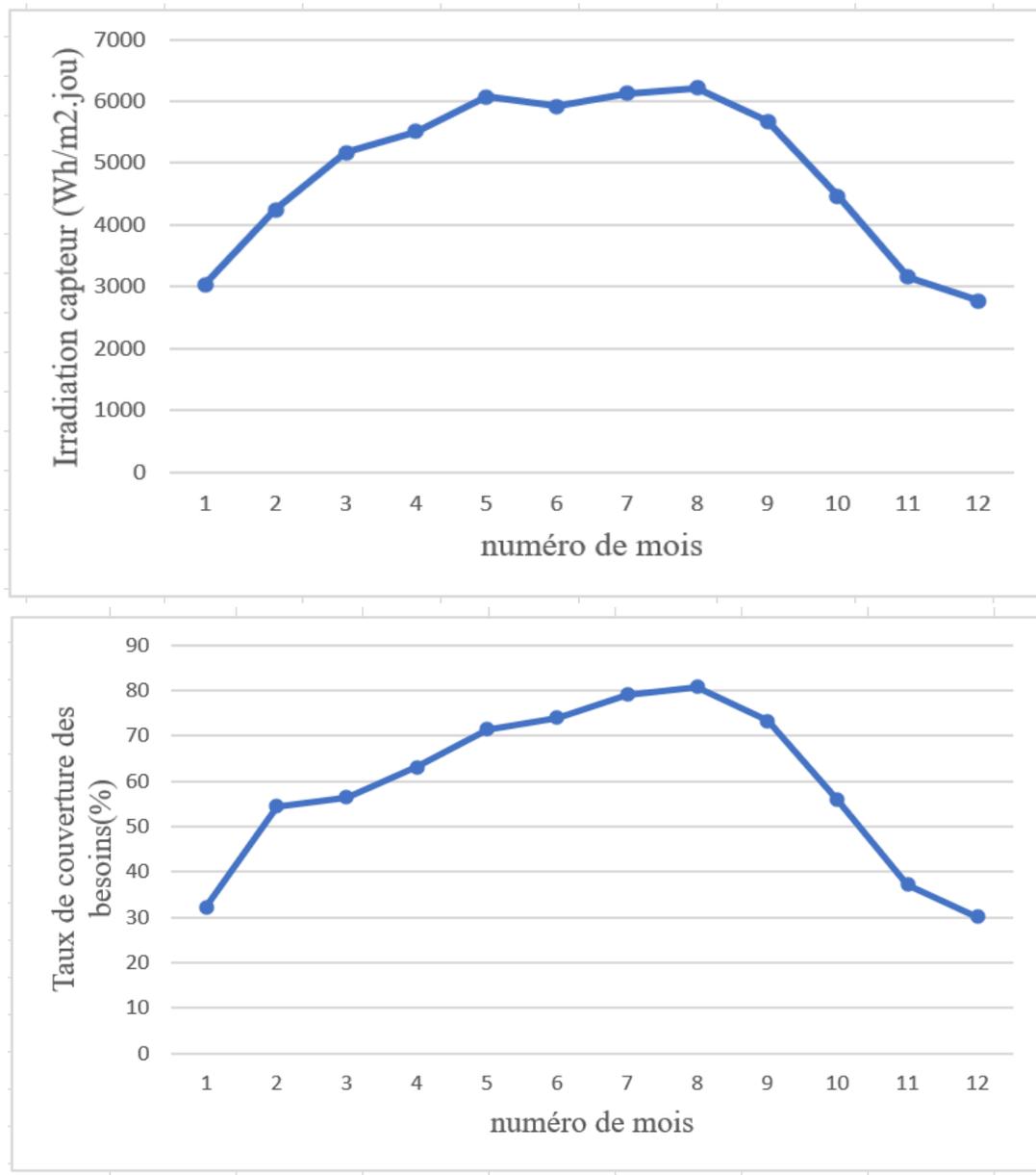
Installation

<i>Capteurs</i>		<i>Stockage</i>	
Surface	4m ²	Situation	Exterieur
Inclinaison	36,72°Horiz	Temperature ECS	50 °C
Orientation	0° Sud	Volume de stockage	300 Litres
Coefficient B	0,759	Cste de refroidissement	0,1807 Wh/jour.l.°C
Coefficient K	4,2W/m ² .°C	Type d'installation	Thermosiphon sans échangeur

	Irradiation capteurs (Wh/m ² .jour)	Besoins (kWh/mois)	Apports (kWh/mois)	Apports (kWh/jour)	Taux (%)	Volume (litres)
Janvier	3032	388	125	4,0	32,2	300
Fevrier	4241	345	157	5,6	45,4	300
Mars	5172	377	212	6,9	56,4	300
Avril	5514	354	223	7,4	63,0	300
Mai	6067	350	250	8,1	71,4	300
Juin	5916	323	239	8,0	73,9	300
Juillet	6122	317	251	8,1	79,1	300
Aout	6213	312	252	8,1	80,7	300
Septembre	5673	312	229	7,6	73,2	300
Octobre	4466	344	192	6,2	55,8	300
Novembre	3154	354	131	4,4	37,1	300
Decembre	2766	382	115	3,7	30,1	300

Taux couverture solaire	57,1	%	Apport solaire annuel	2374	kWh/an
Besoin annuel	4158	kWh/an	Productivite annuelle	594	kWh/m ² .an

calcul realise sur www.tecsol.fr



II.5. Interprétation des résultats de dimensionnement :

On remarque une bonne productivité annuelle de 594 kWh/m².an et avec un taux de couverture de 57.1 % donc notre installation est bien dimensionnée.

II.6. Conclusion :

Dimensionner une installation n'est pas une chose aisée car les besoins ne sont pas toujours connus rapidement, donc pour dimensionner au plus juste une installation solaire correspondant à l'optimum économique. On simule la production solaire et le coût en kWh solaire produit par plusieurs combinaisons "surface de capteur/ volume de stockage" l'installation offrant simultanément la production solaire la plus importante et le coût du kWh solaire le plus faible se situe à l'optimum économique. Notre installation est donc bien dimensionnée, et donc nous allons comparer ces résultats de dimensionnement aux résultats expérimentaux.

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel

III .1- Introduction :

Notre expérimentation sur le chauffe-eau solaire individuel s'est déroulée au sein du centre de développement des énergies renouvelables (CDER) situé à BOUZAREAH (Alger).

III. 2-Paramètres caractérisant le site de BOUZAREAH (nord) :

Latitude	=	36.72°N
Longitude	=	+3.12° E
Altitude	=	345m
Albédo du sol	=	0.2

III .3-Description du banc d'essai (BOUZAREAH) :

L'installation comporte deux capteurs plans à circulation naturelle (thermosiphon) de 4m² de surface et de 300L du volume de stockage qui peut satisfaire les besoins en eau chaude d'une famille de 4 à 6 personnes pour une consommation moyenne.

L'inclinaison des capteurs est de 36.72°selon la latitude du lieu pour une consommation sur toute l'année

Orientation : plein sud



Figure III- 1: Banc d'essai du CESI à BOUZAREAH

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel

III.4. Déroulement de l'expérimentation :

Avant de commencer à prendre des mesures, il faut prendre les soins de préparer le banc d'expérimentation comme suit :

- Remplissage de la cuve de stockage.
- Prévoir des couvertures, afin de pouvoir protéger les surfaces planes des capteurs.
- Programmation de l'enregistreur.

Une fois que tout est prêt, nous mettons l'enregistreur en marche.

III .5.-Paramètres à mesurer :

Les différents paramètres à mesurer sont :

- Les températures aux différents niveaux du capteur et de la cuve de stockage.
- La température ambiante.
- L'éclairement global incliné sur les surfaces des capteurs.

III.6-Mesure des températures de l'eau :

Les thermocouples :

Un thermocouple est composé de jonctions reliant chacune deux fils de nature différente. L'une des jonctions au point de mesure, constitue la soudure chaude, l'autre jonction est la soudure froide, dont la température est connue et sert de température de référence.

III.7. Choix des thermocouples :

Critères de choix d'un thermocouple :

- Domaine de température à mesurer.
- Sensibilité du couple.
- Résistance à la corrosion.
- Interchangeabilité.
- Temps de réponse rapide.

III.8-Normalisation des thermocouples :

Symbole	Métaux	Domaine de Température (°C)
K	Ni-Cr (+)	0 à +1100
	Ni-Al (-)	
T	Cu (+)	-185 à +300
	Cu-Ni (-)	
J	Fe (+)	+20 à +700
	Cu-Ni (-)	
E	Ni-Cr (+)	0 à +800
	Cu-Ni (-)	
N	Ni-Cr-Si (+)	0 à +1250
	Ni-Si (-)	

Tableau II- 1: les différents types des thermocouples et leur domaine de température

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel

En ce qui concerne notre cas la gamme de température à mesurer varie entre 0 à 100°, pour cela nous avons choisi des thermocouples de type K (en raison de leur disponibilité, leur sensibilité, et leur temps de réponse rapide associées à une courbe de réponse quasi linéaire dans le domaine de température envisagé). Dont la soudure des jonctions est faite, à l'atelier du CDER par soudage chalumeau (au préalable). Ensuite nous avons procédé à l'opération d'étalonnage en utilisant un thermomètre digital comme référence.

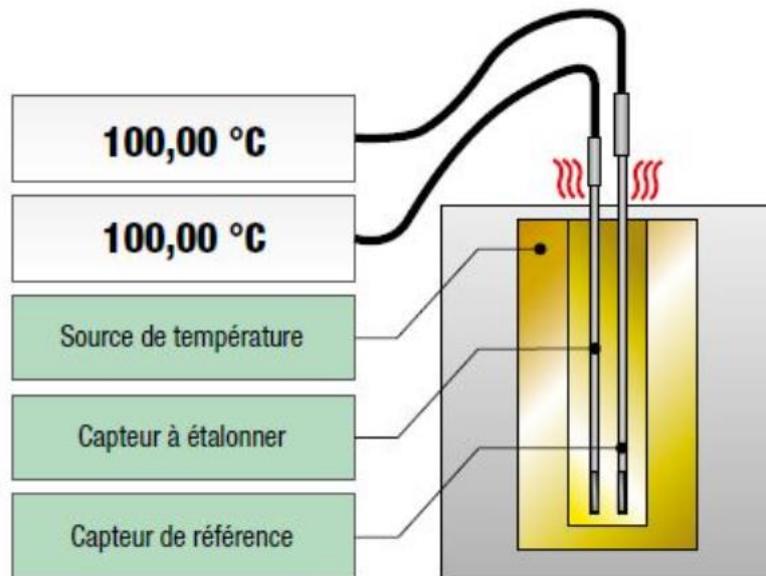


Figure III- 2: l'opération de l'étalonnage

▪ L'emplacement des thermocouples pour différentes mesures :

Les figures suivantes montrent l'emplacement des sondes de températures pour différents points de l'installation.

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel



Figure III- 3: mesure de la température à l'entrée du capteur.



Figure III- 4: mesure de la température à la sortie du capteur.



Figure III- 5: mesure de la température à l'entrée de la cuve de stockage



Figure III- 6: mesure de la température à la sortie de la cuve de stockage.

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel



Figure III- 7: mesure de la température ambiante.

III.9-Mesure de l'éclairement global incliné :

La mesure de l'éclairement globale a été effectuée par un pyranomètre de type KYPP et ZONNEN (CMS) ayant une précision de 1%.



Figure III- 8: La mesure de l'éclairement globale par un pyranomètre de type KYPP et ZONNEN (CMS)

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel

III.10- Enregistrement des données par l'enregistreur OM-300 SERIES :

L'ensemble des thermocouples sont reliés à l'enregistreur **OMGA** sans câble de compensation, car l'avantage de cet enregistreur est qu'il est portable, donc on peut se déplacer à n'importe quel moment pour prendre des mesures de température.

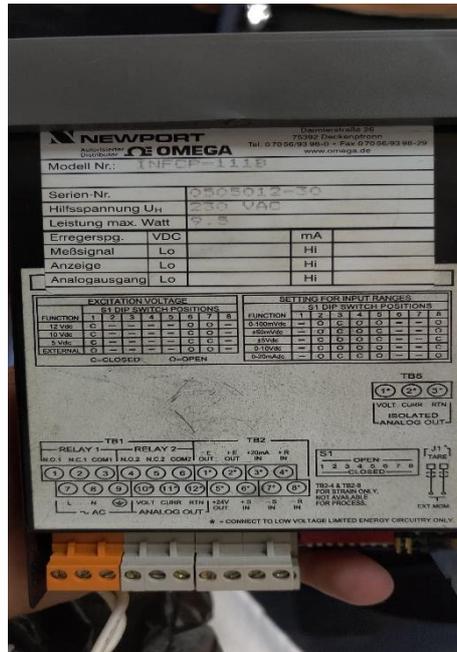


Figure III- 9: l'enregistreur OMGA

III.11-Affichage des valeurs de mesure :

L'affichage des mesures s'effectue sur un afficheur à cristaux liquide LCD :

- Toutes les voies en numérique et en unités d'utilisateur.
- Une voie en gros caractères et en diagrammes en barres.
- 2 voies en caractères.
- Toutes les voies par diagramme en barres.
- Une voie en représentation graphique.

Chapitre III : Etude expérimentale d'un chauffe-eau solaire individuel



Figure III- 10 : L'affichage des mesures

III.12. Conclusion :

L'étude expérimentale nous a permis de se familiariser avec les installations de production d'eau chaude solaires en testant les différents composants de l'installation permettent ainsi de prévoir une meilleure conception pour le futur. Les résultats expérimentaux sont représentés dans le chapitre.

Chapitre IV : résultats et interprétations

Chapitre IV : RESULTATS ET INTERPRETATION

IV.1 Introduction :

Les résultats expérimentaux présentés sur notre installation du CES sont représentés sous forme de courbes.

Pour les mesures, nous avons choisi une journée représentative éclairée du 04 /mai /2021 avec un pas de temps de 30 minutes de 8h00 à 16h30

IV.2 Interprétation :

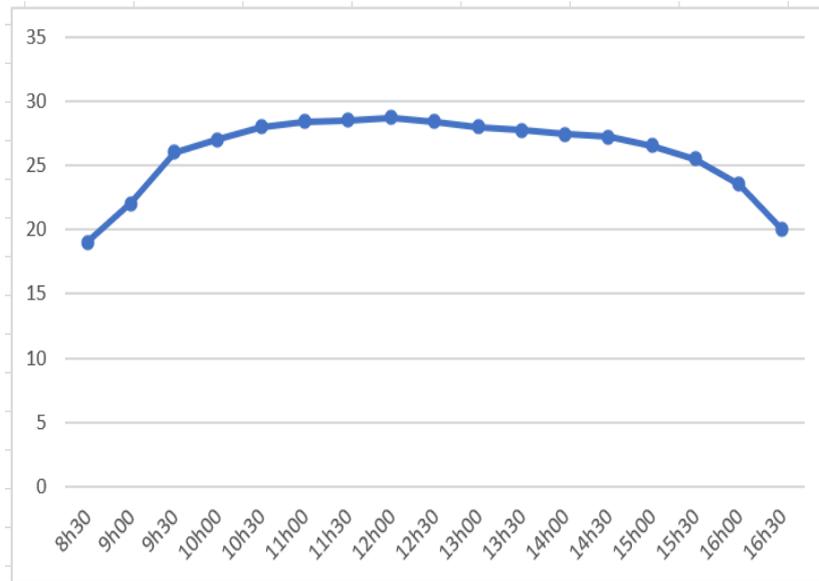


Figure IV- 1: L'évolution de la température ambiante.

La figure V.1 : représente l'évolution de la température ambiante de 08h00 à 16h30. On remarque qu'elle varie entre 26°C à 28°C de 09h00 à 12h00 et puis elle commence à avoir une pente négative légèrement et qui varie entre 27°C et 20°C

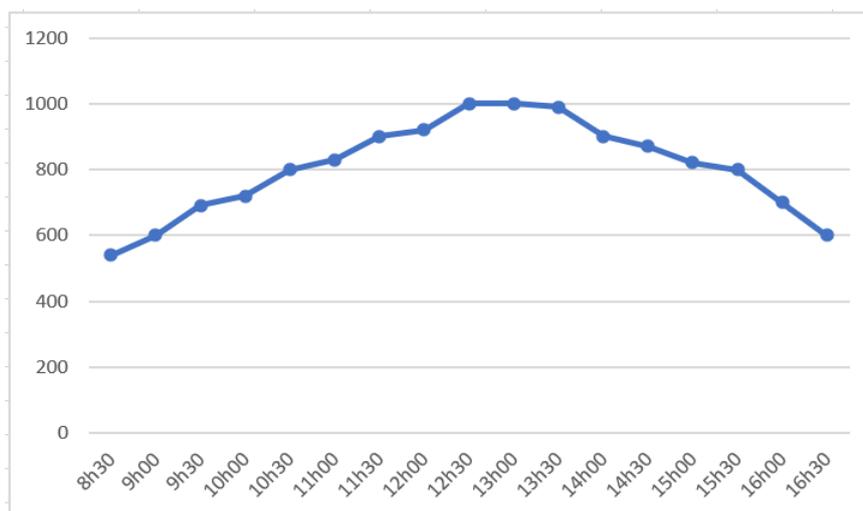


Figure IV- 2: L'évolution de la l'éclairage globale.

Chapitre IV : résultats et interprétations

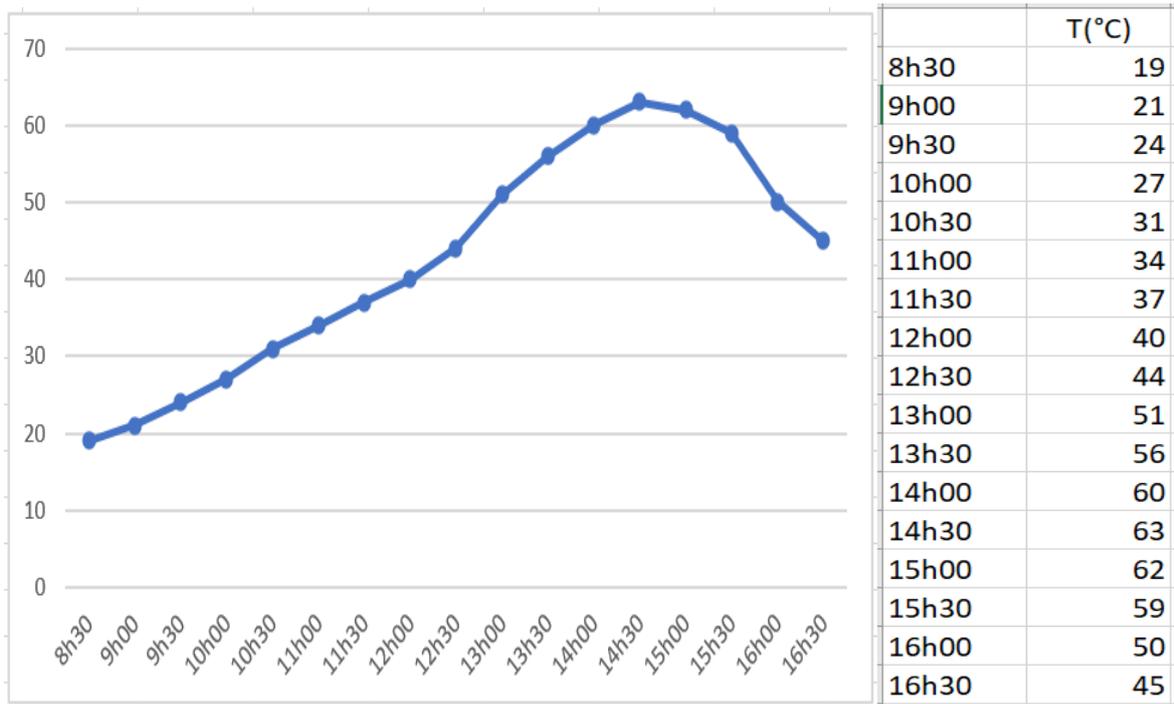


Figure IV- 3: Mesure de température à l'entrée du capteur.

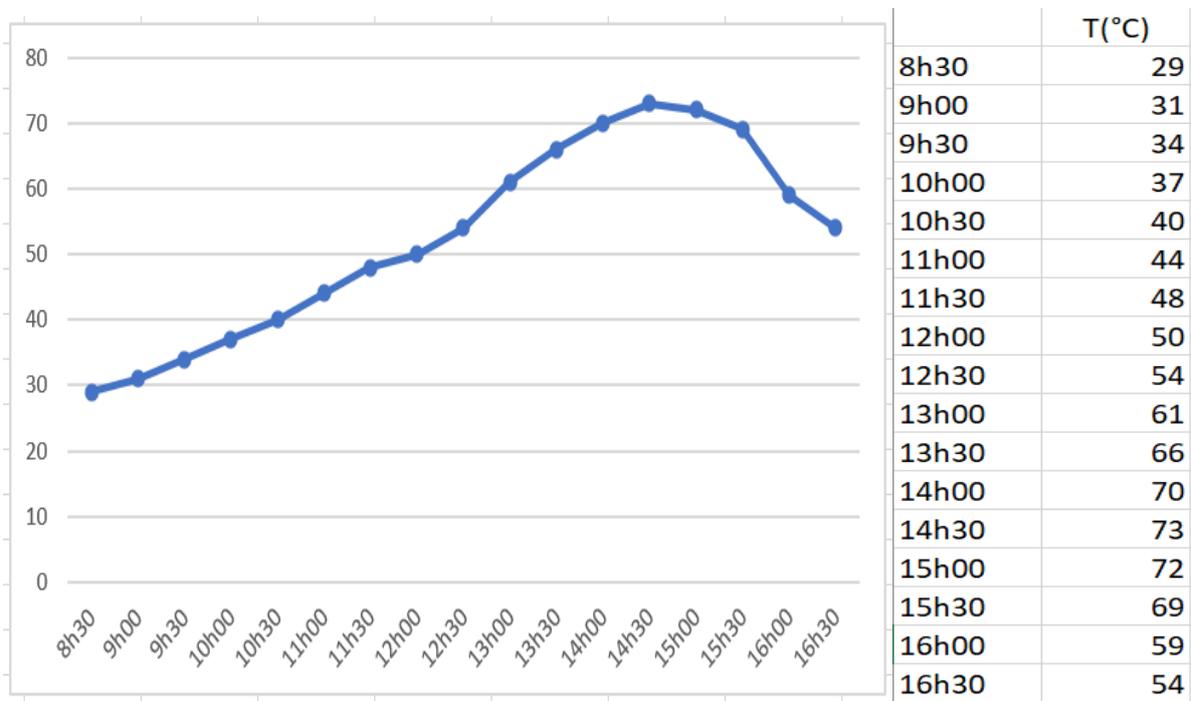


Figure IV- 4: Mesure de température à la sortie du capteur.

Chapitre IV : résultats et interprétations

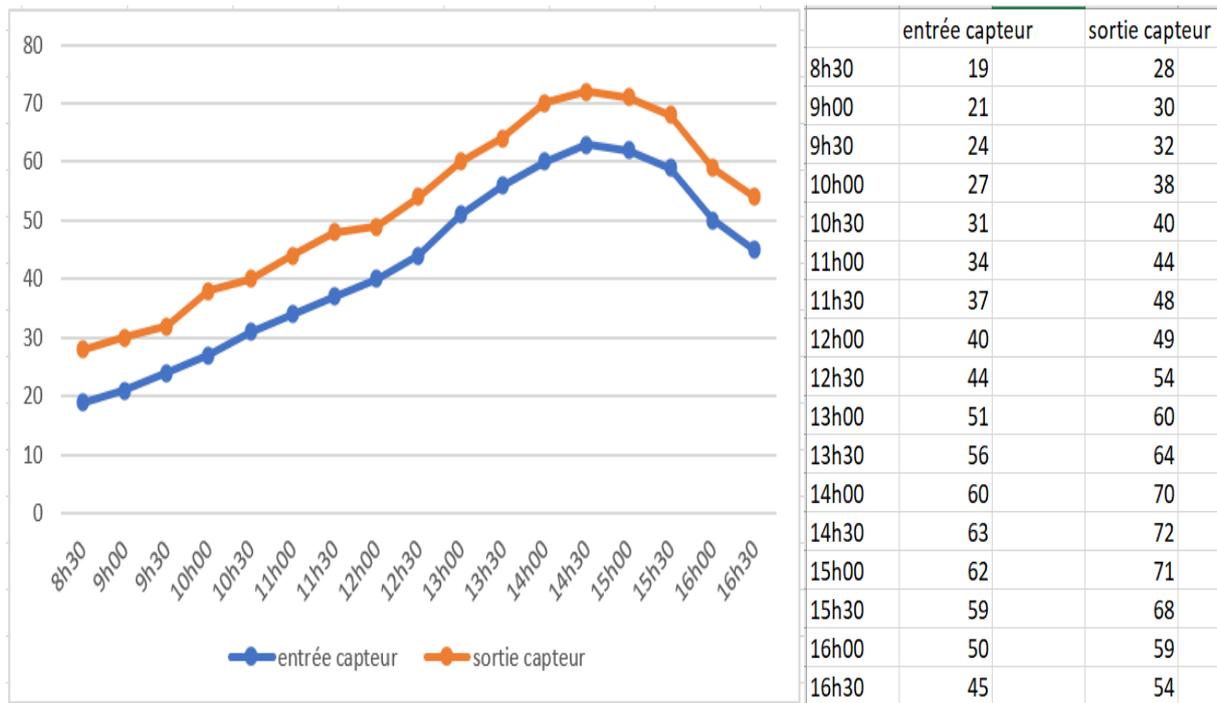


Figure IV- 5: La température à l'entrée et sortie du capteur.

La figure IV.5 : représente l'évolution de la température de l'eau entrée et sortie du capteur respectivement pour la journée du 04 /05/2021 de 8h à 16h30 avec un pas de temps de 30min. Les courbes ont la même allure avec des températures différentes. Afin de voir l'écart de températures entrée /sortie du capteur, nous avons représenté les deux courbes sur le même graphe, on constate que l'écart est de 10°C de 8h00à 16h30, ce paramètre est très important pour déterminer la performance de l'installation.

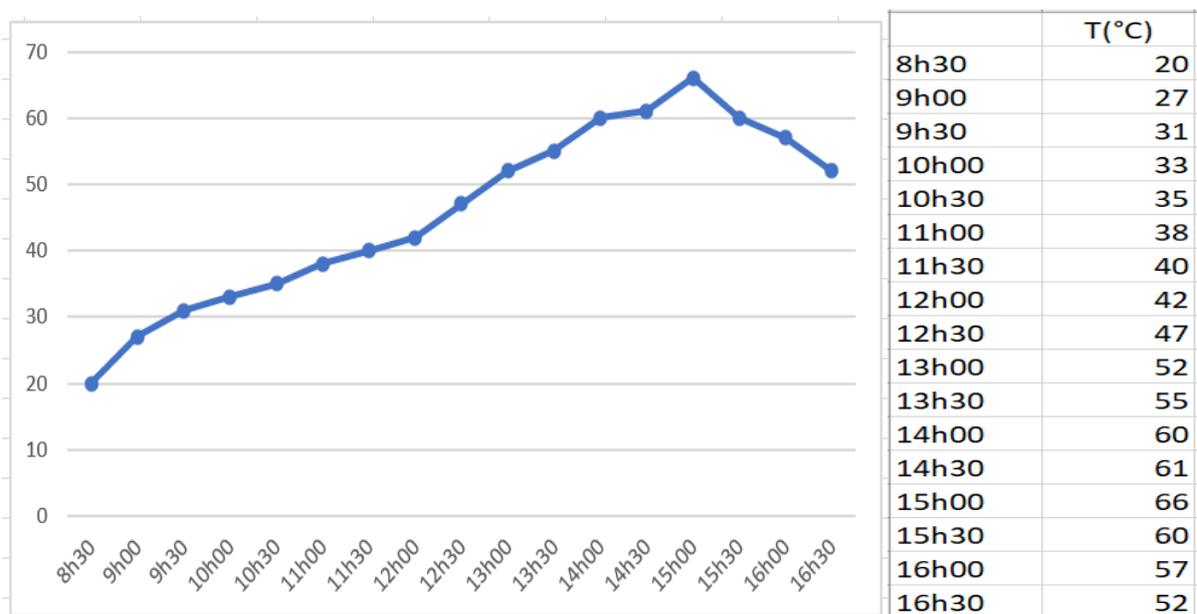


Figure IV- 6: Mesure de température à l'entrée de la cuve.

Chapitre IV : résultats et interprétations

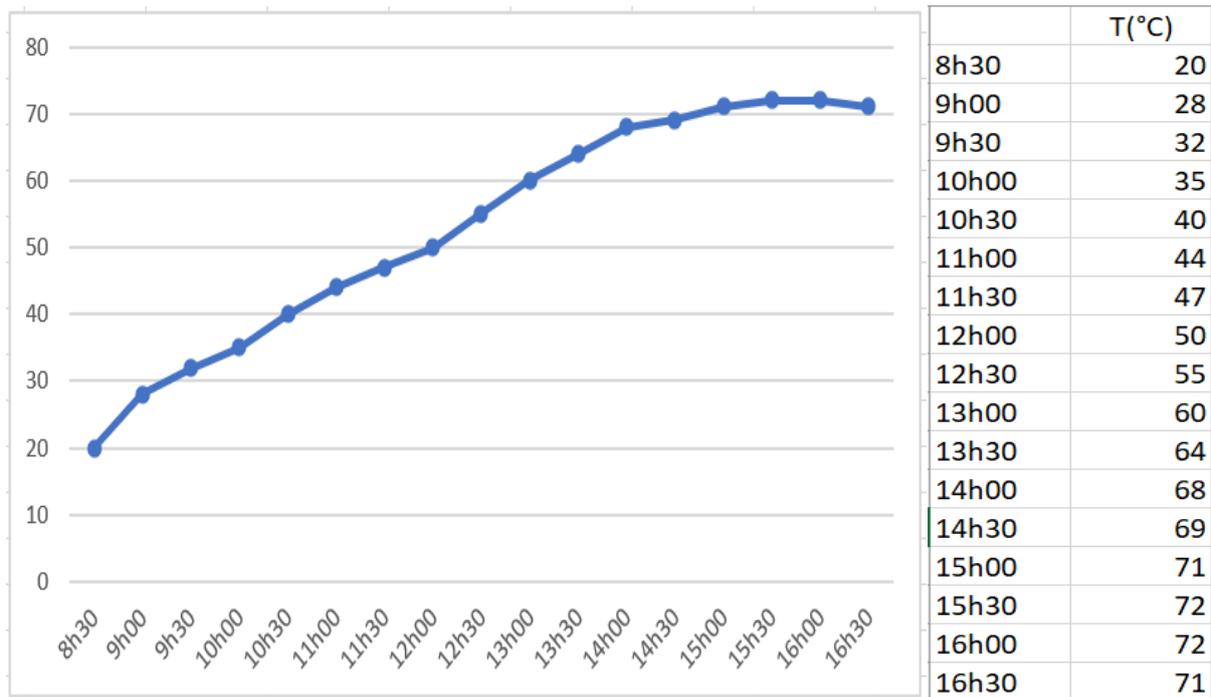


Figure IV- 7: Mesure de température à la sortie de la cuve.

La figure V.6 et V.7 représentent l'évolution de la température de l'eau entrée et sortie de la cuve respectivement pour la journée du 04/05/2021 de 08h00 à 16h30 avec un pas de temps de 30min. Les courbes ont une allure similaire avec des températures différentes. Mais après cette heure l'allure des deux courbes change, pour la courbe de température de sortie de cuve continue à augmenter bien que l'éclairement diminue et tend à se stabiliser et c'est dû au gain de l'énergie qui est important, par contre la courbe de la température de l'eau à l'entrée de la cuve, l'évolution est une pente négative ceci est dû aux pertes thermiques vers l'extérieur et tend à se stabiliser.

Chapitre IV : résultats et interprétations

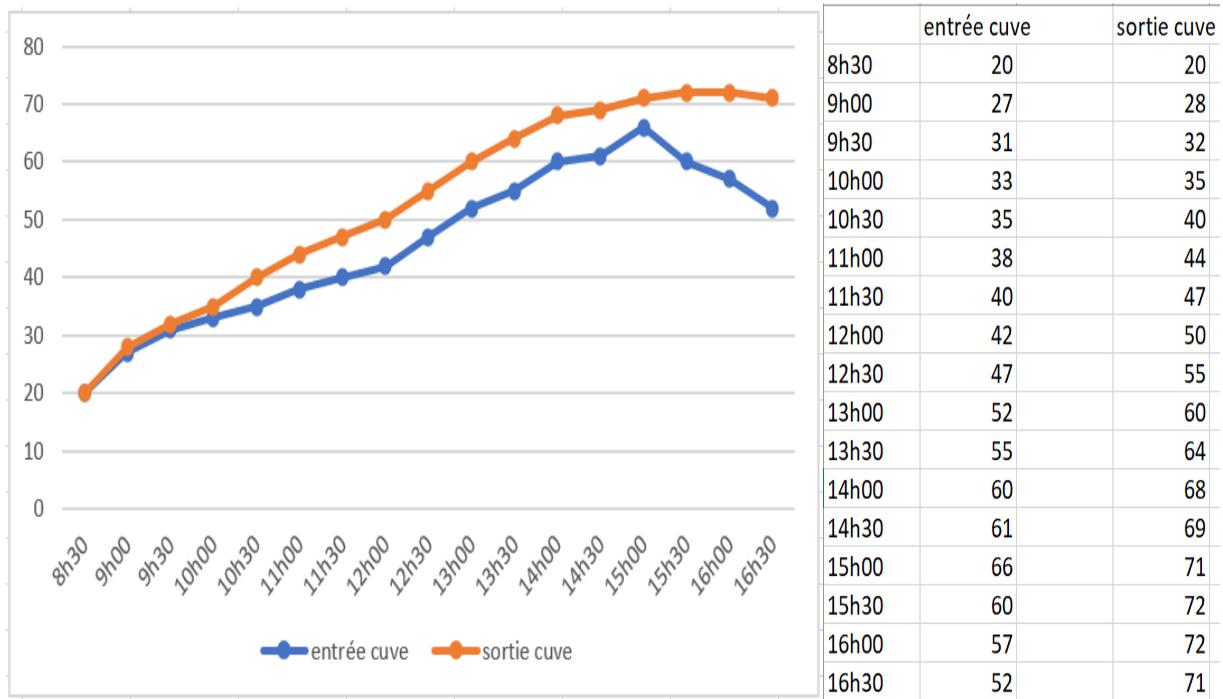


Figure IV- 8: La température à l'entrée et sortie de la cuve

Afin de voir l'écart entre les deux températures entrée/sortie cuve, nous avons représenté les courbes sur le même graphe figure V.8, on remarque que la température est presque identique de 8h00 à 9h30, et après ça on constate l'apparition d'un écart de température qui continu à augmenter au cours du temps jusqu'à 11h30 ou il se stabilise près de 10°C de 11h30 à 15h30. Après on a enregistré que l'écart de température continu à augmenter avec une température qui se stabilise à la sortie de la cuve au-delà de 15h30 et diminue à l'entrée pour atteindre un écart de 20°C à 16h30. On peut expliquer ce cas que la cuve est bien isolée d'où la performance de l'installation.

IV.3- Conclusion :

Les résultats expérimentaux sont très satisfaisants, avec un écart d'évolution des températures d'entrée et sortie du capteur solaire et ballon de stockage mesuré est de 10% correspondant à une concordance satisfaisante aux résultats théoriques. ce qui confirme clairement les performances de cette l'installation.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail qui a été réalisé au centre de développement des énergies renouvelables CDER nous a permis d'approfondir, et d'enrichir nos connaissances dans le domaine de l'énergie solaire thermique et en particulier les chauffe-eaux solaires.

Les résultats du dimensionnement sont très satisfaisants avec un taux de couverture de 57,1 % et une productivité de 594 kWh/m².an donc notre installation est bien dimensionnée.

Les résultats de l'expérimentation sont très satisfaisants, nous constatons que l'écart de La température entre l'entrée et la sortie du capteur solaire et le ballon de stockage est d'environ 10%, ce qui affirme parfaitement les performances de cette l'installation.

Le chauffe-eau solaire a un taux d'utilisation élevé dans plusieurs pays au monde, mais son développement en Algérie a été négligé bien que le climat soit très favorable, nous disposons d'un gisement solaire très important qui est évalué à 3000 h d'ensoleillement.

Notre travail contribuera au développement du solaire thermique plus précisément les chauffe-eaux solaires dans notre pays. Une telle contribution conduira inévitablement à la création d'un marché des chauffe-eaux solaire par l'installation des usines de fabrication de ces installations, et pourquoi ne pas avoir une concurrence avec ceux qui sont dans une position de leader mondialement dans ce domaine.

Notre souhait est de continuer notre travail par un sujet de doctorat dans le même domaine avec une autre application du chauffe-eau solaire collectif qui constitue une solution très intéressante pour les grands consommateurs de l'eau chaude solaire par exemple l'habitat collectif.

Enfin, on espère que ce travail qui a demandé beaucoup d'efforts sera utile et d'une efficacité aux utilisateurs de ces équipements et aux futurs étudiants.

Bibliography

- [1] F. Bouhired, «Développement des Chauffe Eau Solaires en Algérie,» Division solaire thermique et géothermique, Alger , 2010.
- [2] J. A. D. a. W. A. Beckman, «Solar Engineering of Thermal Processes, Fourth Edition.,» Hoboken, New Jersey, Published 2013 by John Wiley & Sons, Inc., pp. 3,4,5.
- [3] M. CAPDERO, «Atlas solaire de l'Algérie T1,» chez *modèles théoriques et expérimentaux*.
- [4] Y. JANNOT, «Thermique solaire octobre,» 2003.
- [5] G. M. M. S. R. Bernard, «Le rayonnement solaire,» Lavoisier, paris, technique et documentation, 1979.
- [6] B. W. A. Duffie J.A., «Solar engineering of thermal processes,» John Wiley and Sons, New , 1981..
- [7] T. Fatiha, «Prédiction de l'irradiation solaire globale pour la région de Tizi-Ouzou par les réseaux de neurones artificiels,» Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.
- [8] J. Bernard, «Energie solaire Calculs et optimisation,» Edition ellipses, 2004.
- [9] C. B. e. C.Vauge, «Le gisement solaire,» Paris, Ed. Tech. & Doc, 1982.
- [10] a. J. J.A. Duffie, «Solar Engineering of Thermal Processes,» 2ed, Inc, 1991.
- [11] A. BRAHIMI, «Etude de performances d'un capteur solaire plan à eau,» hal-01825548f, Génie des procédés, 2016.
- [12] R. M. 1. e. A. M. H. Derbal, «Etude d'un système de production d'hydrogène par voie,» Energ. Ren. Vol. 8, 2005.
- [13] a. ., W. M.Geyer, « Power From the Sun (Powerfromthesun.net),» J.T. Lyle Center, 2001.
- [14] M.P « conversion thermique et application » Le rayonnement solaire.2001
- [15] M. B. e. A. K. A. Mefti, «Analyse Critique du Modèle de l'Atlas Solaire De l'Algérie,» Rev. Energ. Ren. Vol. 2, 1999.
- [16] G. M. M. S. R. Bernard, «Le rayonnement solaire,» technique et documentation, Lavoisier, paris, 1979.
- [17] P. Rivet, «Le Rayonnement solaire,» CNRS.
- [18] C. F. A. N. Gama Fatiha et P. C.E.Chitour, «Etude, conception et réalisation d'un chauffe eau solaire. Étude technico-économique,» Laboratoire de Valorisation des Energies Fossiles. E.N.Polytechnique, 10 avenue Hassen Badi..
- [19] « internet : www.tecsol.fr,» [En ligne].
- [20] A. JOFFRE, «www.tecsol.fr,» cours d'Alsace, Tecsol, FORMATION Strasbourg , Janvier 2004. [En ligne].
- [21] «http://lycee.nicolas-cohen.org/fichiers/fichiers_pdf/effet_de_serre.pdf,» [En ligne].
- [22] H. S.-A. e. K. Karim, «L'évolution du chauffe eau solaire en Algérie,» Division Solaire Thermique et Géothermie, Alger, 2012.
- [23] A. F.BOUHIRED, « expérimentation du système de régulation et control » publication, revue des énergies, 1999.

- [24] ANDRE JOFFRE, «cours d'Alsace,» Tecsol, FORMATION Strasbourg, Janvier 2004. [En ligne]. Available: www.tecsol.fr.
- [25] A. .. D. .. e. D. S.SAMI-MECHRI, «l'appoint pour les installations solaire de chauffage d'eau sanitaire,» 2 eme symposium du comité Algérien de l'énergie, économie d'énergie et environnement, Alger, 15-16 novembre ,2000 ..
- [26] M.KHOUKHI, «Etude théorique et expérimentale du chauffe eau solaire de production,» secrétariat d'état à la recherche scientifique, décembre 1992.
- [27] «Manuel du chauffe eau solaire collectif,» TECSOL, formation tunis 2002. [En ligne]. Available: www.tecsol.fr.
- [28] A. P. D. R. THIERRY CABIROL, « Le chauffe- eau solaire,» Edisud. Cop, 1980.