



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences de la Matière



Thèse

Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat 3^{ème} cycle en
Génie de l'environnement et sciences des matériaux
Option : Énergies renouvelables

Par :

AMAR M'hammed

L'utilisation du Lif comme Isolant dans les Chauffe-Eau Solaires

Soutenue publiquement le : 27 / 06 / 2022 Devant le jury :

Mr. HADJADJ Ahmed	Professeur	Univ. Adrar	Président
Mr. BENATIALLAH	Professeur	Univ. Adrar	Promoteur
Mr. BOUSSAID Mohammed	MCA	Univ. Adrar	Examineur
Mr. ARBAOUI Iliace	MCA	Univ. Adrar	Examineur
Mr. BEN HAMMOU Mohammed	MRA	URERMS Adrar	Examineur

Année Universities : 2021/2022

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

أهدي هذا العمل الى روح والدي
حسن، والى أمي فاطمة الحريصة
على تقدمي كما وكيفا.
الى زوجتي، الى أبنائي والى كل من
كان فضله علي في مسار حياتي.

REMERCIEMENTS

Dieu merci, il m'a permis d'atteindre cette étape de ma vie et de ma carrière.

Ce travail a été effectué à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien Adrar. Je souhaite remercier très vivement mes amis Monsieur Harmim Arezki et Boukar Mébarek, membres d'équipe de (CS) de l'URERMS sans oublier Mr. Ouatta Ali Mouloud technicien expert à l'atelier de URERMS.

Je remerciais vivement Monsieur le directeur de recherche, Dr. Rachid Maouedj pour son soutien et son empressement à terminé le travail.

Mes vifs remerciements à l'encadreur de la thèse, Monsieur Benatallah Ali, professeur à l'Université d'Adrar, qui accepté d'encadrer ce travail, pour son orientation, ses conseils et son aide pour la réussite de ce parcours scientifique.

Je remercie également Messieurs les membres acceptent de faire partie du jury :

Monsieur Hadjadj ahmed professeur à l'Université d'Adrar, Monsieur le Dr. Boussaid Mohammed et Monsieur le Dr. Arbaoui Iliace à l'Université d'Adrar et Monsieur le Dr.

Ben Hammou Mohammed, chercheur à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien d'Adrar.

Je remercie aussi Monsieur :

Dr. Tahri Ahmed, Dr. Bouchuicha Kada, et Pr Kalloum Slimane pour leur soutien

SOMMAIRE

Nomenclature	xvi
Mots abrege	xvii
Résumé	xviii
Abstract	xix
الملخص	xx
1 Introduction générale	2
2 L'importance du sujet :	5
3 But de l'étude :	5
4 Justifications du choix du sujet :	6
5 Bibliographie.....	7

CHAPITRE I. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

1 Introduction.....	9
2 Gisement solaire.....	9
3 Présentation de la zone d'étude	11
4 Climat des Zones aride en Algérie.....	11
4.1 Les éléments du climat	11
4.2 Le climat en Algérie	12
4.3 Le climat à Adrar.....	13
4.4 Présentation de la région d'Adrar.....	13
4.4.1 Situation géographique.	13
4.4.2 Description du climat de la région.	14
4.5 Etude des différents facteurs climatiques	15
4.5.1 Températures.....	15
4.5.2 Variations des températures moyennes mensuelles.....	15
4.5.3 Variations des températures moyennes annuelles.....	17
4.5.4 L'insolation	18
4.5.5 Précipitations.....	20
4.5.5.1 Variations interannuelles des précipitations.	22
4.5.5.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations	23
4.5.5.3 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN.....	23
4.5.6 Le Vent.....	24
4.5.7 Humidité relative de l'air :	25
4.5.8 Evaporation	27
5 Outils de mesures des données climatiques	27
6 Conclusion	29
7 Bibliographie :	31

CHAPITRE II. GENERALITE SUR LE CHAUFFE-EAU SOLAIRES, ETAT DE L'ART

1	Introduction.....	33
2	État de l'art des chauffe-eaux solaire :.....	33
2.1	Pour Températures moins de 100°C :.....	38
2.2	Pour moins de 150°C :.....	38
2.3	Pour des températures comprises entre 200 et 2000°C :.....	38
2.4	Pour moins de 5000°C :.....	38
3	Classification des chauffe-eaux solaires.	38
3.1	Le capteur plan	39
3.1.1	Le capteur non-vitré.....	39
3.1.2	Le capteur vitré	39
3.1.3	Le capteur sous-vide	39
3.2	Le capteur à concentration.....	40
4	Les principaux composants d'un SSI.....	41
5	Systèmes de chauffage solaire thermiques et ces applications	43
5.1	Chauffe-eau solaire.....	43
5.1.1	Définition.....	43
5.1.2	Capteur solaire plans.....	44
5.1.2.1	Les absorbeurs	44
5.1.2.2	Type de changeur.....	45
5.1.2.3	Les matériaux des premiers absorbeurs	45
5.1.2.4	Les différents types d'absorbeurs	46
5.1.2.5	La couverture transparente	47
5.1.3	Unité de stockage.....	47
5.1.4	Unité de commande.	48
5.2	Les différents types de chauffe-eau solaire.	48
5.2.1	Le chauffe-eau à pompe électrique	48
5.2.2	Le chauffe-eau à thermosiphon.....	48
5.2.3	Le chauffe-eau monobloc	48
5.2.4	Les chauffe-eaux à auto-vidange	49
6	Les avantages d'un chauffe-eau solaire :.....	49
7	Marché des Chauffe-eau Solaires.	50
7.1	La période coloniale	50
7.2	Après l'indépendance	52
7.2.1.	Prototype CDER.....	52
7.2.2.	ENGTP CES.....	53
7.2.3.	Thermo-kad	53
7.2.4.	Capteur stockeur (URERMS).....	54
8	Sensibilisation et vulgarisation	54
9	Chauffe-eaux solaires dans la région d'Adrar.	56
9.1	Vulgarisation et exposition.....	57

9.2	Observations et évaluation.....	58
10	Conclusion.....	61
11	Bibliographie.....	62

CHAPITRE III. ESTIMATION DES PERFORMANCES DES CHAUFFE-EAU SOLAIRES EN MILIEU SAHARIEN

1	Introduction.....	65
2	Systèmes de thermosiphon.....	65
3	Le système actif simplifié	66
3.1	Bilan énergétique.....	67
4	Application à l'étude des performances des systèmes solaires :	69
4.1	Validation du programme de calcul pour le cas du chauffe-eau solaire :	70
4.1.1	Description et données de base du système :	70
4.1.2	Résultats et comparaison :	72
4.2	Application à l'étude comparative de plusieurs variantes de chauffe-eau solaire à thermosiphon.	73
4.2.1	Variantes du chauffe-eau solaire CDER.	73
4.2.1.1	Les différentes variantes étudiées.....	73
4.2.1.2	Résultats et discussions :	74
4.2.2	Etude de différentes combinaisons cuve-captur :	78
4.2.2.1	Les deux combinaisons étudiées :	78
4.2.2.2	Résultats et discussion :	80
5	Conclusion	81
6	Bibliographie.....	82

CHAPITRE IV. ISOLATION THERMIQUE EN UTILISANT (LIF DE PALMIER DATTIER)

1	Introduction.....	84
2	Classification des isolantes thermiques :	85
2.1	Isolants minéraux :	85
2.1.1	Laine de verre :	85
2.1.2	Laine de roche :	86
2.2	Isolants végétaux.	86
2.2.1	Liège :	87
2.2.2	Fibre de bois :	87
2.3	Fibres Animales	88
2.3.1	La laine de mouton :	88
2.4	Isolants synthétiques.....	88
2.4.1	Isolation au polystyrène extrudé (XPS)	89
2.4.2	Isolation au polyuréthane (PUR)	89
3	Choix durable des matériaux d'isolation thermique.....	89

4	Description du palmier dattier	91
4.1	Les Racines :.....	92
4.2	Le Tronc :	92
4.3	Fibrillium (lif):.....	92
5	Caractérisation thermique des matériaux isolants.....	95
6	Propriétés thermiques.....	96
6.1	La conductivité thermique :	96
6.2	La capacité calorifique :	97
6.3	La diffusivité thermique :	97
6.4	L'effusivité thermique :	97
6.5	L'absorptivité d'eau :	97
6.6	Dégradation thermique	98
7	Techniques de mesure des propriétés thermiques :	99
8	La composition chimique.....	99
9	Vérification de l'efficacité de l'isolation moyennant le « FDEM ».	100
10	Conclusion.....	101
11	Bibliographie :	102

CHAPITRE V. BANC D'ESSAI EXPERIMENTATION DISCUSSION ET PERSPECTIVES

1	Introduction.....	105
2	Composantes du chauffe-eau solaire réalisé	106
2.1	Le capteur solaire plan :	106
2.1.1	Description du capteur solaire plan expérimental :	106
2.1.2	Composantes du capteur solaire réalisé :	107
2.1.2.1	Absorbeur :	107
2.1.2.2	Caisson du capteur solaire	107
2.1.2.3	Isolation thermique :	108
2.1.2.4	Préparation d'isolation :	109
2.1.2.5	La couverture transparente :	109
2.1.2.6	Support métallique.....	109
2.2	Unité de stockage :	110
2.3	Bac d'alimentation :	111
3	Installation et expérimentation du capteur	111
3.1	Le capteur plan solaire.....	111
3.2	Montage du banc d'essai	112
3.3	Objectifs de l'étude expérimentale	113
3.4	Description du banc d'essai expérimental.....	113
3.5	L'instrumentation :	114
3.6	Comportement thermique :	115
3.7	Le déroulement du test :	115
3.7.1	Capteur avec couverture transparente en plastique :	115

3.7.2	Montage de comparaisant avec capteur plans à absorbeur en serpentin :	120
3.7.3	Capteur avec couverture transparente en verre :	122
4	Installation et expérimentation du système	127
4.1	Montage du système	127
4.2	Objectifs de l'étude expérimentale	127
4.3	Description du banc d'essai expérimental	128
4.3.1	Préparation des thermocouples	129
4.3.2	Installation des thermocouples	130
4.3.3	Mesure du rayonnement solaire	130
5	Déroulement des essais	131
6	L'instrumentation	132
7	Calcul des performances du système	133
8	Résultats et discussion	134
8.1	Journée de stagnation de système	134
8.2	Journée de puisage	137
9	Performances du système	141
10	Etude de la stratification	142
	Conclusion generale :	155
	Annexe	155

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1	: Les différents modes de conversion utilisés	9
Figure I. 2	: Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle)	10
Figure I. 3	: Carte de localisation de la Wilaya d'Adrar, Algérie	11
Figure I. 4	: Les zones climatiques à la surface du globe	12
Figure I. 5	: Frontières de la région d'Adrar.	13
Figure I. 6	: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale	15
Figure I. 7	: La variation des températures mensuelles année 2017.	16
Figure I. 8	: La variation des températures mensuelles 2018 (URERMS)]	16
Figure I. 9	: La variation des températures mensuelle 2019.	16
Figure I. 10	: La variation des températures mensuelle 2020	17
Figure I. 11	: Variations des températures moyennes annuelles (2011-2020)	18
Figure I. 12	: Moyenne mensuelle des irradiations journalières année 2018.	18
Figure I. 13	: Les évolutions horaires des flux solaires global, direct et diffus incidents sur un plan horizontal dans la région d'Adrar 15/07/2013.	19

Figure I. 14 : Evolution horaire de la densité du flux solaire (Adrar/31-03-2016).....	20
Figure I. 15 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2017.....	21
Figure I. 16 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2018.....	21
Figure I. 17 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2019.....	22
Figure I. 18 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2020.....	22
Figure I. 19 : Variation interannuelle des précipitations (2000-2020).....	23
Figure I. 20 : Variation mensuelle des précipitations.....	23
Figure I. 21 : Diagramme Ombrothermique pour la période (1991-2010).	24
Figure I. 22 : Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/01-05-2015).....	25
Figure I. 23 : Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/15-03-2018).....	25
Figure I. 24 : Humidité relative au 2018 URER/MS Adrar.	26
Figure I. 25 : Evolution horaire de la température ambiante	26
Figure I. 26 : Evolution horaire de la température ambiante et l’humidité relative (Adrar/01-05-2015).	27
Figure I. 27 : Présente une photo illustrative de cette station radiométrique	28
Figure I. 28 : Photo de la Station Météorologique de EnerMENA installé au l'URER’MS d’Adrar	29
Figure II. 1 : Photo représentant Le premier CES breveté en 1891	34
Figure II. 2 : Fabrication du premier chauffe-eau solaire 1953.	34
Figure II. 3 : Configuration d’un chauffe-eau solaire cuve séparer	35
Figure II. 4 : Configuration d’un chauffe-eau solaire (Autostockeur)	35
Figure II. 5 : Configuration du collecteur à tubes évacués	36
Figure II. 6 : Le chauffe-eau solaire stockeur intégré à l’habitat.	36
Figure II. 7 : Photo représentant une vue réelle d'une maison (région Adrar).....	37
Figure II. 8 : Capteur solaire sans vitrage.....	39
Figure II. 9 : Configuration des chauffe-eau capteur + cuve.	39
Figure II. 10 : Photo représentant concepts-capteurs-tubes-sous-vide [14].	40
Figure II. 11 : Les différentes technologies solaires pour la production de l’eau chaude.....	41
Figure II. 12 : Schéma représentant les différents éléments (CES).	42
Figure II. 13 : Schéma d'un système solaire d'eau chaude sanitaire, montrant les composants caractéristiques.....	43
Figure II. 14 : Schéma montrant les composants d'un capteur solaire plan.	44

Figure II. 15: Les principaux types des absorbeurs..	46
Figure II. 16: Stockage de la chaleur dans un seul ou plusieurs réservoirs.....	47
Figure II. 17: CESI(a) circulation forcée, (b) à thermosiphon ; (c) Monobloc ;.....	49
Figure II. 18: Héliodyne d'Alger, colline de la Bouzareah, environ 1955.	51
Figure II. 19: Université d'Alger avec des insolateurs plans, avril 1961.....	51
Figure II. 20: Terrasse d'une école primaire d'Alger avec des insolateurs plans.	52
Figure II. 21: Prototype du chauffe-eau solaire CDER.....	52
Figure II. 22: Prototype du chauffe-eau solaire EGTP.	53
Figure II. 23: Prototype du chauffe-eau solaire TERMOKAD.....	54
Figure II. 24 : Chauffe-eau solaire capteur stockeur URERMS	54
Figure II. 25: Publications publicitaires pour les chauffe-eau solaires	55
Figure II. 26: Installation des CES dans les établissements publics et les écoles.....	55
Figure II. 27 :Surface totale installée de chauffe-eau solaire domestique par ville.	56
Figure II. 28: Modèles de chauffe-eau solaires soutenus dans le cadre	56
Figure II. 29: Centre de handicapés près de SNTV.....	57
Figure II. 30 : Plat forme d'essai SEESMS.....	57
Figure II. 31 : Activité des vulgarisations et des visites officielles.....	58
Figure II. 32: Dégradation et brise de la couverture transparente.....	59
Figure II. 33: Dégradation de l'absorbeur.....	60
Figure II. 34: Dégradation d'un capteur sous vide dû ou longue exposition et température de stagnation élevée.	60
Figure III. 1 : Schéma d'un chauffe-eau solaire domestique.....	65
Figure III. 2: Schéma du système thermosiphon. La circulation est commandée par le différentiel de densité entre les points A et B.	66
Figure III. 3: Répartition des stations sahariennes sur la carte de l'Algérie	70
Figure III. 4: Le chauffe-eau solaire du CDER en banc d'essai.....	71
Figure III. 5: Schéma de principe de la variante "H" du chauffe-eau CDER.....	73
Figure III. 6: Les différentes dispositions de la tuyauterie par rapport à la cuve.....	74
Figure III. 7 : Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "1" à Bechar.	75
Figure III. 8: Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "2" à Bechar.	75
Figure III. 9 : Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "3" à Bechar.	75
Figure III. 10: Comparaison entre les variantes "11", "12" et "13" sur.....	76

Figure III. 11 : Performances du chauffe-eau solaire du CDER en variante	77
Figure III. 12 : Performances du chauffe-eau solaire du CDER en variante	77
Figure III. 13 : Vue schématique du chauffe-eau solaire cité par Malkin.....	79
Figure III. 14: Performances du chauffe-eau solaire de Malkin.(T = 60°C).....	79
Figure III. 15: Comparaison des performances de la combinaison "CI" et du chauffe-eau du CDER à la station de Bechar. (T=50°C)	80
Figure III. 16 : Comparaison des performances de la combinaison "C2" et du chauffe-eau du CDER à la station de Bechar (T,= 50°C)	80
Figure IV. 1 : Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya.	85
Figure IV. 2 : Photo représentant la forme commerciale de la fibre de verre.....	86
Figure IV. 3 : Photo représentant la matière isolante de la laine de roche.....	86
Figure IV. 4 : Le liège aggloméré est disponible en plaques, dalles et rouleaux.	87
Figure IV. 5 : Fibres de bois défibrées des chutes de bois.	87
Figure IV. 6 : Photo représentant l'isolation de laine de mouton.	88
Figure IV. 7 : Photo représentant l'isolation de polystyrène.....	89
Figure IV. 8 : Photo représentant l'isolation polyuréthane.	89
Figure IV. 9 : Photo représentant la récolte de FDEM.....	91
Figure IV. 10 : Les organes fibreux de palmier dattier.	91
Figure IV. 11 : Le Fibrillium et son emplacement dans le palmier	93
Figure IV. 12 : Photo représentant un toit construit de composite boue et fibre	94
Figure IV. 13: Quartiers de troncs de palmiers forment des supports de toit	94
Figure IV. 14 :L'absorption d'eau des composites phénoliques renforcés de fibre de palme non traitée et traitée.	98
Figure IV. 15 : Thermogravimétriques courbe des fibres de palmier dattier	98
Figure IV. 16 : Photo de prototype capteur-stockeur (Harmim et al)	100
Figure IV. 17 : Evolution du gradient de température « D » entre la surface arrière.....	100
Figure V. 1: Schéma représentant le système de chauffe-eau solaire	106
Figure V. 2 : Schéma représentant les composantes du capteur solaire plan.....	107
Figure V. 3: Image de l'élément absorbant (tube / plaque métallique).	107
Figure V. 4 : Schéma représentant le caisson en bois	108
Figure V. 5: Structure de caisson en photo avec des tiges de renforcement.	108

Figure V. 6 : La fibre de palmier utilisée comme isolant thermique dans le capteur.	108
Figure V. 7 : Panneau de lif (FDEM) installé dans le capteur.	109
Figure V. 8 : Schéma représentant la cuve de stockage.	109
Figure V. 9: Schéma représentant la cuve de stockage.	110
Figure V. 10 : Schéma représentant les composants de cuve de stockage.	110
Figure V. 11: Schéma représentant l'unité de stockage réalisée.	111
Figure V. 12: Schéma représentant la hauteur piézométrique du bac d'alimentation par rapport au système.	111
Figure V. 13: Photo représentant le capteur solaire installé sur la plate-forme des essais de l'URER/MS [2].	112
Figure V. 14: Montage réalisé pour l'étude expérimentale du chauffe-eau solaire.	113
Figure V. 15 : Disposition des thermocouples dans le système.	114
Figure V. 16 : Test de capteur avec couverture transparente en plastique.	116
Figure V. 17: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur, dans la journée du 24 janvier 2019 ($q=0.5$ l/mn).	116
Figure V. 18: Evolution des Δt lors du 24 janvier sous l'effet des paramètres de test (q , T_a moy et H_{moy}).	117
Figure V. 19 : Evolution des Δt lors du 31 janvier sous l'effet des paramètres de test (q , T_a moy et H_{moy}).	117
Figure V. 20 : Evaluation de rendement de capteur plan lors du 24/01/2019.	118
Figure V. 21 : Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur, dans la journée du 06 février 2019, ($q=0.5$ l/mn).	118
Figure V. 22 : Evaluation de rendement horaire de système leur du 06/02/2019.	119
Figure V. 23 : Figure montrant une comparaison des performances thermiques de capteur plan pendant deux jours.	119
Figure V. 24: Montage de deux capteurs en même temps.	120
Figure V. 25: Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 31/01/2019.	121
Figure V. 26 : Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 03/02/2019.	121
Figure V. 27: Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 06/02/2019.	122
Figure V. 28: Photo représentant le capteur en couverture de Verre.	122

Figure V. 29: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 15 Octobre 2019.	123
Figure V. 30 : Evaluation du rendement horaire de capteur 15/10/19.	123
Figure V. 31: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 17 Octobre 2019.	124
Figure V. 32 : Evaluation du rendement horaire de capteur 17/10/19.	124
Figure V. 33 : Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 16 Octobre 2019.	125
Figure V. 34 : Evaluation du rendement horaire de capteur 16/10/19.	125
Figure V. 35 : Evaluation ΔT et le rendement horaire moyen pour les jours de test	126
Figure V. 36 : Photo représentant le capteur solaire installé sur la plate-forme des essais de l'URER/MS	127
Figure V. 37 : Vue schématique de l'implantation des thermocouples.	128
Figure V. 38 : Disposition des thermocouples dans la cuve de stockage.	128
Figure V. 39 : Photo représentant l'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés.	129
Figure V. 40 : Photo représentant l'abri pour la mesure de la température ambiante.	130
Figure V. 41 : Photo représentant le pyranomètre installé sur le plan du capteur au niveau de la plate-forme des essais de l'URER/MS.....	130
Figure V. 42: Montage réalisé pour l'étude expérimentale du chauffe-eau solaire.....	132
Figure V. 43 :: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 06 au 09 /02/2020.	134
Figure V. 44 : Evolution de la température ambiante et l'éclairement durant les trois Jrs de stagnation du 06 au 09 /02/2020	Error! Bookmark not defined.
Figure V. 45: : Evolution des températures (Tvb), (Tvm) et (Tvh) dans la cuve de stockage lors de la journée du 06 au 09 /02/2020.	135
Figure V. 46 : Evolution de la température ambiante et l'éclairement durant	135
Figure V. 47 : Evolution de la température de l'eau d'entrée et de sortie de capteur en fonction de la température ambiante et l'éclairement du (11 à 14 /01/2020.).....	136
Figure V. 48: Evolution de la température de l'eau stockée en fonction de la température ambiante du (11 à 14 /01/2020).....	136
Figure V. 49: Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 16 /02/2020.....	137

Figure V. 50 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du puisage de matinée du 17 /02/2020.	138
Figure V. 51 : Evolution de la température ambiante et l'éclairage.....	138
Figure V. 52 : Evolution des températures (Tvb), (Tvm) et (Tvh) dans la cuve de stockage.	139
Figure V. 53 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage de l'après- midi du 18 /02/2020.	139
Figure V. 54 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.....	140
Figure V. 55 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de soutirage (matinée du 19 /02/2020.).	140
Figure V. 56 : Evolution des températures de stockage durant les trois	142
Figure V. 57 : Evaluation des températures 20/02/2020	143
Figure V. 58 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.....	143
Figure V. 59 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.....	144
Figure V. 60 : L'évaluation de rayonnement solaire et la températures ambiante	144
Figure V. 61 : Evolution des températures (Tvb), (Tvm) et (Tvh) dans la cuve de stockage. 17/02/2020.....	145
Figure V. 62 : Evaluation de l'éclairage et la température ambiante.....	145
Figure V. 63 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage.....	146
Figure V. 64 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 19 /02/2020.....	146
Figure V. 65 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 19 /02/2020.....	147
Figure V. 66 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage la matinée de la journée du 20 /02/2020.....	147
Figure V. 67 : Evaluation de températures ambiantes et l'éclairage pour les Jrs 13à 15/02/2020.....	148
Figure V. 68 : Evaluation des températures durant 3 jrs de stagnation.....	148
Figure V. 69 : Puisages après 3 jrs de stagnation. 13/14/15/02/2020	149

LISTES DES TABLES

Tableau I. 1: Le moyen d'ensoleillement reçu en Algérie	10
Tableau I. 2 : Tableau montre les températures des mois moyennes année 2018.....	15
Tableau I. 3: Température moyenne annuelle station Adrar (2011-2020)	17
Tableau I. 4 : La moyenne mensuelle des irradiations journalières	18
Tableau I. 5: Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar.	19
Tableau I. 6 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2017.	20
Tableau I. 7: Précipitation mensuelle à Adrar année 2018	21
Tableau I. 8: Précipitation mensuelle à Adrar année 2019.	21
Tableau I. 9 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2020.	22
Tableau I. 10 : Données sur la vitesse des vents. Station d'Adrar.	24
Tableau I. 11: Données sur la vitesse des humidité dans la station d'Adrar.....	26
Tableau II. 1: Les catégories de capteurs utilisables dans l'habitat	42
Tableau II. 2: Les propriétés de quelques matériaux absorbeurs	45
Tableau II. 3: Tableau récapitulatif des principales caractéristiques de l'Héliodyne.	51
Tableau II. 4: Prix en dinars algérien installé et mis en marche.	56
Tableau III. 1 : La liste des stations sahariennes considérées.	70
Tableau III. 2: Caractéristiques du chauffe-eau solaire du CDER.	71
Tableau III. 3: Liste des stations sahariennes retenues pour l'étude	74
Tableau III. 4: Caractéristiques du chauffe-eau solaire étudié par Malkin	78
Tableau IV. 1 : Liste des isolants végétaux les plus utilisés	88
Tableau IV. 2: Quelques isolants utilisés pour les capteurs thermiques.	90
Tableau IV. 3 : Tableau montre certaines industries qui dépendent des parties du palmier dattier.....	93
Tableau IV. 4 : Distribution des palmier dattier dans les différentes communes	95
Tableau IV. 5: Propriétés physique et mécanique du lif (FDEM)	99
Tableau IV. 6: Composition chimique du lif (FDEM).....	99
Tableau V. 1 : Caractéristiques techniques du capteur solaire plan réalisé.	107
Tableau V. 2 : Caractéristiques techniques de la cuve de stockage.	111
Tableau V. 3 : Liste des thermocouples installés sur le système.	129

Tableau V. 4: Quantité d'eau puisée par heure.	137
Tableau V. 5 : La contribution solaire de système lors 19/02/20.....	141
Tableau V. 6 : La contribution solaire de système lors 20/02/20.....	142

NOMENCLATURE

- Δt : Variation de tempe [mn] ;
 β : L'angle d'incidence en [°] ;
 λ : Conductivité thermique [W/m.k] ;
 ϕ : Flux de chaleur [W] ;
 e : Epaisseur de paroi [mm] ;
 S : Surface de captation [m²] ;
 C_p : Chaleur spécifique (J/kg °C).
 ρ : Masse volumique (kg/m³),
 α : Absorptivité
 ε : Emissivité
 α / ε : Sélectivité
 a : Diffusivité thermique [m²/s]
 E : Effusivité [J/k.m². s]
 q : le débit d'eau en [l/mn]
 Q_{ext} : l'énergie délivré par le capteur
 q_{net} : énergie nette totale absorption quotidienne par collecteur, J/m² /jour
 A_c : surface d'échange des collecteurs, [m²]
 Q_s : L'énergie fournie par le système solaire, [J]
 Q_L : La charge journalière d'eau chaude, [J]
 T_e : Température d'entré de capteur
 T_s : Température de sortie de capteur
 U_t : Le coefficient de perte de charge [W/m²°C].
 V_r : Volume du réservoir (m³)
 $Fr(\tau\alpha)_n$: Coefficient de gain du collecteur
 $FrUI$: Coefficient de perte du collecteur, [W/m²°C].
 Q_{net} : L'énergie nette quotidienne [J/jour]

Q_c : L'énergie totale journalière absorbée [J/jour]

Q_{pert} : L'énergie perdue quotidienne, [J/jour]

T_i, T_f : Température de fluide initial et finale ;

\dot{m} = débit massique de puisage (kg/s).

H_t : moyenne mensuelle du rayonnement solaire incident quotidien dans le plan des capteurs, [J/m²]

$\overline{T_a}$: La température ambiante moyenne de, [°C]

T_a = température ambiante (°C)

$\overline{T_t}$: La température moyenne de réservoir (°C)

T_{env} = température de l'environnement du réservoir (°C).

F_r : facteur d'évacuation de la chaleur du capteur solaire

f : fraction solaire

m_f = masse d'eau dans le réservoir (kg).

dT = variation de la température du réservoir de stockage par rapport au temps dt .

G_t = rayonnement instantané incident sur la surface du capteur (W/m²).

MOTS ABREGE

FNME : Fond national de maîtrise d'énergie

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement.

PNME: Programme national de maîtrise de l'énergie

SDHW: Solar domestic hot water

CES : Chauffe-Eau Solaire

CDES : Centre de Développements Energies Renouvelables

SEESMS : Station d'Expérimentation des Equipements Solaire en Milieu Saharien

URERMS : unité de recherche en énergie renouvelable.

EGTP : Entreprise des Grands Travaux Pétroliers

CESI : Chauffe-Eau Solaire Individuel.

SSC : Système Solaire Collectif.

Etude Expérimentale des Performances et Amélioration d'un Chauffe-Eau Solaire en Milieu Saharien

Résumé

L'homme exploite encore les anciennes sources d'énergie pour parvenir à une croissance économique et technologique, alors qu'il les traite comme une énergie disponible qui répond à ses besoins énergétiques, Malgré les risques environnementaux associés à son exploitation par l'émission de gaz polluants, le déversement de déchets, le rétrécissement du couvert végétal et d'autres complications. Il était nécessaire de rechercher des solutions sûres pour éviter la complexité et préserver l'environnement.

Les énergies renouvelables sont l'une des solutions sûres qui répondent aux besoins humains en énergie, en particulier dans les zones isolées et les zones rurales éloignées des grandes villes et des zones urbaines.

L'eau chaude est l'un des besoins quotidiens les plus importants, car elle a de nombreuses utilisations domestiques et industrielles. Elle est nécessaire à des fins ménagères pour se baigner, laver les vêtements, les ustensiles et autres activités de ménagers. Elle est également requise en grande quantité dans les hôtels, les hôpitaux, les services internes et les industries telles que le textile, le papier, la préparation alimentaire et les produits laitiers, avec des températures comprises entre 50°C et 60°C.

Dans cette thèse, nous proposons un système de chauffage solaire peu coûteux, fabriqué à partir de matériaux trouvés localement, qui utilise une isolation thermique traditionnelle à partir d'une source végétale (Fibrillium), afin d'atteindre un ensemble d'objectifs et de solutions au problème du développement, en préservant l'environnement et les oasis de palmiers et en prenant soin, et en évaluant certains matériaux de marché local disponible sur le marché populaire et officiel, et l'extension de la zone d'utilisation du chauffe-eau solaire notamment au niveau des zones rurales et isolées et des villes à caractère désertique. Il contribue également à promouvoir l'exploitation de l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes (l'énergie solaire) et à réduire l'écart de développement rural. De plus, une exploitation à grande échelle du rayonnement solaire engendrerait une réduction de la consommation de l'électricité et des combustibles fossiles et, par conséquent, une diminution des frais associés au chauffage, à l'eau chaude.

Mots clés : L'eau chaude, Chauffage solaire, Isolation thermique, Matériaux locaux, Environnement désertique.

Abstract

Man still uses old energy sources to achieve economic and technological growth, while treating them as available energy that meets his energy needs. Despite the environmental risks associated with its exploitation through the emission of gaseous pollutants, the dumping of waste, the shrinking of vegetation cover and other complications. It was necessary to seek safe solutions to avoid complexity and preserve the environment.

Renewable energy is one of the safe solutions that meet human energy needs, especially in remote areas and remote rural areas of major cities and urban areas.

Hot water is one of the most important daily needs for humans, because it has many domestic and industrial uses. It is necessary for household purposes to swim, wash clothes, utensils and other household items in cities and rural areas. It is also required in large quantities in hotels, hospitals, internal services and industries such as textiles, paper, food preparation and dairy products, with temperatures between (50 and 60)°C.

In this thesis, we propose an inexpensive solar heating system, made from locally found materials, that uses traditional thermal insulation from a vegetable source (palm leaf), in order to achieve a set of objectives and solutions to the problem of development, preserving the environment and oases of palm trees and taking care of them, and evaluating some materials of local market available on the popular market; and the extension of the solar water heater use area, particularly in rural and remote areas and desert towns. It also helps to promote the exploitation of one of the most important renewable energy sources (solar energy) and to reduce the rural development gap.

Keywords: Hot water, Solar heating, Thermal insulation, Local materials, Desert medium.

المخلص

لازال الإنسان يستغل المصادر القديمة للطاقة بغية تحقيق النمو الاقتصادي والتكنولوجي وهو يتعامل معها كمصدر طاقة أساسي تلبي حاجياته الطاقوية، رغم المخاطر البيئية المصاحبة للاستغلالها من خلال انبعاث الغازات الملوثة والضارة بالواقع المعيش للإنسان جراء رمي النفايات وتقلص الغطاء النباتي وتكاليف المتعلقة بنقل الطاقة والوقود؛ فكان لزاما البحث عن الحلول الآمنة تجنباً للتعقيد وحفاظاً على البيئة.

تعد الطاقات المتجددة أحد الحلول الآمنة التي يمكنها توفير جزء من حاجة الإنسان من الطاقة وخاصة في المناطق المعزولة والارياف ومناطق الشتات عن المدن الكبرى والمناطق الحضرية.

الماء الساخن أحد أهم الضروريات اليومية للإنسان، إذ تعدد استعمالاته المنزلية والصناعية؛ فهو مطلوب للنظافة والاستحمام وغسل الملابس والايوانى واغراض البيت الاخرى في كل من المدن والارياف. مطلوب كذلك وبكميات كبيرة في الفنادق والمساجد والمستشفيات والأقسام الداخلية والصناعات مثل النسيج والأوراق وإعداد الطعام ومنتجات الحليب، ما بين درجات حرارة تتراوح بين 50 و60 درجة مئوية.

في هذه الاطروحة نقتراح نظام تسخين شمسي غير مكلف مصنع من المواد المتواجدة محليا ويستعمل عازل حراري تقليدي من مصدر نباتي (ليف النخلة) وذلك لتحقيق جملة من الأهداف والحلول لمشكلة التنمية والحفاظ على البيئة وواحات النخيل والاعتناء بها وتقييم بعض المواد المحلية المتوفرة في السوق المحلي الشعبي والرسمي، سعياً في توسيع رقعة استعمال السخان الشمسي بصفة خاصة على مستوى المناطق الريفية والمعزولة والمدن ذات الطابع الصحراوي. كما تساهم كذلك في تعزيز استغلال احدى اهم مصادر الطاقة المتجددة (الطاقة الشمسية) وتقليص هوة التنمية في الأرياف.

الكلمات المفتاحية : الماء الساخن ، السخان الشمسي، العازل الحراري ، مواد محلية، البيئة الصحراوية.



Introduction G.



Introduction
Générale

1 Introduction générale

Le domaine d'utilisation des énergies solaires se développe d'une façon accélérée, notamment dans les pays technologiques. Mais nous savons avec certitude que l'utilisation du soleil comme source d'énergie alternative a donné une vitalité économique au monde et a contribué au développement des régions isolées.

Connaissant les bienfaits de l'exploitation de l'énergie solaire : absence presque totale de pollution, valorisation d'une énergie locale tout en limitant l'exploitation abusive du bois des palmier et de forêts et en contribuant à la préservation de l'écosystème; et en tenant compte des besoins énergétiques des populations toujours croissants, il devient plus que jamais nécessaire d'œuvrer pour le développement des applications solaires afin de subvenir aux besoins domestiques en matière d'énergie : ces applications sont très diverses, on peut citer entre autres: l'éclairage solaire, la cuisson solaire, le séchage solaire, la distillation solaire et la production d'eau chaude sanitaire moyennant le chauffe-eau solaire.

L'utilisation du rayonnement solaire pour chauffer l'eau domestique est aujourd'hui l'application la plus pratique et la moins chère. Chauffer de l'eau par la voix solaire est très simple, malgré la complexité liée à certains genres de chauffe-eau solaire et aux matériaux utilisés. De plus, le chauffage solaire de l'eau n'est pas nouveau. Cela se passait pendant des siècles. Il y avait des chauffe-eau solaires très sophistiqués à la fin du XIXe siècle et en 1951, il y avait jusqu'à 50 000 chauffe-eau solaires à Miami, en Floride seulement [1]. Les gens au Japon et en Australie y comptent depuis des années. Il existe donc un bon corpus de connaissances et d'expériences qui peuvent être apprises [2].

Les systèmes solaires thermiques pour la production d'eau chaude sont déjà obligatoires dans les nouveaux bâtiments selon les ordonnances solaires en Espagne, au Portugal, en Italie, en Grèce et dans d'autres pays européens [3].

L'Algérie dispose d'un niveau d'irradiation solaire des plus élevés du globe, plus de 3500 heures d'ensoleillement et une superficie de 2381745 Km².

L'Algérie, et contrairement à ce qu'on pourrait penser, a pendant plusieurs années été en phase avec les développements mondiaux. En effet, et depuis la colonisation déjà, notre pays a été le réceptacle de nombreuses expériences dans le domaine des énergies renouvelables. A titre illustratif on peut citer : le four solaire, l'éolienne d'Adrar, les cadrans solaires, les nombreux

distillateurs solaires ainsi que les nombreuses éoliennes de pompage d'eau installées tout le long de la steppe [4]. A l'indépendance aussi ce sont carrément des programmes nationaux qui ont vu le jour. C'est le cas du Programme Grand Sud (1985-1990), du Programme des 20 villages solaires et surtout du Programme National de R/D en énergies renouvelables [5].

L'Algérie a décidé de mettre en place une stratégie pour développer différentes applications de l'énergie solaire sous forme de programmes nationaux de développement des énergies renouvelables qui a été adoptée par le conseil des ministres le 3 février 2011[6].

Le chauffe-eau solaire est manifestement aujourd'hui « l'outil solaire » le plus développé dans le monde entier. Les chauffe-eau solaires existent en effet par millions au Japon, et USA, par dizaines de milliers en France, et rares sont les pays où ils sont totalement inconnus, [7].

Dans les pays industrialisés, cette application solaire a connu un développement très important. L'industrie développée a permis la construction de chauffe-eau solaires très performants avec des coûts de fabrication et d'installation à la portée du citoyen.

Chez nous le chauffe-eau solaire reste très peu utilisé malgré que les besoins en eau chaude dans tous les secteurs soient nombreux. Ceci est particulièrement dû au fait que l'énergie conventionnelle (électricité et gaz) est abondante et bon marché alors que le chauffe-eau solaire, tel que développé ailleurs, reste très cher et inadapté aux conditions des régions sahariennes (poids élevé et non adapté à l'habitat saharien, des températures très élevées en période estivale) [8].

La diffusion des chauffe-eau solaires, en milieu saharien, exige alors des efforts considérables pour les adapter aux besoins des régions sahariennes : En particulier par la prise en compte des moyens financiers très limités, des conditions climatiques très hostiles, de la disponibilité des matériaux et du savoir-faire local.

Notre travail s'inscrit dans le cadre d'un projet qui porte sur le développement de chauffe-eau solaire à moindre coût avec l'intégration des matériaux locaux et pouvant subvenir aux besoins des populations sahariennes en matière d'eau chaude sanitaire à des températures acceptables en période hivernale. Par rapport aux chauffe-eau solaires existe dans le marché mondial, où les matériaux de construction sans très chère, notre système présente les avantages suivants:

- Un prix de revient peu élevé ;

- Une technologie rustique ;
- Une robustesse adaptée aux conditions climatiques hostiles du désert.

Un prototype de chauffe-eau solaire a été réalisé au sein de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER/MS) à Adrar. Notre travail consiste à faire une étude expérimentale permettant l'évaluation des performances de ce système.

Le manuscrit est structuré en cinq chapitres :

Dans une première partie de notre rapport, nous présentons des généralités sur le gisement solaire, et d'autres présentations sur les différents paramètres métrologiques caractérisant les sites sahariens. etc. Aussi, ce chapitre comprend une présentation de la solution alternative représentée par l'énergie solaire et son abondance en Algérie.

Le deuxième chapitre explique les méthodes d'exploitation de l'énergie solaire et présente les types des capteurs solaires les plus utilisés actuellement, leurs performances et leurs adaptations dans les systèmes industriels et domestiques et une synthèse sur les types des centrales thermiques solaires.

Le troisième chapitre concerne des analyses théoriques et expérimentales de l'influence des paramètres géométriques sur la performance de collecteur solaire thermique plan à long terme avec les différentes configurations de cuve de stockage. Dans ce chapitre, nous présentons les chauffe-eaux solaires de manière générale, la représentation détaillée sera décrite le prototype construit à l'URER/MS dans le chapitre cinq.

Le quatrième chapitre est consacré à la description de l'isolant thermique utilisé, en citant les différentes utilisations dans la vie quotidienne et différentes caractéristiques thermiques, mécaniques et ces compositions chimiques.

Le cinquième chapitre, est la partie expérimentale, on décrit notre configuration installée sur le banc d'essai de l'URERMS avec les différents résultats de mesures. Et finalement, nous avons terminé ce travail par une conclusion générale.

2 L'importance du sujet :

L'importance des énergies renouvelables et son rôle dans le développement durable en Algérie :

- La plupart des pays en développement s'efforcent de parvenir à un développement durable et recherchent des moyens de d'atteindre ces objectifs de développement, y compris l'Algérie.
- Considérant que les énergies renouvelables représentent une énergie durable propre et ne polluent pas.
- Les coûts élevés d'exploitation et transformation d'énergie fossiles ont conduit l'Algérie à diversifier les sources économiques en cherchant ou en s'appuyant sur de nouvelles sources d'énergie.
- Décrire les efforts déployés par l'Etat algérien pour atteindre l'exploitation optimale
- L'énergie propre telle que l'énergie solaire comme moyen de parvenir à un développement durable.
- Encouragez le citoyen à adopter des systèmes simples et à les exploiter de la bonne manière.
- Contribuer à l'établissement d'un marché local des énergies renouvelables.

3 But de l'étude :

Cette étude vise à atteindre un ensemble d'objectifs qui sont :

- Inclusion de systèmes fonctionnant aux énergies renouvelables dans les foyers ;
- Répondre à certains besoins énergétiques des ménages ;
- Diversifier les sources d'énergie et réduire les coûts énergétiques ;
- Production d'eau chaude sanitaire avec des énergies renouvelables ;
- Inclusion de matériaux disponibles localement pour parvenir à un produit adapté à la capacité financière du citoyen ;
- Réduire la consommation d'électricité et de gaz, sources polluants ;
- Contribuer à briser l'isolement et au développement des zones rurales ;
- Mettre en évidence l'importance des énergies renouvelables dans la réalisation du développement durable et la tendance à l'avancement de la recherche scientifique dans son domaine.

- Mettre en évidence la contribution de l'énergie solaire dans le développement durable en Algérie, d'autant plus qu'elle est considérée comme l'une des plus importantes sources d'énergie renouvelable.

4 Justifications du choix du sujet :

Le choix d'un sujet de thèse fait partie du compromis. Il y a des raisons subjectives et objectives:

A/ Raisons subjectives :

- Mon expérience avec l'équipe chauffage solaire de l'unité de recherche d'Adrar URER/MS
- Approfondir les connaissances sur les énergies renouvelables au service du développement durable.
- Disponibilité de la matière première pour la réalisation d'un prototype
- Le sujet de thèse prend en compte le besoin des citoyens dans les régions sahariennes isolées.
- Le sujet peut être un véritable exercice vers l'intégration du solaire dans l'habitat.

b/ Raisons objectives :

Certaines sont des raisons objectives qui motivent les chercheurs à choisir ce genre de sujet sont le suivant :

- Le sujet des énergies renouvelables est récent dans le développement durable, dont l'Algérie est riche de nombreuses sources d'énergie.
- La crise économique internationale due au prix du pétrole.
- L'intérêt du chercheur pour l'aspect environnemental et la nécessité de maintenir l'équilibre écologique
- exploitation du potentiel énergétique solaire d'Algérie dans le développement durable.

5 Bibliographie

- [1] Chris Laughton, Eau chaude solaire, Conception et installation des chauffe-eau solaires, Dunod, Paris, 2012
- [2] Hakim Sid-Ali et Kaci Karim, L'évolution du chauffe-eau solaire en Algérie, bulletin des énergies renouvelables CDER N°=022-23 2012
- [3] David Funk, l'énergie solaire : Circonstances et conditions d'exploitation au Québec, CUFE, Thèse (M.Env.) Université de Sherbrooke Canada, 01 2010
- [4] https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_014_01.pdf
- [5] Bulletin des Energies Renouvelables, CDER, Semestriel N°14 Décembre 2008.
- [6] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [7] M'hammed Amar et Ali Ben Atallah, Réalisation et expérimentation d'un capteur plan solaire installé au milieu saharien ; International Conference on Materials, Patrimony and the Environment in Arid Zones " ICMaPEAZ'19" University Adrar -Février 2019.

Chapitre I.



Présentation de la Zone d'étude

1 Introduction

La dernière décennie a été témoin d'une plus large diffusion des technologies modernes d'économie d'énergie, qui utilisent des spécifications de protection de l'environnement dans divers domaines, en particulier l'utilisation de la lumière du jour, de la chaleur solaire et de la ventilation solaire.

Dans cette partie de la thèse, nous allons présenter quelques notions fondamentales et définir le climat spécifique de la région saharienne en particulier le climat de la wilaya d'Adrar et les sites de voisinages dans les régions sahariennes, afin de décrire le gisement solaire pour les sites d'implantations et permettent de tenir en compte des interactions adaptatives entre la position astronomique du soleil avec la densité du flux solaire incident sur les différentes zones dans l'environnement saharien.

2 Gisement solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des autres énergies renouvelables. Le rayonnement solaire thermique peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité, soit de la chaleur, par le chauffage solaire ou la production électrique. Cependant, ce rayonnement subit à plusieurs perturbations, qui varient avec la constitution verticale de l'atmosphère terrestre (nuage, aérosol, ..., Etc.), qui constitue une barrière gênant le passage efficace de radiation solaire [1]; ou les besoins et la possibilité d'exploitation de l'énergie solaire sont directement liés aux conditions climatiques.

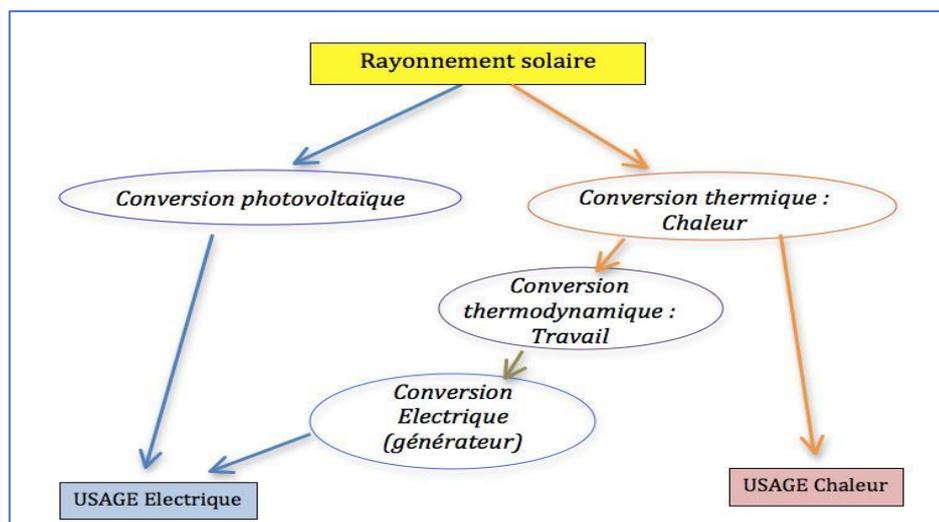


Figure I. 1 : les différents modes de conversion utilisés [2].

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire important compte tenu des valeurs de la durée d'insolation enregistrées sur la quasi-totalité du territoire national comme le montre la figure I.2.

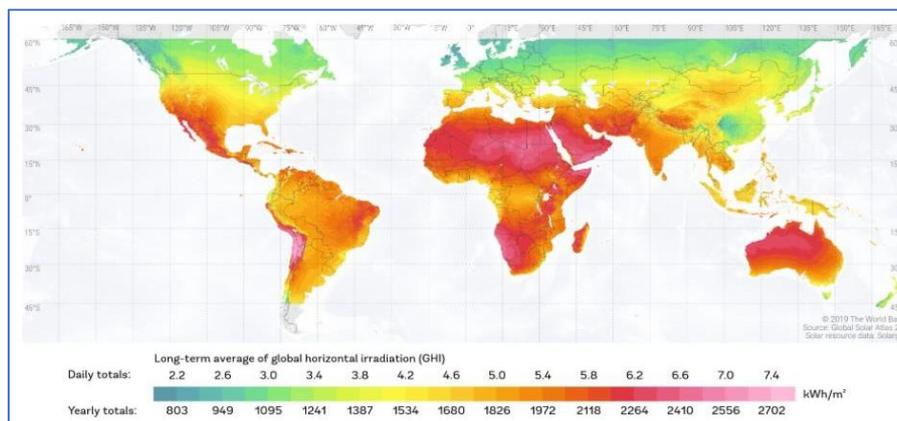


Figure I. 2 : Carte mondiale de l'irradiation solaire globale (annuelle et journalière moyenne) [3].

Par conséquent, la quantité d'énergie reçue au sol quotidiennement est de 5 KWh/m² [4], soit près de 1700 KWh/m² par an au nord et de 2263 kWh/m² au sud [5], ce qui favorise l'utilisation de l'énergie solaire dans différents domaines tel que la production de l'eau chaude, la chaleur, l'électricité, le séchage agroalimentaire... etc. Le Sahara dispose de l'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau I.1.

Tableau I. 1: Le moyen d'enseillement reçu en Algérie [6,7].

Régions	Régions côtières	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie %	4	10	86
Durée moyenne d'enseillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

La radiation solaire moyenne dans cette zone est comprise entre 1900 kWh/m²/an (sur les régions côtières) et 3200 kWh/m²/an (dans le Sud et les régions désertiques), ce qui correspond en heures d'enseillement à une échelle variant de 2700 à 3400 heures/an.

Cette grande capacité a été confirmée par des études menées par le chercheur allemand Gérard Knies qui démontre que (06) six heures d'enseillement du Sahara permettraient de stocker de l'électricité pour toute la population mondiale pendant une année entière [4].

Par ailleurs, une autre étude évoquée par un économiste algérien, Bachir Messaitfa, dans son livre Algérie 2030-vision prospective, assure la capacité du Sud algérien à satisfaire la demande mondiale en énergie électrique en moyenne de quatre fois, tout en respectant la norme de la sécurité énergétique [4].

3 Présentation de la zone d'étude

Après le nouveau découpage administratif de 2019, la superficie d'Adrar a diminué de moitié, avec une superficie de 232 918,24 kilomètres carrés avec une circonférence de 2340,09 kilomètres carrés, compte tenu de l'extension du territoire algérien, qui est d'environ deux millions et demi de kilomètres carrés. La situation géographique de l'état est désertique par excellence, avec une faible densité de population.

Elle se caractérise par un fort ensoleillement et de faibles précipitations ; aussi par des oasis de palmiers, et de grand potentiel agricole et la diversité des ressources souterraines telles que l'eau, gaz et le pétrole et certaines des richesses précieuses récemment découvertes.



Figure I. 3 : Carte de localisation de la Wilaya d'Adrar, Algérie [8].

4 Climat des Zones aride en Algérie

4.1 Les éléments du climat

Les principaux éléments du climat sont : la radiation solaire, la température ambiante, le vent, l'humidité et les précipitations. Parmi ces éléments, la radiation solaire, la vitesse de vent et la température ambiante ont une grande influence sur l'efficacité thermique de système ; et objet de notre étude ; leur influence sur le fonctionnement et interaction avec les autres composantes du système de chauffe-eau solaire.

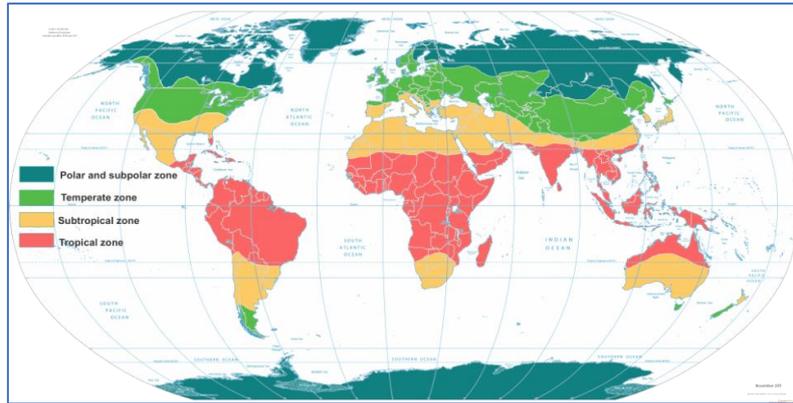


Figure I. 4 : Les zones climatiques à la surface du globe [9].

Il existe trois grandes zones climatiques à la surface du globe, caractérisées par leurs températures et les chutes de pluie ou de neige qu'elles reçoivent. Près des pôles se trouvent les zones polaires, où les températures sont très froides durant toute l'année. Près de l'équateur se trouve la zone chaude, qui se caractérise par des températures élevées et l'alternance d'une saison sèche et d'une saison humide autour des tropiques.

Entre les zones polaires et la zone chaude se trouve la zone tempérée. Dans cette zone, les quatre saisons sont bien marquées.

Cependant, dans une même zone climatique, les températures, la répartition des précipitations et les vents ne sont pas absolument identiques ; la proximité d'un océan et l'altitude jouent un rôle essentiel dans ces différences climatiques [10].

4.2 Le climat en Algérie

L'Algérie est un vaste pays, elle est comprise entre 18° et 38° de latitude nord, et entre 9° de longitude ouest et 12° de longitude est, (le méridien international 0° Greenwich passant près de la ville de Mostaganem). En Algérie la première classification en zones climatiques a été faite par le CSTB en 1962 qui sert de base de calcul pour le dimensionnement de chauffage ou de climatisation [11,12]. Une deuxième classification prenant en compte les données climatiques plus représentative de la période (1974–1984) permet de définir avec plus de précision les zones climatiques de l'Algérie. Cette vaste étendue territoriale correspond à une diversité de zones climatiques qui peuvent se classer en trois catégories.

- Le tell : climat tempéré humide de type méditerranéen
- Les hautes plaines : climat de type continental
- Le Sahara : climat aride et sec [13].

4.3 Le climat à Adrar

Adrar se caractérise par une saison hivernale courte, froide et sèche, proche de zéro le matin, et une saison estivale longue et chaude, jour et nuit, ce qui a considérablement facilité le processus de séchage et la volatilité du sable [14]. Au début février, les vents se font plus forts et le temps est turbulent jusqu'à début mai, où les températures montent et le taux de consommation d'eau augmente dans les salles de bain pour éliminer la transpiration et laver les vêtements mouillés de la transpiration, tout cela en l'absence des pluies en été et les faibles taux de précipitations dans la région.

Dans le même temps, à la fin du printemps et parfois en été, des pluies sans mousson sont enregistrées accompagnées d'une tempête orageuse qui perturbe la vie, et par conséquent, l'approvisionnement en énergie et en eau est perturbé, les routes sont bloquées et le sable est déversé dans villes et vergers. D'un autre côté, le climat désertique est instable, avec des montagnes sablonneuses qui freinent l'expansion, et les clôtures sablonneuses couvraient certains villages et vergers.

4.4 Présentation de la région d'Adrar

4.4.1 Situation géographique.

Adrar se trouve à 263 m d'altitude, Latitude : 27.88, Longitude : -0.28 Altitude : 254 Adrar est caractérisé par un climat désertique. Le dernier découpage territorial de l'année 2019 ; La wilaya d'Adrar (1974) a été décomposé en trois wilaya : Adrar au Centre, Bordj Badji El Mokhtar au Sud et, Timimoune, au Nord.; avec cette restriction La wilaya d'Adrar, est composé de (06) Daïra et (16) communes, répartie au niveau de deux régions : le Touat central et le Tidikelt (Aoulef).



Figure I. 5 : Frontières de la région d'Adrar.

Le nouveau territoire de la Wilaya est limité par:

La Wilaya Timimoune : au Nord.

La Wilaya de Beni Abbés : au Nord-Ouest.

La Wilaya de Tindouf et la Mauritanie : à l'Ouest

La Wilaya de Bordj Badji El Mokhtar: au Sud.

La Mauritanie : au Sud-Ouest.

La Wilaya de Tamanrasset : au Sud-Est.

La Wilaya de Ain Saleh : au Nord-Est.

4.4.2 Description du climat de la région.

Le climat du Sahara, chaud, ensoleillé et aride, est caractéristique d'un désert chaud, situé de part et d'autre d'un tropique. Il résulte de la subsidence de l'air sous l'effet des anticyclones permanents qui se produisent entre 25°N et 35°N.

Ainsi, les précipitations sont très rares et irrégulières ; la plupart des régions reçoivent en moyenne moins de 130 mm de pluie par an, et certaines, comme le Tanezrouft, restent plusieurs années sans pluie ou peuvent survenir sous la forme d'averses très brutales, et l'eau ruisselle dans les oueds.

En revanche, l'insolation est de plus de trois mille heures par an avec des températures diurnes qui sont très élevées, voisine de 50 °C.

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente un grand potentiel de toute l'Algérie comme l'indique la figure. I.6.

Grâce à sa position géographique ; les paramètres météorologiques de la région d'Adrar contribuent d'une manière considérable sur sa performance et le bon fonctionnement des systèmes thermiques solaires tel que le chauffage solaire. En effet, la maîtrise de l'évaluation et de la variabilité des paramètres météorologiques du site permettra d'avoir une vue claire sur les périodes optimales du chauffage et autre application thermique solaire.

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est de l'ordre de 3500 h/an est la plus importante au monde, elle est toujours supérieure à 9h/j et peut arriver jusqu'à 14h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 10h/j en période estivale [7].

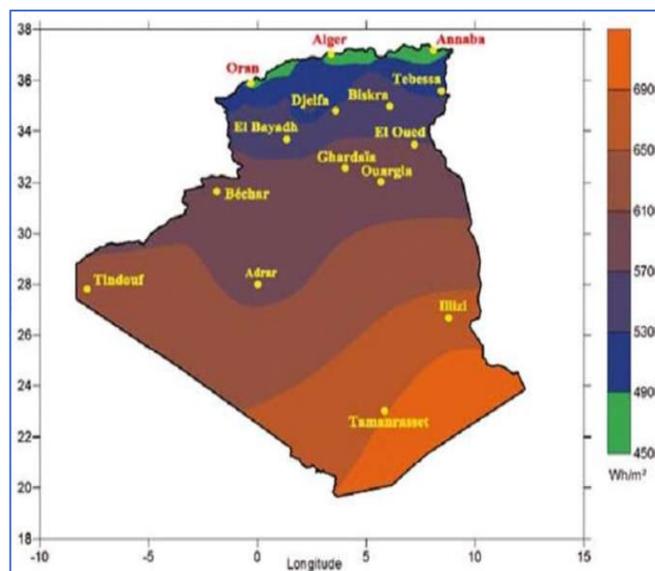


Figure I. 6: Moyenne annuelle de l'irradiation globale reçue sur une surface horizontale [17]

4.5 Etude des différents facteurs climatiques

4.5.1 Températures

La température est le degré de chaleur ou le froid qui règne dans un lieu ou dans l'atmosphère. Elle est reliée aux sensations de froid et de chaud, provenant du transfert thermique entre le corps humain et son environnement. Sa variation influe en particulier dans les zones sèches et par conséquent elle agit sur le climat des régions. Le tableau I.2 représente la variation des températures mensuelles maximum, minimum et moyenne exprimées en degré durant l'année 2018 dans la région d'Adrar.

Tableau I. 2 : Tableau montre les températures des mois moyennes année 2018[15].

Mois	Tmoy jour	Tmoy min	Tmoy max	Mois	Tmoy jour	Tmoy min	Tmoy max
Janvier	15,4	5,18	22,78	Juillet	41,39	30,37	48,17
Février	16,24	2,76	22,95	Août	36,96	27,05	44,24
Mars	22,13	6,73	29,48	Septembre	33,22	19,66	40,64
Avril	26,42	10,8	33,56	Octobre	26,01	11,82	32,88
Mai	30,55	15,84	37,39	Novembre	19,63	6,48	26,89
Juin	36,3	24,42	43,37	Décembre	14,34	4,28	22,87

4.5.2 Variations des températures moyennes mensuelles.

Les figures I.7 et I.10 représentent la variation des températures mensuelles maximum, minimum et moyenne exprimées en degré allant de 2017 jusqu'en 2020 de la région d'Adrar.

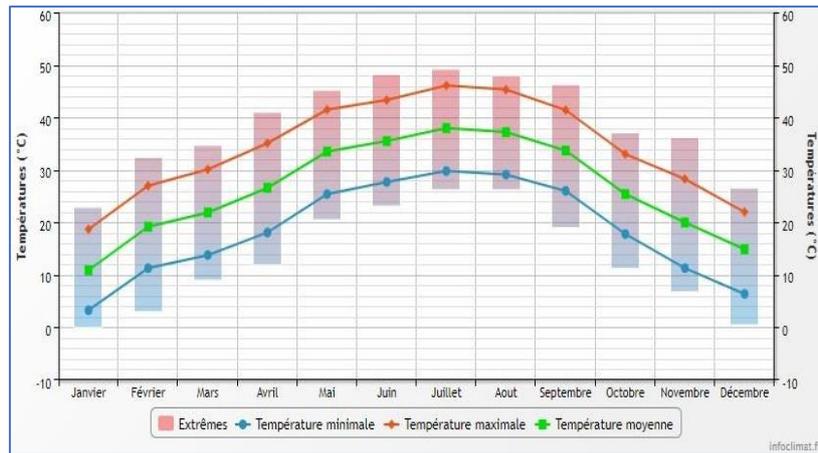


Figure I. 7 : la variation des températures mensuelles année 2017 [17].

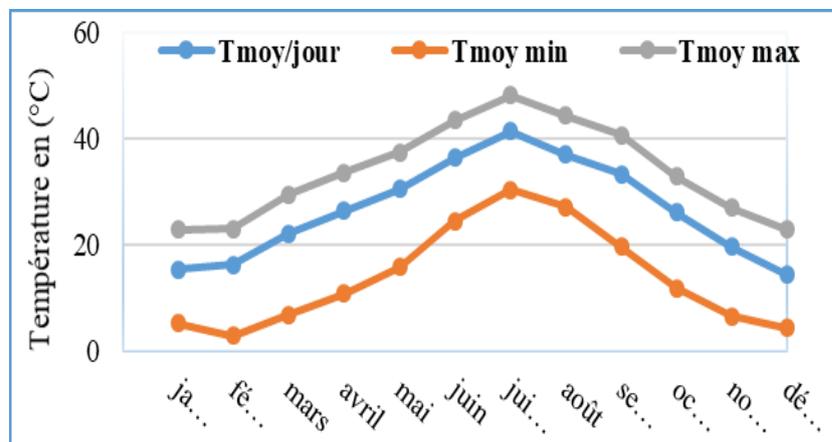


Figure I. 8 : la variation des températures mensuelles 2018 (URERMS) [15]

L'analyse de la figure 1.6 des températures moyennes mensuelles montre que le mois le plus chaud est le mois de Juillet avec une température moyenne de l'ordre de 41.39°C, alors que le mois le plus froid c'est le mois de Janvier avec une température moyenne de l'ordre de 15.40°C, la température moyenne mensuelle est de l'ordre de 25.8°C.

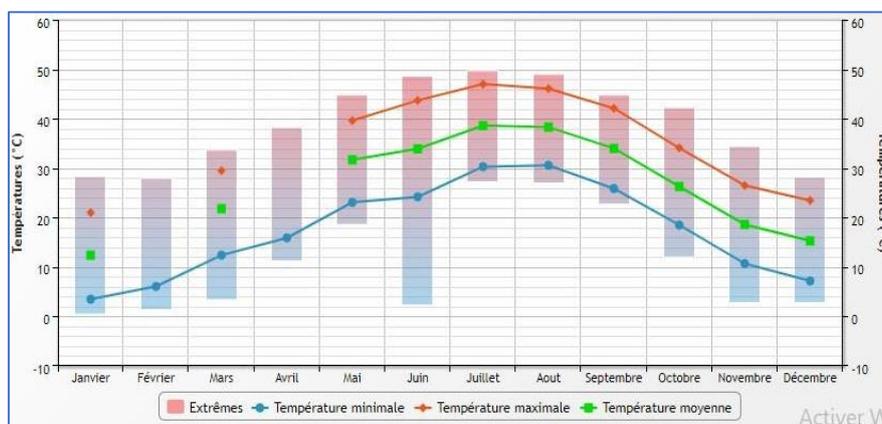


Figure I. 9 : la variation des températures mensuelle 2019 [17].

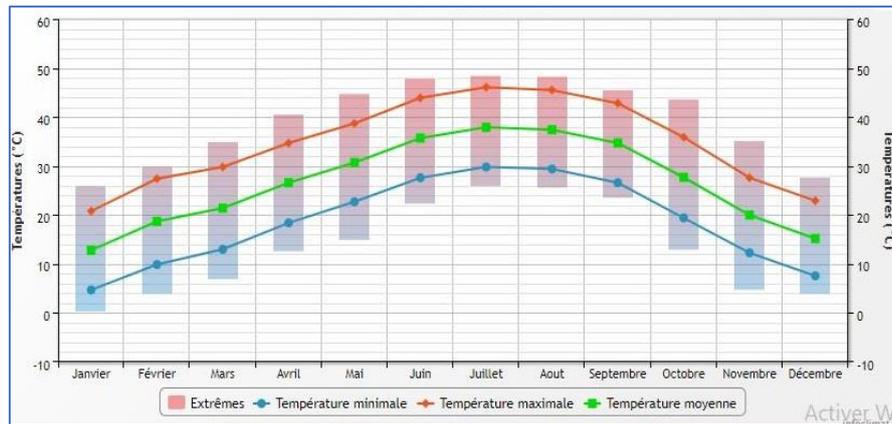


Figure I. 10 : la variation des températures mensuelle 2020 [17]

Des écarts de températures considérables ; la température maximale est de plus 45°C en Juin, Juillet et en Aout. En saison hivernale les températures sont souvent basses et peuvent atteindre 12°C à 7°C en Décembre et Janvier.

4.5.3 Variations des températures moyennes annuelles.

L'analyse des données de la température moyenne annuelle montre que l'année est presque identique.

Tableau I. 3: Température moyenne annuelle station Adrar (2011-2020) [15].

Année	Tmoy (°C)	T min (°C)	Tmax (°C)	Année	Tmoy (°C)	T min (°C)	Tmax (°C)
2011	15,4	7,7	23,3	2016	26.3	18.3	34.3
2012	15,24	8,3	22,95	2017	26.2	18.3	34.1
2013	21,13	12,4	29,6	2018	25.8	18	33.7
2014	25,42	17,6	33,56	2019	25.7	17.4	33.9
2015	28,55	20,6	37,39	2020	26.6	18.5	34.7

La température moyenne annuelle la plus haute est de de 28.55 °C année 2015 et le plus bas est de 15.24 de l'année 2012.

La figure I.12 et le tableau I.3 ci-dessous présentent la répartition des températures, moyenne minimale (T°C min), moyenne annuelle (T°C moy.), ainsi que la moyenne maximale (T°C max) pour une série de 10 ans d'observation.

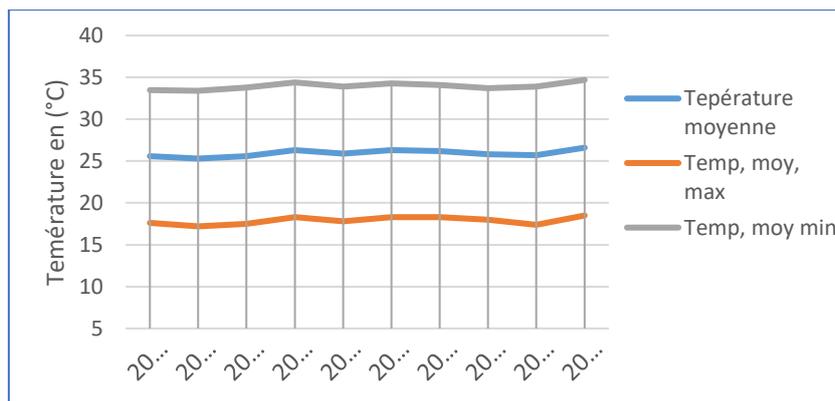


Figure I. 11: Variations des températures moyennes annuelles (2011-2020).

4.5.4 L'insolation

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2500 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'ensoleillement un paramètre climatique qui mesure la durée temporelle pendant laquelle un endroit est soumis à un rayonnement solaire suffisamment intense, c'est le contraire de la nébulosité, Le tableau I.4 ci-dessous montre les valeurs de l'insolation.

Tableau I. 4 : la moyenne mensuelle des irradiances journalières [15].

Mois	Direct	Diffus	Global	Mois	Direct	Diffus	Global
Janvier	6036,52	1133,03	4050,10	Juillet	4599,14	3596,76	7239,36
Février	6222,22	1548,24	5042,47	Août	4635,09	3272,95	6768,49
Mars	6805,51	2000,81	6276,99	Septembre	4716,83	2680,67	5932,60
Avril	5880,88	2963,07	7072,21	Octobre	6200,87	1702,75	5284,14
Mai	6662,76	2807,65	7754,43	Novembre	7151,35	1037,98	4585,13
Juin	6095,62	3271,54	7952,63	Décembre	8263,90	666,96	4399,90

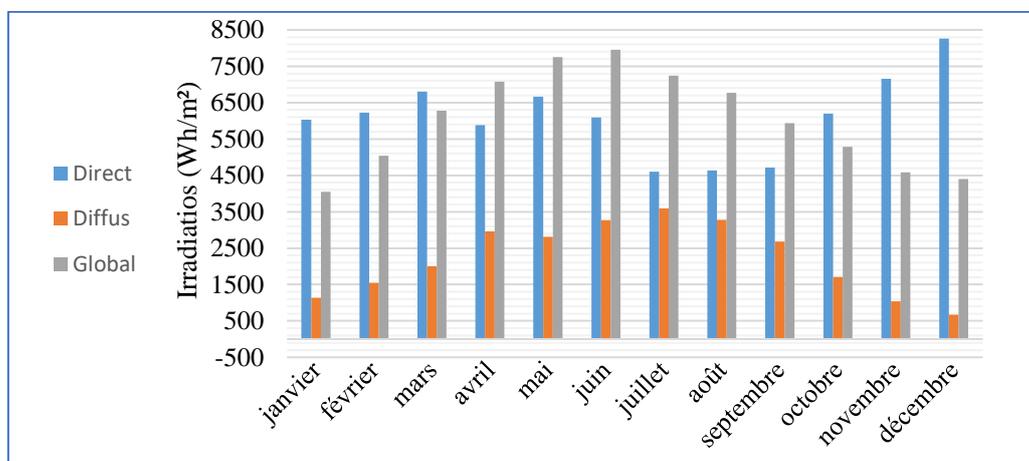


Figure I. 12: moyenne mensuelle des irradiances journalières année 2018.

Tableau I. 5: Données sur l'Insolation dans la station d'Adrar. [18]

Mois	jan	Fev	Mar	Avril	Mais	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Déc	Moy
Insolation/h	9,6	10	11,2	11,6	12	13,2	13	12,4	10,8	9,6	8,7	8,2	10,85

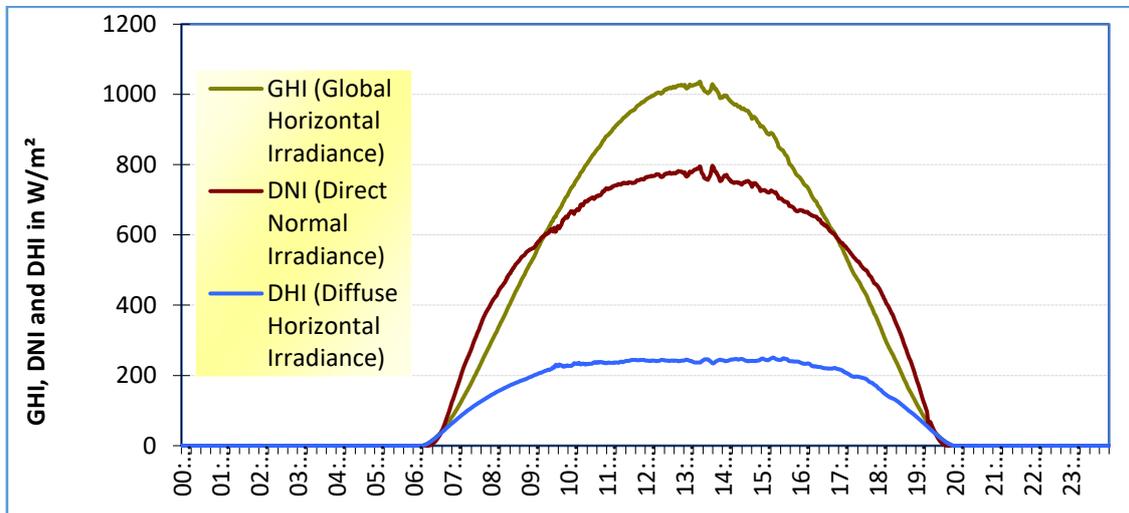


Figure I. 13 : donne les évolutions horaires des flux solaires global, direct et diffus incidents sur un plan horizontal dans la région d'Adrar 15/07/2013.[19]

Ces évolutions de la densité du flux solaire ont été mesurées durant la journée du 15 juin 2017, par une station radiométrique implantée dans l'Unité de Recherche des Énergies Renouvelables aux Milieux Sahariens (URER'MS) d'Adrar.

On constate que l'évolution horaire de la composante du flux solaire global incident sur le plan horizontal domine les évolutions horaires autres composantes du flux solaire telles que: la composante directe et la composante diffuse. Ainsi que nous avons remarqué que cette évolution est liée totalement avec l'orientation du plan et aussi la course du soleil dans la journée.

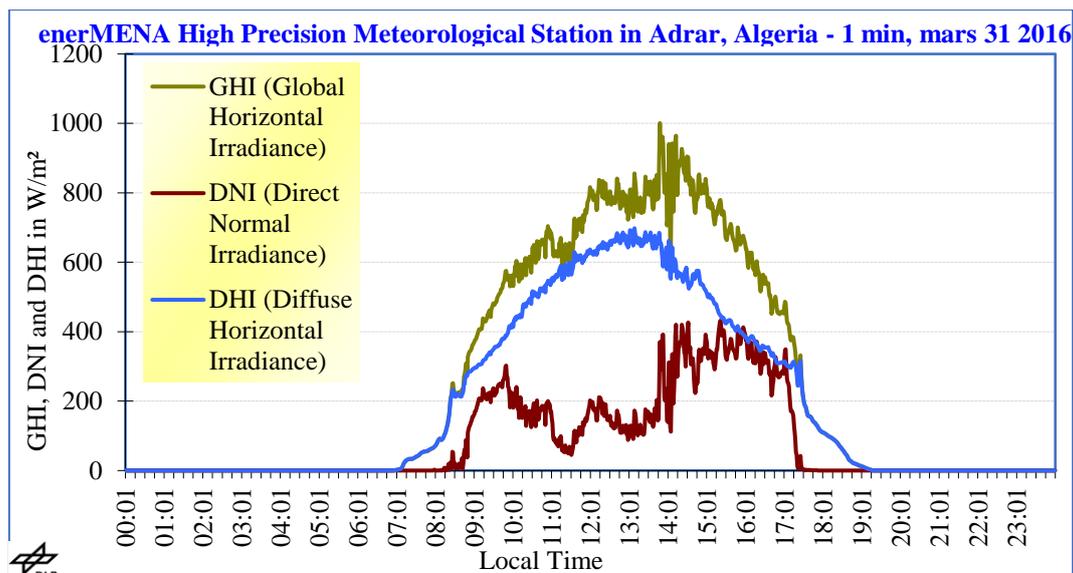


Figure I. 14 : Evolution horaire de la densité du flux solaire (Adrar/31-03-2016) [19].

4.5.5 Précipitations

La faiblesse de la pluviosité est le caractère fondamental des régions sahariennes, les figures I.12 a I.15 ci-dessous montre que les précipitations annuelles sont très faibles et ne dépassent guère les 50 mm/an dans toute la région d'Adrar et ces côtés saharien, dans notre région d'étude la précipitation est de l'ordre de 2-40 mm/an.

En montrant sur Les tableaux ci-dessous les différentes valeurs en mm de précipitation durant les 5 cinq années.

Tableau I. 6 : précipitation mensuelle à Adrar année 2017. [17]

2017	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Cumul
Cumul Précips	1		1		1				7			12	22.0
Max en 24h	1		1		1				7			6.0	7.0

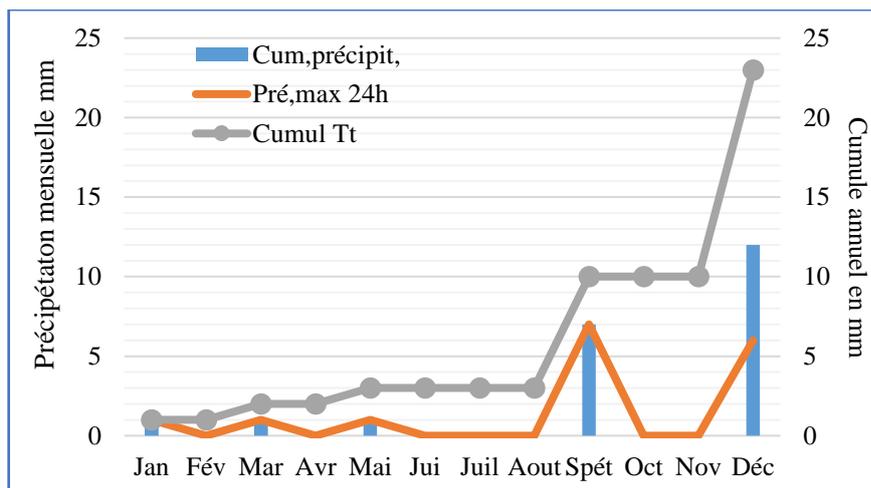


Figure I. 15 : précipitation mensuelle à Adrar année 2017.

Tableau I. 7: précipitation mensuelle à Adrar année 2018. [17]

2018	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Cumul
Cumul Précips	3				2			1	34		2		42.0
Max en 24h	2				2			1	13		2		13

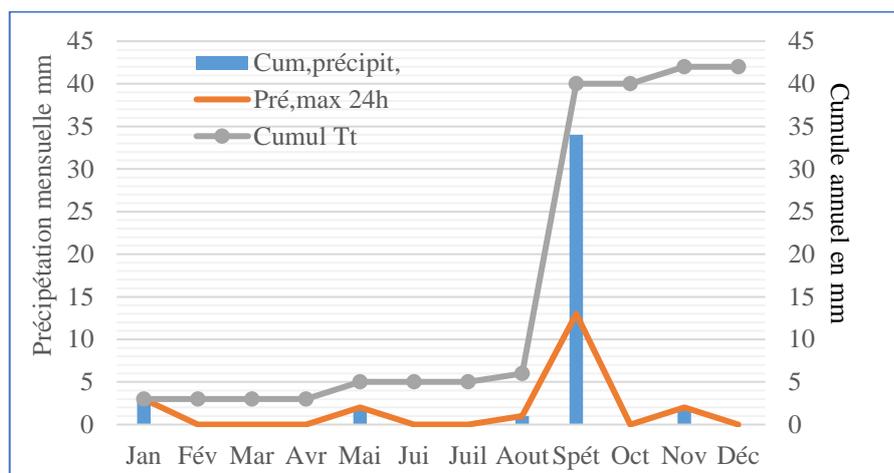


Figure I. 16: précipitation mensuelle à Adrar année 2018.

Tableau I. 8: précipitation mensuelle à Adrar année 2019. [17]

2019	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	Cumul
Cumul Précips	*	*	*	0.4	*	*	*	*	3	0.6	*	*	4
Max en 24h	*	*	*	0.4 Le 25	*	*	*	*	3	0.4	*	*	3 Le 5

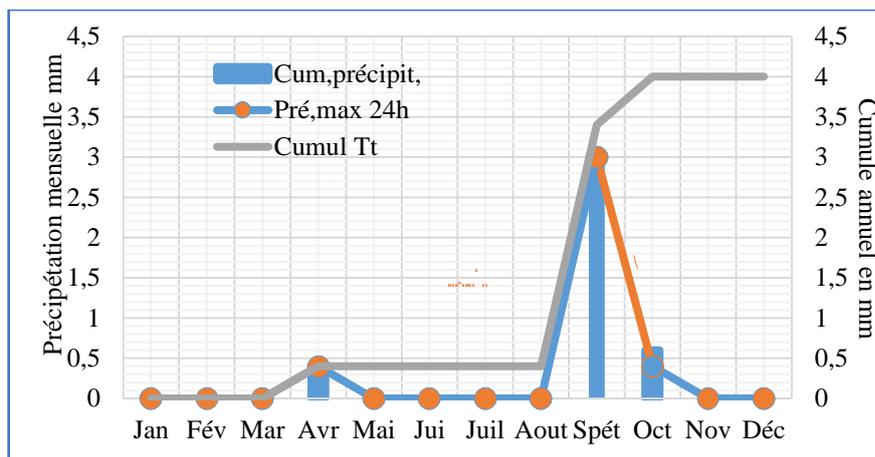


Figure I. 17: Précipitation mensuelle à Adrar année 2019.

Tableau I. 9 : Précipitation mensuelle à Adrar année 2020 [17].

2020	01	02	03	04	05	06	07	.	.	10	11	12	Cumul
Cumul Précips	*	*	1	16.4	3	*	*	.	.	*	*	*	20.4
Max en 24h	*	*	1 le 28	16 Le 19	3 Le 28		*	.	.	*	*	*	16 Le 19

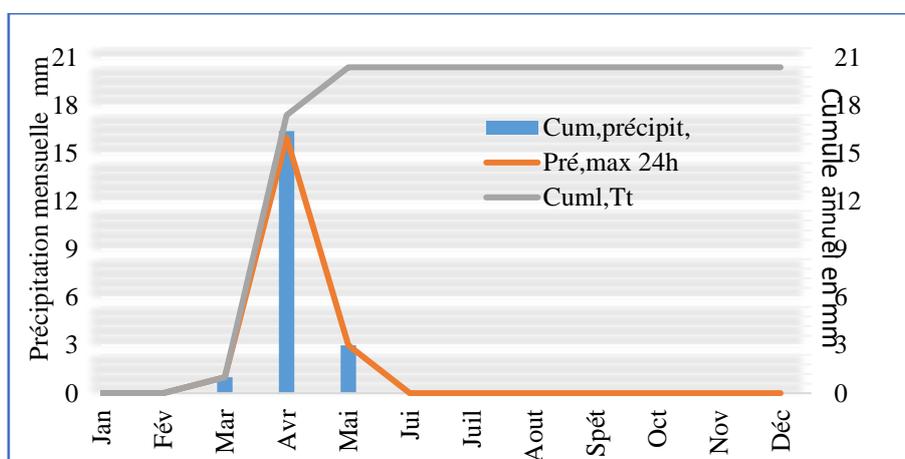


Figure I. 18 : précipitation mensuelle à Adrar année 2020.

4.5.5.1 Variations interannuelles des précipitations.

La variabilité interannuelle des précipitations peut indiquer les périodes sèches ou humides dans une décennie. La figure I.19 montre la différence de quantité de pluie au cours de la période entre 2010 et 2020. En général, la sécheresse est un trait caractéristique les zones désertiques, car la quantité maximale ne dépasse pas 40 mètres.

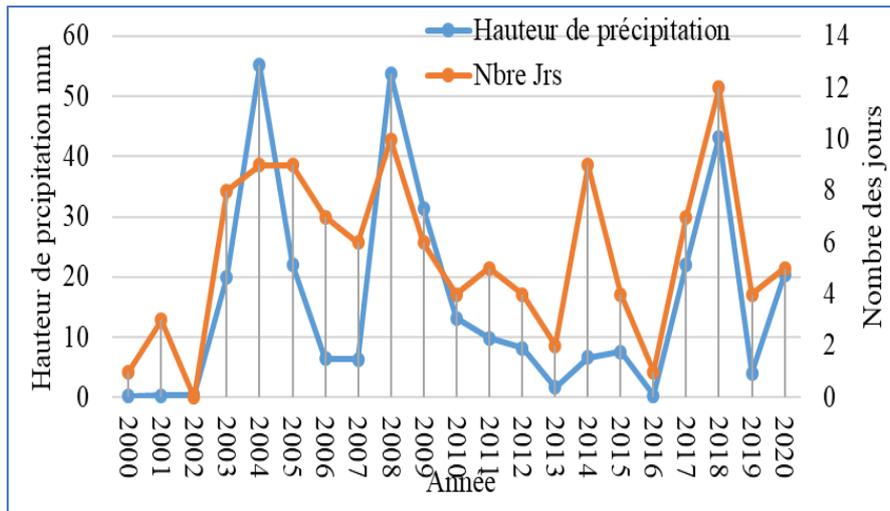


Figure I. 19: Variation interannuelle des précipitations (2000-2020).

4.5.5.2 Variations moyennes mensuelles des précipitations

La figure 1.20 montre les variations moyennes mensuelles des précipitations sur une période de 20 ans, le mois de Novembre est le mois le plus arrosé avec 0.6 mm de précipitation et le mois d’Août comme le mois le plus sec avec 0.1mm. La moyenne mensuelle est de l’ordre de 1.15 mm/mois.

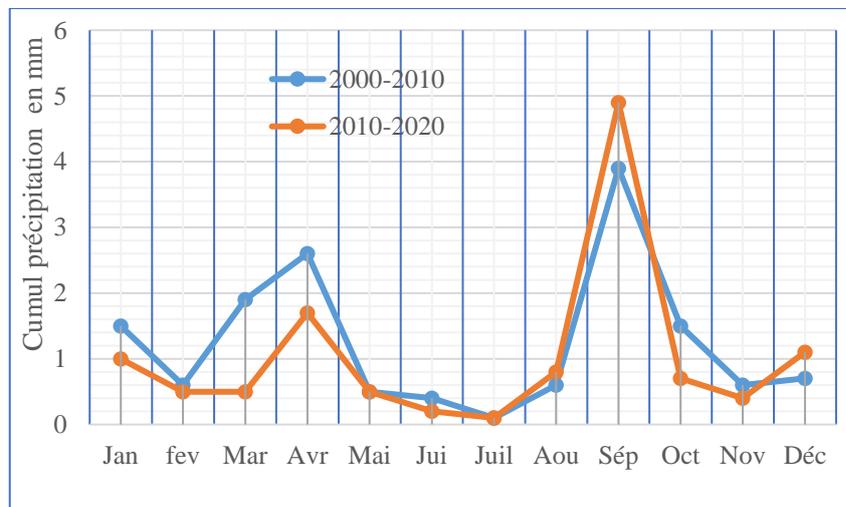


Figure I. 20: Variation mensuelle des précipitations

4.5.5.3 Diagramme Ombrothermique de GAUSSEN

Le diagramme Ombrothermique (Figure 2.6) de Gausсен permet de calculer la durée de la saison sèche. Dans notre cas, la courbe des précipitations passe largement au-dessous de la courbe des températures, cette allure permet de constater que la période sèche s’étale sur toute l’année.

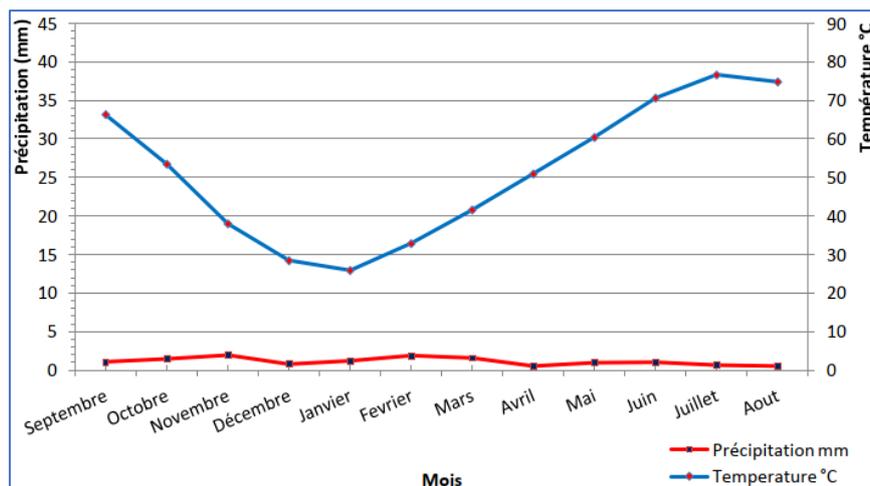


Figure I. 21: Diagramme Ombrothermique pour la période (1991-2010).

4.5.6 Le Vent

Le vent est un des éléments les plus caractéristiques de la région d'Adrar, on note que les vents sont très fréquents durant toute l'année, c'est durant la saison du printemps (Mars - Avril) que se manifestent violemment les tempêtes de sable, des vitesses supérieures à 20 m/s (72km/h) sont observées dans la région, en été, les vents sont chauds et secs (sirocco) avec une direction dominante des vents NE en hiver et SW en été (Tableau I.10).

Tableau I. 10 : Données sur la vitesse des vents. Station d'Adrar.

Mois	Vent en Degré	Vent m/s	Mois	Vent en Degré	Vent m/s
Janvier	96,84	2,51	Juillet	110,82	3,89
Février	117,47	2,80	Août	116,19	3,31
Mars	123,43	3,15	Septembre	115,87	2,91
Avril	144,66	3,28	Octobre	81,15	3,37
Mai	166,24	3,40	Novembre	108,45	2,47
Juin	117,61	3,23	Décembre	89,12	3,31

Les figure I.22 et I.23 au-dessous représente la distribution des fréquences des vitesses moyennes mesurées pour une journée donnée en termes de pourcentage pour le site d'Adrar. L'analyse de ces courbes montre que le site d'Adrar dispose d'un potentiel énergétique éolien important et qui est plus favorable à l'exploitation de ce type d'énergie pour la production d'électricité. La vitesse moyenne atteinte est de 5 à 6 m/s au mois de juillet [20].

La distribution horaire des vitesses du vent représente un indicateur pour le potentiel éolien. Sa connaissance permet l'estimation de l'énergie éolienne disponible sur le site.

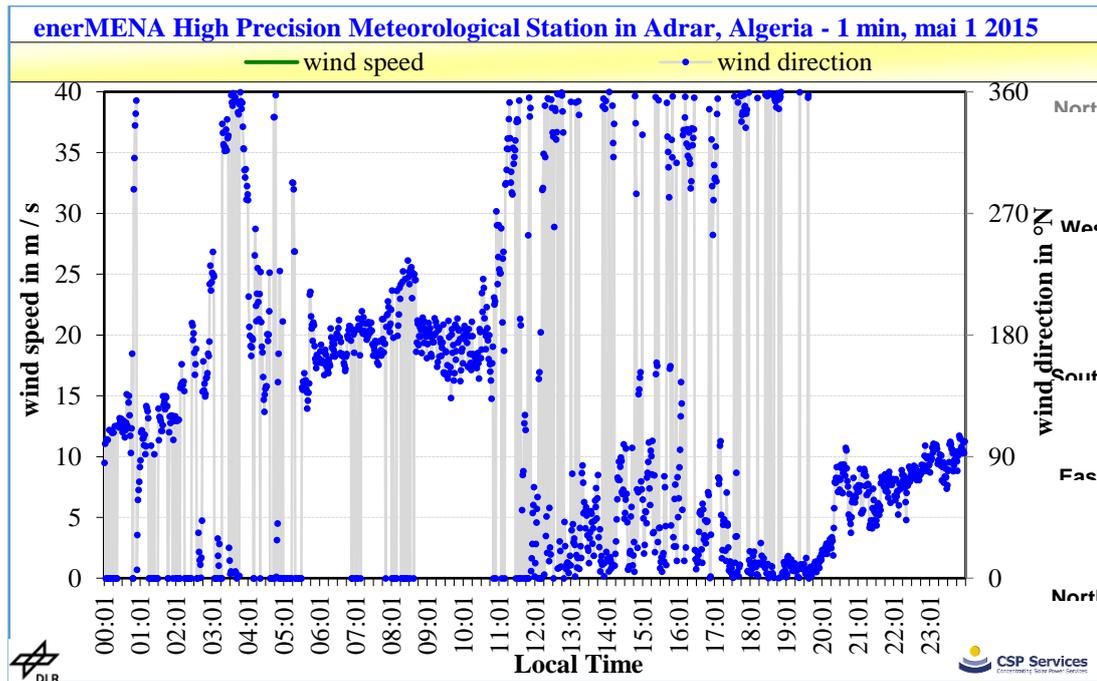


Figure I. 22: Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/01-05-2015) [17]

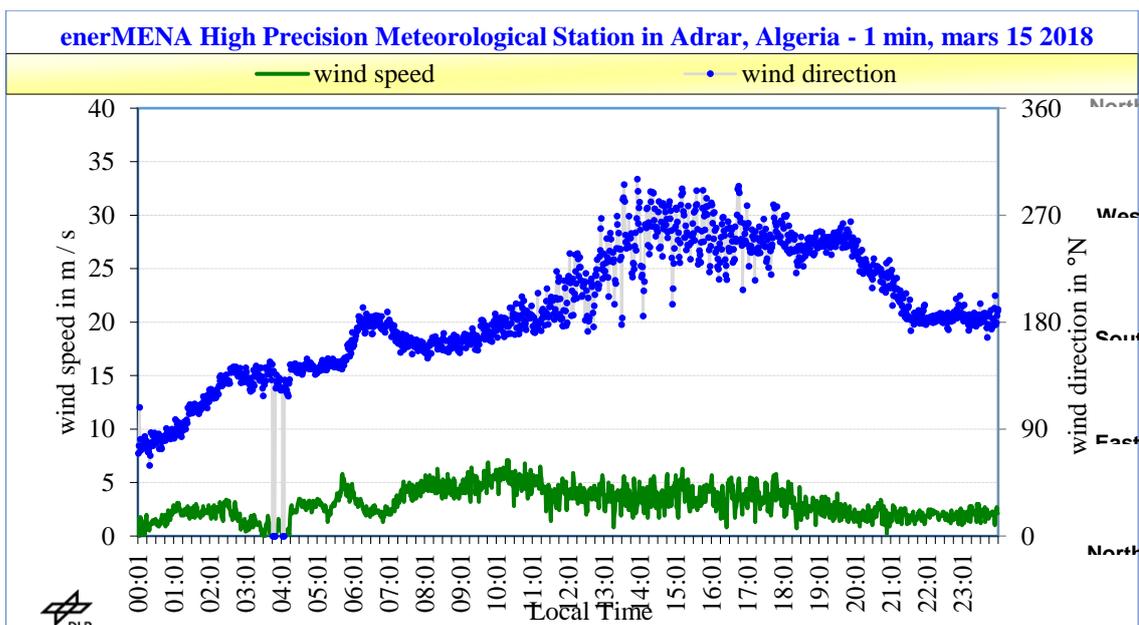


Figure I. 23: Evolution horaire de la vitesse moyenne du vent (Adrar/15-03-2018).

4.5.7 Humidité relative de l'air :

La répartition des résultats de l'humidité est l'inverse de la répartition des résultats de la température. La valeur maximale de l'humidité de l'air est obtenue en hiver (Décembre-Janvier) et la valeur minimale en été (Juin-Juillet) tel que présenté dans la Figure 2.7, l'humidité relative est faible elle est inférieure à 40%.

Tableau I. II: Données sur la vitesse des humidité dans la station d'Adrar.

Mois	Humidité	Mois	Humidité
Janvier	33,31	Juillet	11,79
Février	22,56	Août	11,57
Mars	21,31	Septembre	17,26
Avril	16,23	Octobre	24,95
Mai	14,07	Novembre	22,77
Juin	14,08	Décembre	29,85

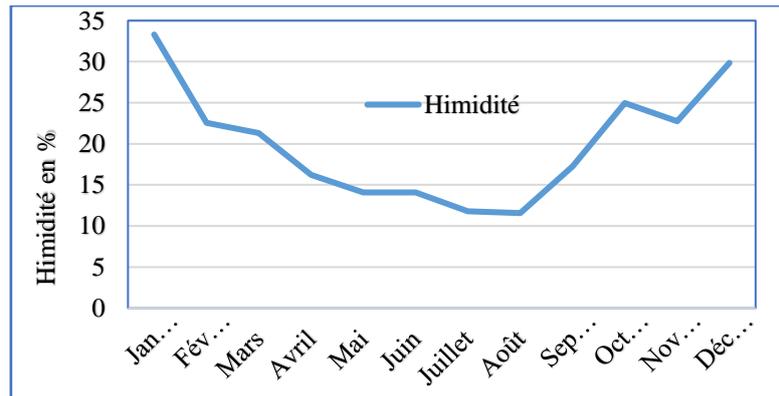


Figure I. 24: Humidité relative au 2018 URER/MS Adrar.

La figure I.24 représente l'évolution horaire de la température moyenne de l'ambiance extérieure et l'humidité relative pour une journée typique dans le mois de juillet. On constate que, la température de l'ambiance extérieure entre 15h00 à 16h00 est visiblement plus grande que celle des périodes avant midi et même à midi-pile et surtout plus grande par rapport à la période nocturne.

Cette différence est due à l'effet de la course du soleil durant une journée dans la saison d'été qui peut atteindre 48 °C vers 15h30. En effet, on remarque une légère présence d'humidité durant toute la journée presque nulle à partir de 07h00 du matin.

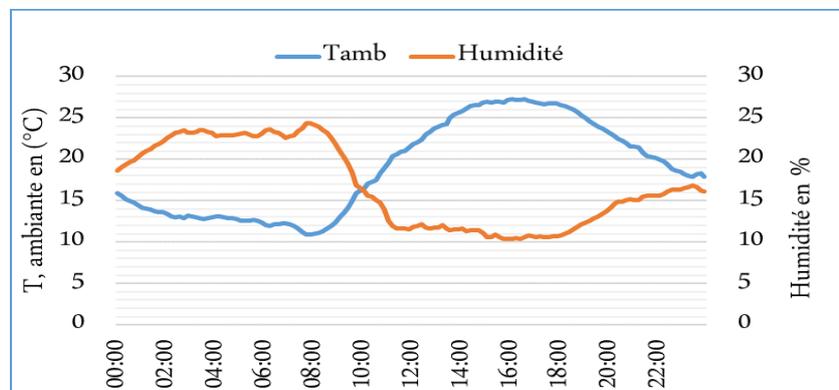


Figure I. 25: Evolution horaire de la température ambiante et l'humidité relative (Adrar/31-01-2019) [19]

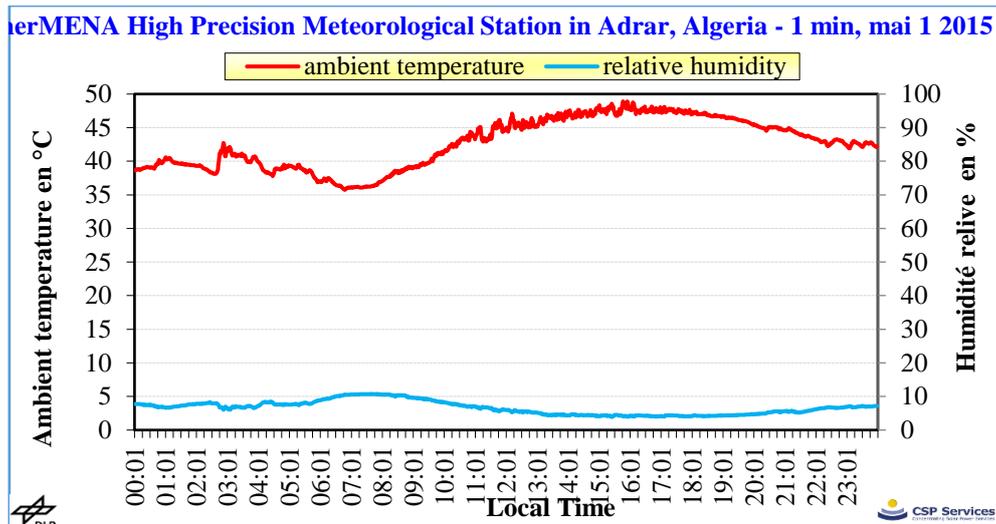


Figure I. 26: Evolution horaire de la température ambiante et l'humidité relative (Adrar/01-05-2015) [19].

4.5.8 Evaporation

L'évaporation est un phénomène physique qui augmente avec la température, la sécheresse de l'air et le vent. Elle est forte pendant toute l'année dans la région saharienne. L'intensité de l'évaporation est fortement renforcée surtout en été où soufflent les vents chauds. Elle est moins importante dans les palmeraies, à cause de l'effet d'ombre, que dans les autres parties nues du Sahara où elle est fortement ressentie.

5 Outils de mesures des données climatiques

Les données climatologiques de la distribution de la densité du flux solaire (Fig. I.18), de la température moyenne et de l'humidité relative (Fig. I.19) ainsi que de la vitesse horaire moyenne du vent (Fig. I.20) dans la région d'Adrar ont été mesurées à l'aide de la station radiométrique implémentée dans l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien "URER'MS" d'Adrar [15].

Cette station de mesure radiométrique autonome est réalisée par l'équipe du gisement solaire de l'URER/MS afin d'exploiter cette ressource énergétique et créer leurs propres bases des données pour les besoins des différents études expérimentales et théoriques de chercheurs au niveau de l'unité et caractériser le site d'Adrar du point de vue gisement solaire.

Cependant, cette station radiométrique de haute précision a été installée à l'Unité de Recherches en Energies Renouvelables d'Adrar, celle-ci utilise un système de poursuite tridimensionnel (Sun-racker), comporte deux parties : Une partie fixe qui est constituée d'un

pyranomètre type EKO, pour la mesure du rayonnement global reçu sur un plan horizontal, d'un thermo-hygromètre type TECNOEL pour la mesure de la température et de l'humidité, et d'un solarimètre.

Une partie mobile, qui est capable de suivre la trajectoire du soleil depuis le coucher jusqu'au lever, grâce à un système robotique. Cette partie est pourvue d'un pyréliomètre qui est pointé vers le disque solaire, pour la mesure du rayonnement solaire direct intégré sur toutes les longueurs d'ondes (entre 0,2 et 0,4 micromètre) reçues sur un plan normal, et d'un pyranomètre type EKO pour la mesure de l'éclairement diffus sur un plan horizontal muni d'une boule sphérique pour cacher le flux radiatif venant directement du disque solaire. La somme de ces deux mesures (diffus + direct), donne le rayonnement global.

Ces données sont ainsi analysées et exploitées dans le but de les utiliser dans beaucoup d'applications énergétiques notamment pour les systèmes à conversion thermique et photovoltaïque.

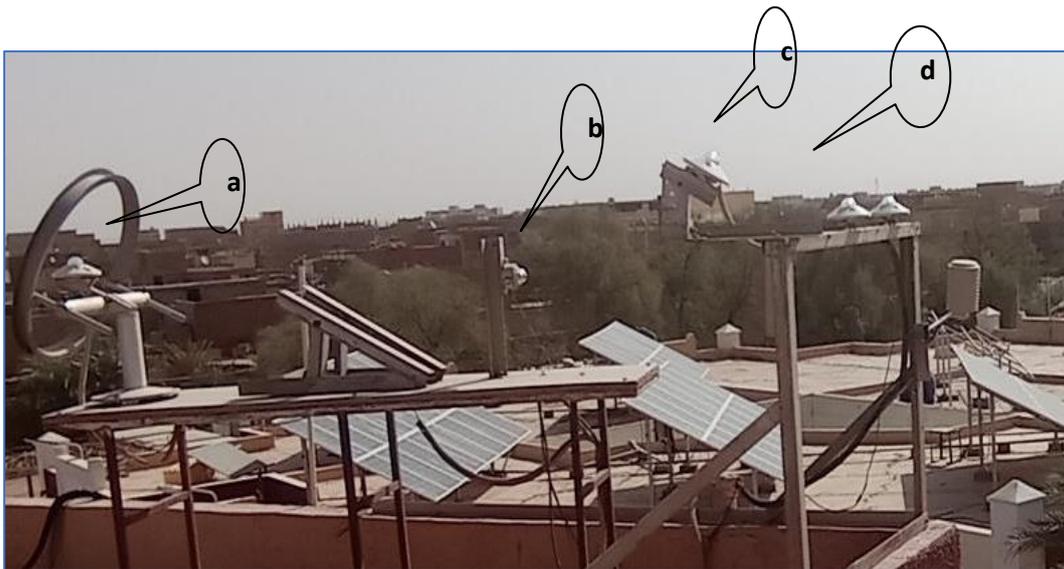


Figure I. 27: Présente une photo illustrative de cette station radiométrique d'URERMS d'Adrar.

: (a) mesure le rayonnement diffus ; (b) mesure le rayonnement global plans vertical, (c) mesure le rayonnement avec une inclinaison variable ; (d) mesure le rayonnement global plans horizontal.



Figure I. 28 : Photo de la Station Météorologique de EnerMENA installé au l'URER 'MS d'Adrar

- (1) pyrhéliomètre pour mesurer le rayonnement direct normal.
- (2) Système de suivi solaire à deux axes.
- (3) Pyranomètre pour mesurer le rayonnement global.
- (4) pyranomètre pour mesurer le rayonnement diffus.
- (5) Boule employée pour cacher d'une manière permanente le pyranomètre (4).
- (6) anémomètre pour mesurer de vent ;
- (7) capteur pour mesurer simultanée de la température et de la pression ;
- (8) girouette pour donner la direction du vent ;
- (9) sonde pour mesurer l'humidité.

6 Conclusion

L'Algérie possède un gisement solaire non négligeable, elle est classée parmi les zones privilégiées pour les applications des systèmes solaires. Les régions sahariennes s'étendent sur près de deux millions de kilomètres carrés au sud de l'Atlas Saharien. Elles sont caractérisées par un climat contrasté avec une saison chaude et sèche, des amplitudes thermiques importantes, des vents fréquents et intenses. La pluviométrie est pratiquement très faible.

Le présent chapitre est consacré à la connaissance de l'évaluation du potentiel énergétique solaire à travers l'Algérie et particulièrement dans la région d'Adrar.

Des tableaux et figures présentent les différents résultats des calculs empiriques et semi empiriques pour estimer le rayonnement solaire global, diffus sur un plan horizontal et incliné. De plus, des données météorologiques et radiométriques rassemblées des stations de mesure implémentées dans le site de l'URERMS d'Adrar ont été également présentées à la fin de ce chapitre. Ces données concernent l'heure de lever et coucher du soleil, la densité du flux, la vitesse du vent, les composantes du rayonnement direct, diffus et global.

Le climat saharien est caractérisé par :

- Une pluviométrie de 20 à 150 mm/an avec une répartition très irrégulière, parfois torrentielle.
- Des températures diurnes très élevées en été, notamment à Adrar, In Salah et Ouargla et des températures basses en hiver (gelées durant les mois de décembre à mi-février).
- Un régime de vent orienté de Nord-Ouest en hiver à Sud-Ouest en été, occasionnant des tempêtes de sable au centre Sahara avec déplacement de dunes entières.

En termes de terrain, des terrains plats et un style de construction traditionnel, dont la majorité sont des habitations individuelles, facilitent le processus d'intégration dans les bâtiments.

7 Bibliographie :

- [1] Bouchuicha Kada, modélisation multi spectrale des images satellitaires – Application, Quantification du bilan d'énergie Sol-Atmosphère, Thèse doctorat USTO 2017.
- [2] Site internet <https://www.encyclopedie-energie.org/energie-solaire>
- [3] Site internet <https://globalsolaratlas.info>
- [4] Cherifi Sara, Haddad Mohamed, l'énergie solaire un moteur du développement durable en Algérie, Les Cahiers du Cread, vol. 35 - n° 03 – 2019.
- [5] Ministère de l'Énergie : <http://www.energy.gov.dz>
- [6] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/6837/1/Analyse-des-pertes-thermiques.pdf>
- [7] Boudghene Stambouli, A. Algerian renewable energy assessment, The challenge of sustainability, Energy Policy. 39, 4507–4519- 2011
- [8] https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_d%27Adrar#R%C3%A9gions_de_la_wilaya.
- [9] <https://content.meteoblue.com/fr/meteoscool/zones-climatiques-generales>
- [10] Benlatreche Toufik « Effets thermo-radiatifs et caractérisation microclimatique des cours intérieures dans les édifices publics » Thèse magistère Université de Constantine 2006.
- [11] Compendium National sur les Statistiques de l'Environnement/ Office National des Statistiques ALGER – 2006.
- [12] Baouali. R et al, L'apport des énergies renouvelables au développement du tourisme durable en Algérie.
- [13] <https://www.assistancescolaire.com/enseignant/college/ressources/base-documentaire-en-geographie/les-zones-climatiques-a-la-surface-du-globe-6sce0502>.
- [14] Kherbouche Yasmina « Eude de quelque aspect bioécologique de la sauterelle pèlerine schistocercagregaria forskal (1775), INA El-Harrach-Alger 2007
- [15] Aiche Mohamed Ridha, Bouhanik Abdellah, « Atlas solaire algérien » CDER
- [16] Banc des données interne, station radiométrique d'URER/MS
- [17] <https://www.infoclimat.fr/climatologie/annee/2020/adrar/valeurs/60620.html>
- [18] <https://www.wofrance.fr/weather/maps/city?LANG=fr&PLZ=&PLZN=&WMO=60620&CONT=afri&R=160&LEVEL=162®ION=0011&LAND=AL&MOD=tab&ART=TMN&NOREGION=1&FMM=1&FYY=2015&LMM=12&LYY=2020>
- [19] Station Météorologique de EnerMENA URER/MS Adrar, 2018.
- [20] Ouadrane Abdellatif, Contribution à la modélisation et au développement des systèmes de chauffage solaire à usage individuel. Thèse doctorat, USTO Mars 2018.

Chapitre II.



Généralité sur le Chauffe-eau solaire, état de l'art

1 Introduction

Les besoins énergétiques ne cessent de croître dans notre pays, malgré son potentiel énorme en gisement solaire, ou l'utilisation ne représente qu'une partie négligeable de la consommation d'énergie journalière. Pourtant, l'exploitation du rayonnement solaire reste compétitive par rapport aux autres sources d'énergie fossiles. Les énergies renouvelables en général, l'énergie solaire en particulier représentent une des sources les plus prometteuses pour répondre aux besoins énergétiques mondiaux.

Ses applications sont nombreuses et variées à savoir, la production de l'électricité, le chauffage des habitations, des piscines, des serres, la production d'eau chaude sanitaire, la distillation de l'eau, la cuisson, ...etc.

Le solaire thermique à basse température est aujourd'hui dans une phase de croissance accélérée. Les technologies solaires peuvent fournir l'énergie pour toutes les régions enclavées; les besoins en matière d'eau chaude, climatisation, et électricité - sans les effets néfastes des émissions de gaz à effet de serre créées par les combustibles fossiles.

Plusieurs millions de chauffe-eau solaires sont en service. Ils existent en effet par des millions au Japon, au U.S.A, par des dizaines de milliers en France et rares sont les pays où sont totalement inconnus [1]. En Europe, l'Allemagne, la Grèce et l'Autriche se détachent nettement du reste des autres nations [2].

Chez nous le chauffe-eau solaire reste très peu utilisé. Ceci est particulièrement dû au fait que l'énergie conventionnelle (électricité et gaz) est abondante et bon marché alors que le chauffe-eau solaire, tel que développé ailleurs, reste très cher et inadapté aux conditions des régions sahariennes. Pour favoriser l'émergence de l'utilisation de l'énergie solaire et ces applications tel que le chauffage solaire, un changement de paradigme est nécessaire tant au niveau individuel que familial, et national.

2 État de l'art des chauffe-eaux solaire :

L'énergie solaire thermique a été utilisée pendant des siècles par les peuples anciens qui exploitent l'énergie solaire pour le chauffage et le séchage.

Il est important d'explorer l'évolution des chauffe-eau solaires historiquement depuis leur apparition, d'avoir une idée sur les différentes classifications de ces systèmes dans les œuvres de littérature ainsi que d'étudier leur production dans le marché mondial, algérien et local.

Les chauffe-eau solaires CES constituent une technologie solaire très répandue et assez prometteuse en même temps [3].

Le premier chauffe-eau solaire a été breveté en 1891 par Mr. Clarence Kemp dans un but commercial. Il fonctionne selon un principe « effet de serre » : l'exposition des pièces métalliques au soleil permet de capter et de stocker la chaleur. L'eau est contenue dans plusieurs tubes de fer à section elliptique, afin de maximiser la surface exposée au soleil.



Figure II. 1: Photo représentant Le premier CES breveté en 1891 [4]

En 1953, **SW Hart and Co.**, une entreprise de plomberie, Après une longue expérience dans l'installation et la recherche, a décidé que le soleil était la meilleure source d'énergie pour chauffer l'eau dans les maisons de l'Ouest de l'Australie. [5]



Figure II. 2: Fabrication du premier chauffe-eau solaire 1953.

Un prototype de chauffe-eau solaire du type capteur-stockeur où les fonctions de captation et de stockage sont assurées par un même élément. Par rapport aux chauffe-eau

solaires indirects, où la cuve de stockage représente une grande partie du prix de revient du système [6].

De nombreuses études ont été menées sur la possibilité d'exploiter de façon judicieuse les sources d'énergie renouvelables notamment le gisement solaire pour le chauffage de l'eau domestique. Ces études ont montré que l'utilisation accrue des énergies renouvelables peut réduire tout un éventail de problèmes écologiques tels que la pollution de l'air, les déchets solides et la pollution de l'eau [3].

Plusieurs formes de configuration du chauffe-eau solaire sont inventées dans le sens de multiplier le choix et la variation de gamme de température pour l'utilisateur. Deux types de capteurs solaires thermiques domestiques sont bien adaptés pour les habitats individuels. Il s'agit du capteur plans (échelle ; stockeur) figure II.4 et II.5 et du capteur à tubes sous vide figure II.5. Leur implantation ne pose pas une très grande difficulté ou des encombrants gênants surtout dans les régions sahariennes dont la majorité des habitats dotés d'une terrasse indépendante, ou un espace libre dans ces localités individuelles.



Figure II. 3 : Configuration d'un chauffe-eau solaire cuve séparer



Figure II. 4 : Configuration d'un chauffe-eau solaire (Autostockeur)

La figure (II.4) représente le schéma de principe d'un auto-stockeur à cuve rectangulaire. Dans ce cas, l'absorbeur correspond à la face supérieure de la cuve. La couverture permet de réduire les pertes thermiques par rayonnement (principe de l'effet de serre). A l'arrière du stockage et sur les côtés, se trouve l'isolant.



Figure II. 5: Configuration du collecteur à tubes évacués

Le capteur solaire à tube sous vide se compose d'un ensemble de tubes cylindriques. Les tubes sont constitués d'un absorbeur sélectif, dans un siège réfléchissant et entouré d'un cylindre de verre transparent.

Plusieurs chercheurs proposent des CSIS avec ce type de stockage :

A titre d'exemple (Harmim et al 2018) ont proposé un chauffe-eau solaire stockeur doté d'un réflecteur à des lamelles pivotables pour aérer l'intérieur de maison. [7]



Figure II. 6: Le chauffe-eau solaire stockeur intégré à l'habitat.

L'entreprise américaine « Harpiris Energy » [8] fabrique le modèle auto-stockeur « Sun Cache » est un chauffe-eau solaire certifié et commercialisé parmi d'autre aux Etats-Unis.

Les systèmes solaires thermiques pour la production d'eau chaude sont obligatoires dans les nouveaux bâtiments selon les ordonnances solaires en Espagne [4], au Portugal, en Italie, en Grèce et dans d'autres pays européens [5].

Les systèmes combinant la production d'eau chaude sanitaire (ECS) et les systèmes de chauffage des locaux sont bien adaptés aux latitudes moyennes et élevées, en raison d'un rayonnement solaire nettement plus élevé pendant la période de transition autour de l'hiver (septembre-octobre et mars-mai) et de la demande de chauffage importante en ces latitudes à cette époque [11].

Les installations avec de grandes surfaces de capteurs solaires et une capacité de stockage de chaleur de petite taille peuvent couvrir environ 50% de la demande totale de chaleur. Ce pourcentage peut être plus élevé dans certains cas de grandes capacités de stockage et d'économies d'énergie primaire pouvant atteindre 80% [12].

La chaleur produite par les collecteurs peut être stockée dans des stockages d'énergie thermique afin de fournir de l'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux.

Avec la demande croissante d'énergie dans les villes, et les campagnes, et en accord avec le modèle urbain dans nos déserts, qui a adopté des matériaux argileux et végétaux dans la construction, il est nécessaire de fournir des dispositifs solaires adaptés à l'environnement et en même temps sont abordables à acquérir. De nombreux chercheurs ont eu recours à suggérer des dispositifs solaires sociables à obtenir pour améliorer les modes de vie dans ces zones isolées.

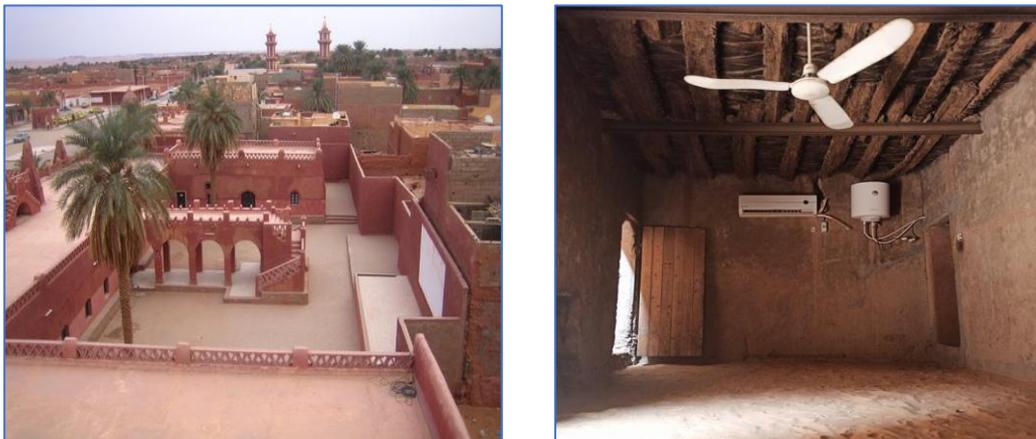


Figure II. 7: Photo représentant une vue réelle d'une maison (région Adrar)

Dans le figure II. 7, on voit qu'avec la présence de l'électricité, des moyens modernes ont été utilisés pour améliorer la condition de vie. OÙ le désigne de la maison permet également dans une large mesure l'installation de systèmes de chauffage solaire, en particulier les plus simples en raison de l'abondance d'espace.

Plus récemment, dans une grande variété de procédés thermiques, l'énergie solaire a été développée pour la production d'électricité, le chauffage de l'eau, le séchage des récoltes et la purification de l'eau, entre autres. Compte tenu de la gamme de températures de fonctionnement des procédés solaires thermiques, les applications les plus importantes sont :

2.1 Pour Températures moins de 100°C :

Chauffage de l'eau à usage domestique et piscines, chauffage des bâtiments et systèmes d'évaporation tels que distillation et séchoirs ;

2.2 Pour moins de 150°C :

Climatisation, refroidissement et chauffage d'eau, d'huile ou d'air pour l'industrie utilisation ;

2.3 Pour des températures comprises entre 200 et 2000°C :

Génération d'énergie électrique et mécanique ;

2.4 Pour moins de 5000°C :

Fours solaires pour le traitement des matériaux.

Pour les procédés où plus de 100°C sont requis, le flux d'énergie solaire n'est pas suffisant pour élever la température du fluide de travail à un niveau aussi élevé ; à la place, un certain type de concentration du flux d'énergie à l'aide de miroirs ou de lentilles doit être utilisé.

3 Classification des chauffe-eaux solaires.

Le système le plus courant utilisé à l'échelle individuel au collectif pour récupérer l'énergie solaire est appelé panneau solaire, ou capteur solaire. On distingue trois grandes familles :

- Le capteur plan
- Le capteur sous-vide
- Le capteur à concentration

3.1 Le capteur plan

C'est le système le plus ancien et aujourd'hui encore le plus économique. Parmi les capteurs plans, une distinction peut être faite entre les capteurs avec et sans vitrage.

3.1.1 Le capteur non-vitré

Un capteur solaire sans vitrage est composé d'un tube en plastique noir laissant passer un fluide caloporteur. Le tube absorbe une partie du rayonnement solaire incident qui est ensuite transmis au fluide par conduction. Il est principalement utilisé pour des opérations annexes telles que le chauffage de piscines. [13]



Figure II. 8: Capteur solaire sans vitrage.

3.1.2 Le capteur vitré

Un capteur vitré se compose d'une surface transparente, d'un absorbeur, et d'un isolant thermique (Fig. II.8). Le capteur vitré a permis de réduire de manière importante les pertes thermiques par convection et par rayonnement infrarouge. L'absorbeur doit permettre d'absorber au maximum l'énergie solaire et émettre le moins possible dans l'infrarouge.



Figure II. 9: configuration des chauffe-eau capteur + cuve.

3.1.3 Le capteur sous-vide

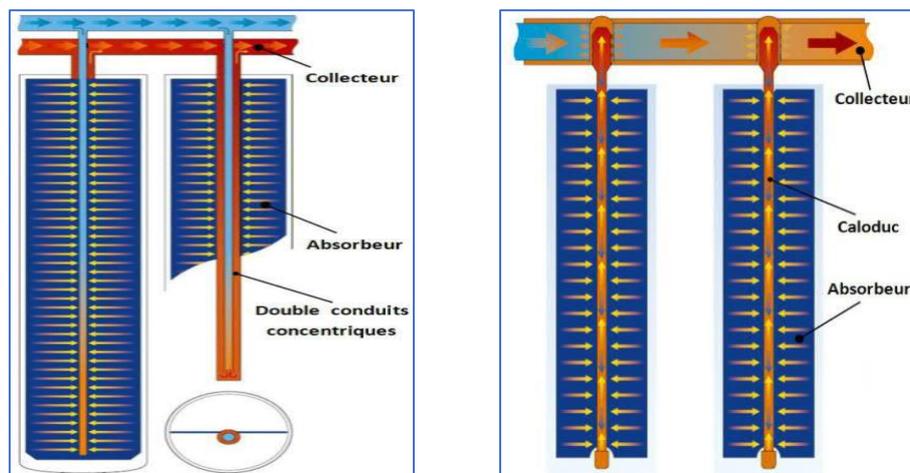
À la différence du capteur plan, le capteur sous-vide réduit les déperditions au niveau de l'absorbeur en remplaçant l'air par du vide supprimant les échanges convectifs. On distingue quatre types :

- Le capteur à circulation directe ;
- Le capteur à caloduc ;
- Le capteur à effet « Thermos » ;
- Le capteur à réflecteur intégré.

Pour le capteur à circulation directe, l'absorbeur est une structure plane à ailettes et la circulation de l'eau est assurée par un système de tubes en U. L'absorbeur de chaque tube est contrairement aux autres modèles, orientable, ce qui permet de les utiliser en façade. Le capteur à caloduc utilise le principe de la vaporisation de l'eau déminéralisée. L'eau en se vaporisant remonte jusqu'à la tête du caloduc et s'y condense au contact du fluide caloporteur.

Le capteur à effet « Thermos » est lui composé de deux tubes concentriques, le tube intérieur étant l'absorbeur. [13]

Le vide est réalisé entre les deux tubes et l'échange de chaleur se fait soit par un système de caloduc, soit directement par circulation du fluide dans le tube intérieur. Afin d'améliorer la part solaire reçue, un réflecteur peut être ajouté soit sur la paroi intérieure du tube extérieur soit à l'extérieur (CPC, Schott-Rohglas).



3.2 Le capteur à concentration

Les centrales solaires thermodynamiques concentrent le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à une température beaucoup plus élevée que celle atteinte par les systèmes présentés à la section précédente. En fait, l'énergie dégagée par les systèmes solaires thermodynamiques est suffisante pour actionner des turbines à vapeur et produire de l'électricité.

Grâce à l'énergie concentrée la température atteinte sur ce point est comprise entre 400 °C à 1500 °C. ces systèmes. Non compatibles avec des installations traditionnelles de chauffage ou de production d'ECS, les capteurs à concentration sont en majorité utilisés pour des applications industrielles.

Il existe plusieurs types de centrales à énergie solaire thermodynamique : à capteur parabolique (1), à capteurs cylindro-paraboliques (2), à effet cheminée (3), à miroirs de Fresnel (4) et à tour solaire ou à concentration solaire (5)

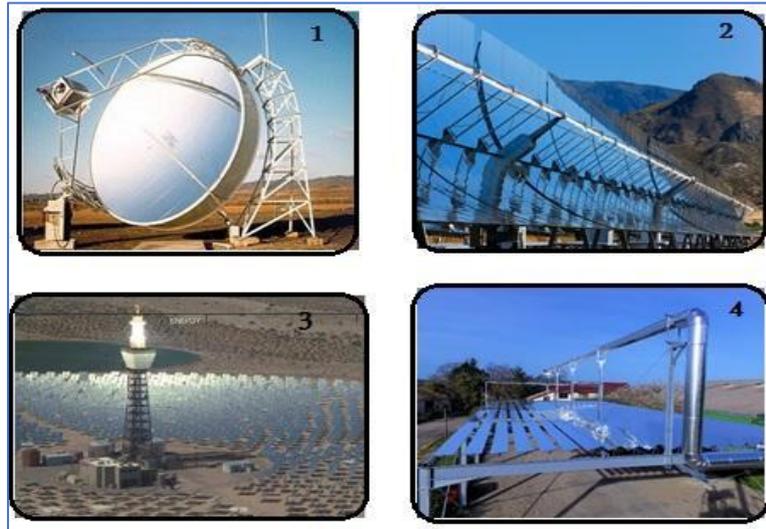


Figure II. 11 : Les différentes technologies solaires pour la production de l'eau chaude [15].

La conversion d'énergie solaire en chaleur pour produire de l'eau chaude se fait par plusieurs procédés thermiques solaires. Le chauffe-eau solaire individuel (CESI) et les chauffe-eau solaires collectifs, qui sont des technologies largement matures, avec généralement des matériels de bonne qualité. Ces systèmes sont destinés à la production d'eau chaude sanitaire.

4 Les principaux composants d'un SSI

Les différents éléments communs aux SSC sont présentés ci-dessous :

Le capteur solaire thermique recueille l'énergie provenant du soleil et la transmet à un fluide caloporteur (très souvent un fluide antigel). Lors de la conception d'un SSC, un des principes de base est de transférer un maximum d'énergie thermique du capteur vers le circuit utilisateur en faisant fonctionner le capteur solaire thermique au plus bas niveau de température possible pour optimiser son rendement.

Il existe différents types de capteurs, plus ou moins adaptés à certains niveaux de températures. Plus le niveau de température est élevé, plus la technologie mise en œuvre est évoluée et coûteuse.

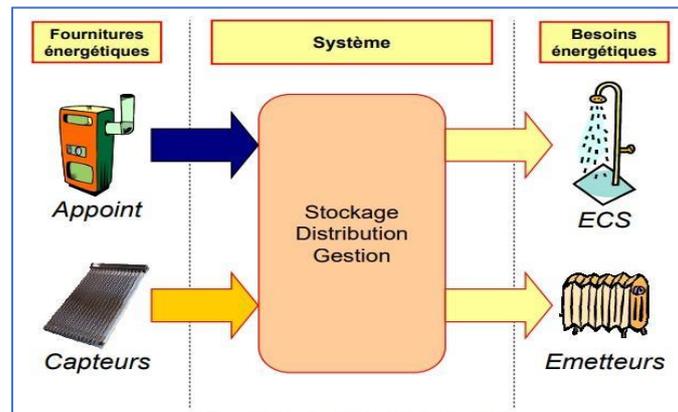


Figure II. 12: Schéma représentant les différents éléments (CES).

Tableau II. 1: Les catégories de capteurs utilisables dans l'habitat [16]

	Capteurs Sans vitrage	Capteurs plans vitrés	Capteurs à tubes sous vide
Photos			
Principe	Absorbeur à air libre	Vitrage pour réduire les pertes par convection et favoriser l'effet de serre Isolant pour limiter les pertes vers l'extérieur	Vide pour réduire de manière importante les déperditions y compris à haute température
Avantag	Très simple à installer Peu coûteux	Structure simple et robuste Rapport performance/prix abordable Adaptés au chauffage de locaux et à l'ECS	Pertes thermiques réduites Adaptées pour des procédés à plus hautes températures (>80°C).
Inconvénients	Pertes thermiques importantes. Uniquement adaptés aux procédés fonctionnant à une température proche de la température ambiante	Rendement modeste sous faible ensoleillement et écart de température relativement élevé (>50°C)	Produit plus complexe entraînant un prix élevé (de l'ordre de 700 €/m ²)
Utilisati	[T<30°C] Chauffage piscine Préchauffage ECS	[20°C<T<70°C] Chauffage locaux Chauffage ECS	[60°C<T<150°C] Chauffage locaux Chauffage ECS Climatisation par absorption

5 Systèmes de chauffage solaire thermiques et ces applications

5.1 Chauffe-eau solaire.

5.1.1 Définition.

Un système thermique solaire à eau chaude est généralement composé des éléments suivants :

Champ de capteurs avec tuyauterie de champ de capteurs et structure de support

Fluide caloporteur (eau ou mélange eau glycol)

Un système de stockage

Pompe pour boucle solaire et autres pompes pour autres boucles

Échangeurs de chaleur pour transférer la chaleur d'une boucle à une autre

Dispositifs d'extension et de sécurité pour chaque boucle fermée

Un contrôleur avec des capteurs de température dans le champ de capteurs et le réservoir de stockage et qui active et désactive la pompe.

Puisqu'un système solaire thermique n'agit généralement pas comme source de chaleur principale, un chauffage d'appoint (d'appoint) est nécessaire pour couvrir les périodes de forte demande d'énergie ou de rayonnement solaire trop faible (généralement en hiver).

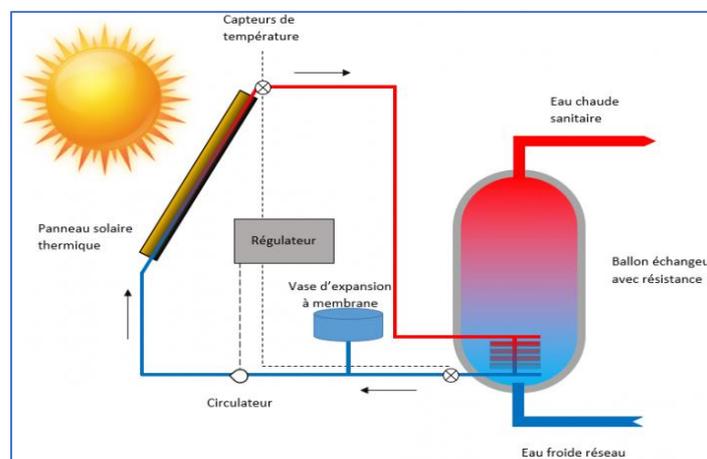


Figure II. 13: Schéma d'un système solaire d'eau chaude sanitaire, montrant les composants caractéristiques.

Les capteurs, qui absorbent l'énergie du rayonnement solaire et la transmettent au fluide caloporteur, doivent être orientés plein sud pour être plus efficaces. Ils sont souvent installés sur les toits, les murs ou sur un support métallique.

5.1.2 Capteur solaire plans.

Un insolateur plan est un capteur de chaleur qui convertit les rayonnements solaires émis par le soleil en énergie thermique se forme de chaleur. Il recueille l'énergie solaire et l'utilise pour chauffer et lever la température de l'eau ou de fluide caloporteur qui circule dans l'échangeur de capteur solaire.

Les collecteurs thermiques plats fonctionnent à la fois par le rayonnement direct et diffus. Ils fournissent une chaleur à basse température (inférieure à 70 C) utile pour le chauffage de l'habitat, production d'eau chaude sanitaire et des piscines.

Les capteurs solaires se distinguent par des échangeurs de chaleur à basse, moyenne ou haute température. Il existe essentiellement trois types de capteurs solaires thermiques : à plaque plane, à tube sous vide et à concentration.

Bien qu'il existe de grandes différences géométriques, leur objectif reste le même : convertir le rayonnement solaire en chaleur pour satisfaire certains besoins énergétiques.

Le capteur plan à couverture transparente se compose d'ensemble d'éléments afin d'assurer la conversion thermique d'énergie solaire reçue.

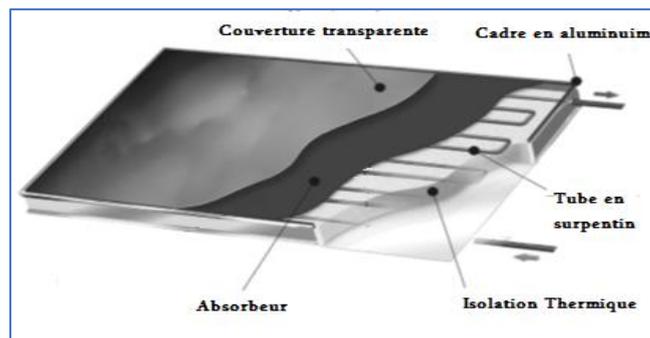


Figure II. 14: Schéma montrant les composants d'un capteur solaire plan.[17]

5.1.2.1 Les absorbeurs

L'absorbeur est l'un des éléments les plus importants d'un capteur thermique ; il convertit le rayonnement solaire en chaleur. Il se caractérise par deux paramètres :

- Le facteur d'absorption solaire α (ou absorptivité) : le rapport du rayonnement lumineux absorbé au rayonnement lumineux incident ;
- Le facteur d'émission infrarouge ε (ou émissivité) : le rapport entre l'énergie rayonnée dans l'infrarouge lorsque l'absorbeur est chaud et celle qu'un corps noir rayonnerait à la même température.

Dans les applications de chauffage solaire, on cherche à obtenir le meilleur rapport facteur d'absorption solaire / facteur d'émission infrarouge. Ce rapport est appelé sélectivité.

Le matériau constituant l'absorbeur est en règle générale en cuivre ou aluminium mais aussi parfois en matière plastique. Afin d'obtenir un meilleur rendement, certains systèmes sont donc constitués d'un revêtement particulier.

Tableau II. 2: les propriétés de quelques matériaux absorbeurs [18]

Matériaux	Absorptivité α	Emissivité ε	Sélectivité α / ε	Température max.
Black nickel	0,88 - 0,98	0,03 - 0,25	3,7 - 32	300°C
Graphitic films	0,876 - 0,92	0,025 - 0,061	14,4 - 36,8	250°C
Black Copper	0,97 - 0,98	0,02	48,5 - 49	250°C
Black Chrome	0,95 - 0,97	0,09 - 0,30	3,2 - 10,8	350 - 425°C

5.1.2.2 Type de changeur

Des balbutiements des années 1980, souvent de vieux radiateurs de chauffage peints en noir, aux techniques les plus modernes d'aujourd'hui, un grand nombre de matériaux et de concepts d'absorbeurs ont été utilisés dans les panneaux solaires thermiques plans.

La fonction principale de l'absorbeur est de transformer le rayonnement solaire capté en chaleur. Moyennant un réseau de canaux qui, en général, couvre toute la surface d'ouverture de capteur, dans lesquels le fluide caloporteur peut circuler, et transporter la chaleur vers le ballon de stockage.

5.1.2.3 Les matériaux des premiers absorbeurs

L'acier : matériau facile à trouver, cela a été aussi le premier utilisé. Il s'est avéré que les absorbeurs en acier étaient très sensibles à la corrosion. Ils n'ont pas eu grand succès. On trouvait deux types :

- Les absorbeurs à serpentin en acier enserrés entre deux feuilles d'acier soudées.
 - Les absorbeurs de type « lame d'eau », formés de deux feuilles d'acier soudées par point et soumises ensuite à une forte pression pour « gonfler » les parties non soudées.
- a. **L'acier inoxydable** : ces absorbeurs constitués d'un serpentin en tubes d'acier inoxydable collés entre deux feuilles d'aluminium pré-embouties, étaient résistants à la corrosion, mais avaient un rendement faible, à cause d'une perte de contact entre les tubes et les feuilles d'aluminium.
 - b. **L'aluminium** : ces absorbeurs avaient l'inconvénient d'être sensibles à la corrosion avec certains fluides caloporteurs mal dosés (antigel corrosif). On trouvait deux types :
 - Les absorbeurs « roll-bond », constitués de deux feuilles d'aluminium d'abord recouvertes d'un enduit reproduisant le réseau de canaux. Fortement pressées

ensembles, puis soudées, les deux feuilles étaient soumises à un gonflage haute pression.

- Les absorbeurs aluminium à caloduc avec échangeur de chaleur en acier inoxydable.

Les absorbeurs couramment utilisés actuellement sont constitués de tubes en cuivre ou inox, soudés sur une feuille d'aluminium.

Ils ne présentent presque jamais de trace de corrosion, même après 20 ans. On trouve deux types :

Les absorbeurs sont faits de feuilles d'aluminium plaquées de cuivre.

Les absorbeurs en tube de cuivre, soudés sur des feuilles de cuivre ou d'aluminium.

5.1.2.4 Les différents types d'absorbeurs

Les absorbeurs à serpentin : dans ce cas d'absorbeur, c'est un tube en serpentin qui est collé ou soudé sur la feuille de l'absorbeur. Ce concept n'a pas tenu longtemps, à cause des pertes de charges élevées et des difficultés de fabrication. Le seul intérêt, c'est le raccordement en parallèle de plusieurs capteurs.

a. **Les absorbeurs type « échelle »** : En raison de l'utilisation des absorbeurs à ailettes, l'absorbeur type « échelle » a conquis une grande part de marché. Plusieurs tubes en parallèle, connectés à un tube allé et un tube retour, sont combinés pour former une échelle. C'est le type d'absorbeur utilisé dans les systèmes à thermosiphon.

b. **Les absorbeurs avec transfert de chaleur sur toute la surface** : dans cette conception, les tubes irriguent l'absorbeur entier. L'intervalle entre les tubes est très étroit et ils ont une section très faible. Ils ont un rendement supérieur. Encore peu proposés, ils commencent à prendre de l'importance.

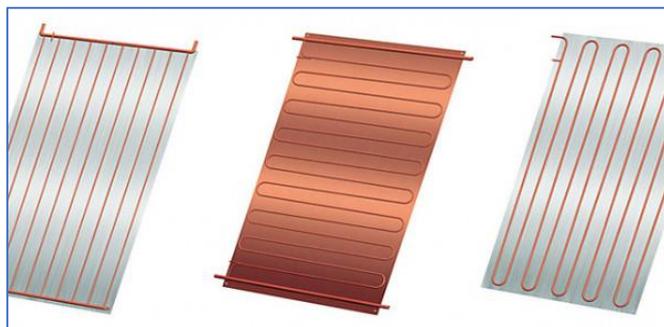


Figure II. 15: les principaux types des absorbeurs. [19].

5.1.2.5 La couverture transparente

Un vitrage est utilisé pour la surface transparente afin de laisser passer la majorité du rayonnement solaire (visible et Proche Infrarouge (PIR)) de par ces propriétés optiques.

Le vitrage permet de protéger l'intérieur du capteur contre les effets de l'environnement et d'améliorer le rendement du système par effet de serre.

Si l'on souhaite un vitrage efficace, il doit posséder les propriétés suivantes :

- Réfléchir le rayonnement lumineux au minimum quelle que soit son inclinaison ;
- Absorber le rayonnement lumineux au minimum ;
- Avoir une bonne isolation thermique en gardant le rayonnement infrarouge au maximum ;
- Résister dans le temps aux effets de l'environnement (pluie, grêle, rayonnement solaire...) et aux grandes variations de températures.

Les principaux vitrages utilisés pour les capteurs thermiques sont à base de verre non-ferrugineux ou en verre acrylique, et souvent dotés d'un revêtement antireflet.

5.1.3 Unité de stockage.

Le système de stockage de chaleur joue le rôle de tampon pour stocker l'énergie solaire quand elle est disponible et la restituer lorsqu'il y a besoin de chaleur.

La plupart des CES actuels possèdent un stockage de chaleur à plus court terme. Le principe est de stocker l'énergie solaire dès que possible dans un ou des ballons. Lors du prélèvement d'énergie, il est recommandé de maintenir au mieux la stratification de la chaleur dans le ballon pour améliorer le rendement du système.



Figure II. 16: Stockage de la chaleur dans un seul ou plusieurs réservoirs.

5.1.4 Unité de commande.

L'ensemble de l'installation est géré par un ou des régulateurs qui assurent la commande des circulateurs et des vannes sur les différents réseaux hydrauliques. Les régulateurs peuvent être plus ou moins complexes, allant du simple contrôle différentiel sur chaque circuit, à la gestion globale des énergies employant des algorithmes évolués.

5.2 Les différents types de chauffe-eau solaire.

Il y a 4 grandes familles de chauffe-eau solaire, les modèles à circulation forcée par une pompe électrique, et les versions thermosiphon et monobloc qui fonctionnent en totale autonomie.

5.2.1 Le chauffe-eau à pompe électrique

Une installation solaire thermique à circulation forcée est une installation dans laquelle l'eau circule à l'intérieur du circuit alimenté par une pompe. C'est un système particulièrement prisé, pour une bonne raison, c'est qu'il peut s'installer dans la plupart des habitations, et quelle que soit leur configuration. Les éléments sont séparés, et le ballon peut être placé où on le désire. C'est un système le plus coûteux, car il nécessite la présence d'une pompe électrique, et généralement d'un régulateur thermique.

5.2.2 Le chauffe-eau à thermosiphon

C'est généralement la meilleure solution d'un point de vue qualité prix. L'installation est plus complexe, parce que le ballon doit toujours être à une hauteur plus élevée que les panneaux solaires. On placera donc généralement le ballon dans les combles lorsque les panneaux seront sur la partie la plus basse du toit, ou bien en façade. C'est un système qui fonctionne sans pompe, l'eau remonte naturellement des panneaux jusqu'au ballon lorsqu'elle est chaude, et elle redescend en refroidissant. C'est donc moins coûteux en termes de matériel, il n'y a pas d'entretien ou presque, et la panne est quasiment minime.

5.2.3 Le chauffe-eau monobloc

C'est un dispositif qui reprend le même système de fonctionnement qu'un chauffe-eau à thermosiphon. La différence est que tout le système est placé dans le même châssis. C'est le dispositif le moins coûteux généralement, notamment en termes de pose. Il peut d'ailleurs être placé directement au sol, dans un jardin bien ensoleillé. En revanche, le ballon reste toujours à l'extérieur, et il est alors plus difficile de conserver l'eau à bonne

température, notamment en hiver. C'est donc un dispositif que l'on utilisera plutôt en solution complémentaire d'un autre système.

5.2.4 Les chauffe-eaux à auto-vidange

C'est une autre alternative pour éviter le risque de gel. Elle consiste à vider les panneaux solaires en période de non utilisation. Dans ce cas, le ballon est toujours situé plus bas que les panneaux solaires. Dès que le soleil ne chauffe plus, la circulation entre les panneaux et le ballon s'arrête et le circuit se vidange automatiquement. Dès que l'ensoleillement reprend, la circulation se remet en route. Dans ce cas, on utilise directement l'eau sanitaire dans le circuit [11].

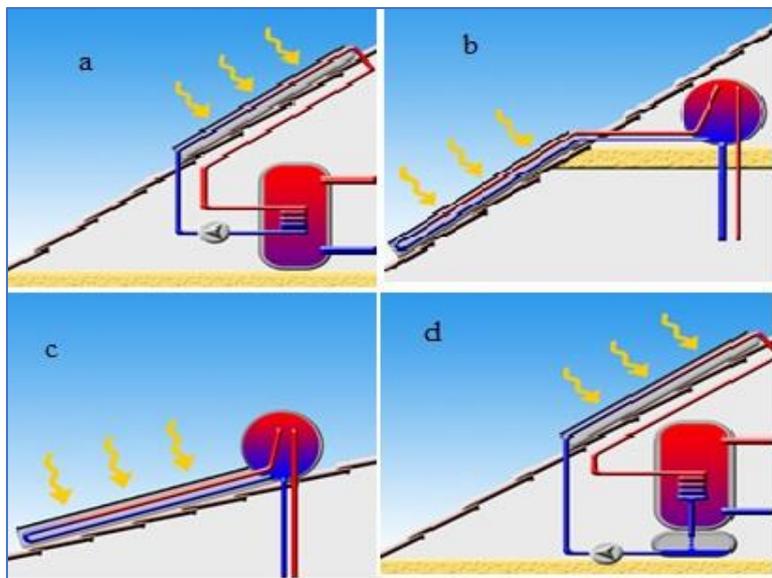


Figure II. 17: CESI(a) circulation forcée, (b) à thermosiphon ; (c) Monobloc ; (d) Auto-vidange. [20].

6 Les avantages d'un chauffe-eau solaire :

- Le principal atout d'un chauffe-eau solaire est qu'il dépend du soleil.
- C'est une énergie qui est également écologique :
- On préserve les énergies fossiles qui brûlent pour apporter de l'énergie et sont forcément bien plus polluantes.
- Le chauffe-eau solaire nous permet de ne plus chauffer l'eau à l'aide de l'électricité ou d'une chaudière pendant plusieurs mois.
- On peut espérer obtenir entre 40 et 70 % de nos besoins en eau chaude au cours de l'année.

- Bien sûr c'est un atout financier, puisqu'on économisera entre 40 et 70 % sur notre facture d'eau chaude.
- Enfin, c'est un système qui ne réclame que très peu d'entretien et qui est conçu pour fonctionner de manière quasi-autonome pendant une longue durée [21].

7 Marché des Chauffe-eau Solaires.

Depuis la fin des années 1990 plusieurs textes juridiques ont été adoptés en faveur du processus d'innovation stratégique de développement des énergies renouvelables. Ce qui permettrait à l'Algérie d'exploiter son gisement en énergies renouvelables et surtout en énergie solaire qui représente plus de 3 500 heures par an.

Parmi les acteurs clé de ce processus il y a l'agence de promotion et de rationalisation de l'utilisation de l'énergie APRUE qui est une institution publique rattachée au ministère de l'Énergie. Elle a été créée en 1985 par décret présidentiel et est spécialisée principalement dans l'analyse et le traitement des questions de stratégie énergétique [22].

Dans cette partie, nous présentons quelques rapports publiés sur la situation actuelle du marché de l'énergie solaire thermique en Algérie et les efforts officiels et individuels pour introduire et exploiter l'industrie de l'énergie solaire thermique, ainsi qu'un aperçu des perspectives d'avenir.

7.1 La période coloniale

Au cours des années 1947, non loin de l'Université d'Alger, se trouve une station solaire à Bouzareah, connue aujourd'hui par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). Lors de la colonisation française de l'Algérie, Marcel Perrot a mené un laboratoire de recherche sur l'énergie solaire, grâce à un financement de la commission énergie solaire du Conseil supérieur de la recherche scientifique appliquée en Algérie (CSRSAA). Un grand four solaire « héliodyne », est destiné à servir de prototype à une série de plusieurs centaines d'exemplaires identiques à ce four, qui seraient disposés sur les Hauts Plateaux algériens, afin de produire, de façon semi-industrielle, des substances telles que le nitrate de soude ou de l'hydrogène obtenu « par pyrocatalyse de la vapeur d'eau »

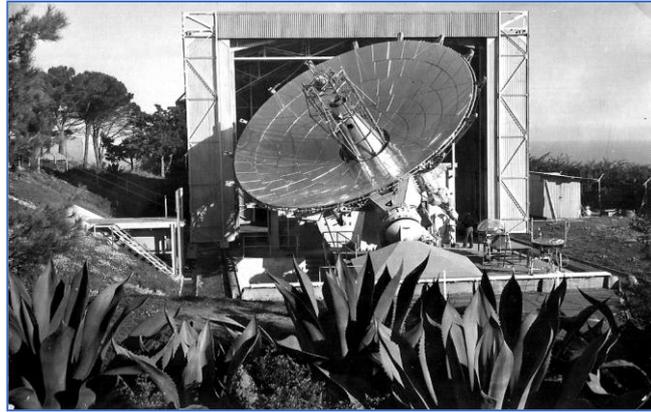


Figure II. 18: Héliodyne d'Alger, colline de la Bouzareah, environ 1955[23].

Tableau II. 3: Tableau récapitulatif des principales caractéristiques de l'Héliodyne [24].

Diamètre du miroir parabolique	8,40 m
Surface utile (partie centrale non active déduite)	50 m ²
Ouverture relative (quotient du diamètre par la distance focale)	2,67m
Distance focale	3,14m
Concentration focale maxima	20000 e
Puissance théorique	50 kW
Puissance utilisable dans le four	30 kW
Température au foyer en fonctionnement statique	3000°C
Hauteur totale de l'appareil au-dessus de son assise en béton, Le miroir étant horizontal.	8.90 m

De nombreuses activités et sujet solaires menées par Marcel Pérot à l'Université d'Alger en 1950 exemple : l'interrogation sur le potentiel énergétique et son potentiel d'exploitation « vastes étendues ensoleillées du désert » ; Installation d'une plate-forme de recherche sur l'exploitation de l'énergie solaire à l'Université d'Alger 1955-1956.



Figure II. 19: Université d'Alger avec des insolateurs plans, avril 1961[23].

Dans la période coloniale française d'Algérie, les responsables d'Alger ont importé plus de 50 chauffe-eau solaires avec serpentin en plomb. Ils ont été installés à différentes écoles

primaires d'Alger afin de répondre aux besoins du l'écolier en matière de l'eau chaude dans la période hivernale, la température obtenue par ces chauffe-eau atteint 70°C.



Figure II. 20: Terrasse d'une école primaire d'Alger avec des insolateurs plans.

7.2 Après l'indépendance

En Algérie, le premier chauffe-eau solaire a vu le jour au début des années quatre-vingt. Ce chauffe-eau solaire était constitué de deux capteurs de forme rectangulaire et d'une cuve cylindrique. Chaque capteur se composait d'un bac en tôle, échangeur était du type collecteur à colonnes. Isolé par de la laine de verre, il était couvert d'un vitrage de 4 mm d'épaisseur.

L'installation des chauffe-eau solaires de fabrication nationale à circulation en thermosiphon à travers la région a connu un essor remarquable vers la fin des années quatre-vingt, mais leur vulgarisation était limitée seulement à des institutions étatiques.

7.2.1. Prototype du CDER

Durant les années 84 et 85 et suite à différentes études théoriques et expérimentales menées au Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), un nouveau modèle de chauffe-eau solaire à thermosiphon a vu le jour, (figure 4) ayant une cuve cylindrique à carénage parallélépipédique et un ou deux capteurs.



Figure II. 21: Prototype du chauffe-eau solaire CDER [25].

Le chauffe-eau solaire est un système thermique qui se compose de deux parties distinctes. Une première partie pour le captage de l'énergie solaire et sa conversion en énergie thermique via un capteur plan conçu à cet effet et se compose de :

- Couverture vitrée (vitrage ordinaire) ;
- Une plaque absorbante en aluminium, peinte en noire ;
- Une échelle tubulaire en cuivre sertie dans l'absorbeur ;
- Une isolation latérale et arrière en mousse polyuréthane.

Tous ces éléments sont regroupés dans un caisson métallique qui forme le capteur solaire plan.

7.2.2. Prototype du CES ENGTP

L'entreprise national GTP, filiale de Sonatrach a conçu un prototype de chauffe-eau solaire 100 % algérien destiné à être dupliqué en 10.000 unités pour les besoins des entreprises du secteur de l'Energie et des mines. Son coût est estimé à 135.000 DA [26].



Figure II. 22: Prototype du chauffe-eau solaire ENGTP.

7.2.3. Prototype du CES Thermo-kad

Thermokad, l'entreprise créée par investisseur algérien A. Hamdouni, pour fabriquer les chauffe-eau à accumulation. Le CES est composé d'un capteur solaire à fort rendement, d'un ballon d'eau 200 litres. Ces CES ont été placées avec un grand succès dans les bases de vie des entreprises pétrolières nationales et étrangères activant dans le Sud algérien. Le prix unitaire atteint plus de 10 000 DA, ce qui n'est pas accessible à un large public [27].



Figure II. 23: Prototype du chauffe-eau solaire TERMOKAD.

7.2.4. Capteur stockeur (URERMS)

Dans le cadre d'un projet de recherche inscrit au programme de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (l'URER/MS) à Adrar pour le développement et la vulgarisation des chauffe-eau solaires en milieu saharien, un prototype de chauffe-eaux solaire de type capteur-stockeur rustique bon marché et adapté aux conditions climatiques hostiles du milieu saharien a été conçu et réalisé par les moyens de bords disponibles dans l'atelier de l'URER/MS [28].



Figure II. 24 : Chauffe-eau solaire capteur stockeur URERMS

8 Sensibilisation et vulgarisation

Dans le processus de sensibilisation, l'Etat algérien a insisté sur la nécessité d'exploiter les énergies renouvelables, en installant des projets pour répondre à ces besoins en matières d'électricité et l'eau chaude.

Les programmes nationaux ciblent les deux secteurs tertiaires et résidentiels ; Parmi ces programmes nous citons

- Programme Horizon 2011 pour alimenter 5500 foyers en eau chaude solaire (financé par le PNUD)

- Programme ALSOL: 1000 chauffe-eau individuels dans les logements et 1000 dans l'industrie financés par le Fonds national pour la maîtrise de l'énergie (FNME)
- Programme d'installation de 16000 m² de chauffe-eau solaire pour des sites isolés (financé dans le cadre du PNME)



Figure II. 25: Publications publicitaires pour les chauffe-eau solaires Subventionnés par l'état [29]

Ces programmes ciblent des zones isolées dans les plateaux et le grand sud. Certaines écoles ont installé des chauffe-eau solaires et des panneaux solaires pour réduire les dépenses de consommation d'électricité et la production de l'eau chaude dans les écoles, les centres de santé et les établissements publics.



Figure II. 26: Installation des CES dans les établissements publics et les écoles.

Les années précédentes (1990-1995), de nombreux chauffe-eau solaires ont été distribués dans la wilaya d'Adrar dans le cadre d'étude et d'exploitation des énergies renouvelables en milieu désertique.

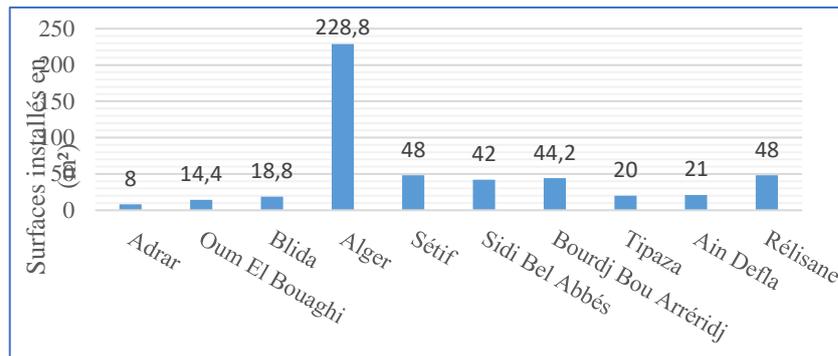


Figure II. 27 : Surface totale installée de chauffe-eau solaire domestique par ville [30].

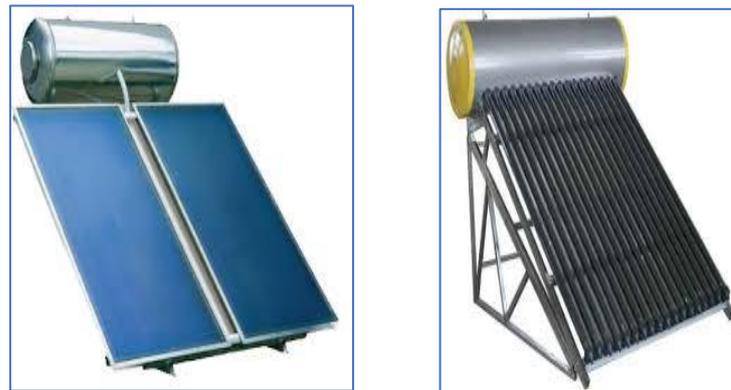


Figure II. 28: Modèles de chauffe-eau solaires soutenus dans le cadre des programmes nationaux.

Tableau II. 4: Prix en dinars algérien installé et mis en marche [31].

	Prix en dinars algérien installé et mis en marche				
Model	100L	150L	200L	300L	500L
Spring	138 240 DA	N/A	212940 DA	321660 DA	419 580 DA
Ultra	155 880 DA	N/A	237 420DA	342360 DA	445 140 DA
Elite	N/A	162 540 DA	179 280 DA	263 880 DA	N/A

9 Chauffe-eaux solaires dans la région d'Adrar.

Le chauffe-eau solaire est l'application la plus répandue de l'énergie solaire et dont le surcoût est amortissable dans une période raisonnable dans le cas des sites favorables, il permet de chauffer l'eau pour des températures modérées (40°C-60°C).

Un nombre important de chauffe-eau solaires sont installés en 1992 au niveau de la région Adrar, afin de vérifier la performance de système et tester le comportement des différentes composantes dans un milieu saharien très favorable. Les chauffe-eaux installés à travers la wilaya sont classés en deux catégories : les chauffe-eaux solaires installés à l'intérieur de la SEEM-MS pour alimenter en eau chaude sanitaire les baraques de la base de vie, et pour

l'alimentation des bancs d'essais. La deuxième catégorie des chauffe-eaux sont ceux installés à Adrar et les autres villes de la wilaya. Ces CES ont été installés dans des établissements d'enseignement, une caserne, la maternité et le centre des handicapés.



Figure II. 29: Centre d'handicapés près de la SNTV.



Figure II. 30 :Photo représentant les CES CDER en plein test sur la plateforme d'essai SEESMS.

Les différentes CES installé dans la wilaya d'Adrar, sont exposés aux changements climatiques du milieu saharien : le vent, les température basse et élevée, sans recherche particulière d'intégration architecturale, ni recherche particulière d'amélioration d'accessibilité de l'appareil pour l'entretien et le nettoyage des capteurs ce qui entraîne rapidement une forte baisse de rendement à cause de l'accumulation de la poussière.

9.1 Vulgarisation et exposition.

L'unité de recherche est l'une des institutions de recherche les plus importantes dans le désert pour ouvrir une fenêtre d'introduction pour le citoyen sur les énergies renouvelables et son importance dans le développement durable. Les activités publicitaires et d'information de l'Unité sont diversifiées sous la forme d'interventions par, la radio et la télévision, de participation à des manifestations scientifiques, de journées portes ouvertes, d'accueil de citoyens, des délégations officielles et d'étudiants d'écoles et d'universités.



Figure II. 31 : Activité des vulgarisations et des visites officielles.

9.2 Observations et évaluation

En ce qui concerne la fiabilité et la durée de la vie de système CDER installé à Adrar, il faut noter certaine remarque sur sa fonctionnalité et de l'entretien, : nettoyage du vitrage, changements des clapets anti-retour, remplacement d'une vitre cassée et le renforcement de

l'étanchéité des capteurs. Certains chauffe-eaux ont été abandonnées est sont resté handicapé à cause de la négligence et l'inadaptation des systèmes au circuit d'adduction d'eau postérieurement installé. La défaillance du système provient généralement d'une mauvaise installation, manque de savoir-faire, quelques défauts d'usinage : mauvaise isolation de la cuve du stockage. Quelques insuffisances techniques sont affectées à la fabrication du système :

- Corrosion des cuves de stockages liée à leur revêtement interne, la corrosion autour des points de soudure où apparaissent des couches galvaniques.
- Intrusion du sable dans les capteurs due à une étanchéité insuffisante des joints.
- Bris de vitrages des capteurs.
- Ternissement des vitres et de peinture noire des absorbeurs.
- Surchauffe : par temps ensoleillé, qui marque le plus du temps de la région, la plupart des installations se trouvent dans des établissements scolaires, en été, le CES produit de l'eau très chaude, que si personne n'utilise peut endommager le matériel, pour éviter ces problèmes on doit vidanger et cacher les CES à la sortie en vacance.



Figure II. 32: Dégradation et brise de la couverture transparente.

Le milieu saharien est caractérisé par des tempêtes de sable fréquentes, ce qui permet la salissure du vitrage, ces salissures sont liées aux tempêtes poussiéreuses. La transmission de la couverture transparente est tributaire de sa composition physico-chimique et de son état de surface (poussières etc...). Le bris des couvertures est causé par des rafales violentes qui renversent des fois les capteurs. Les échanges thermiques complexes avec le milieu ambiant et la mauvaise pose.



Figure II. 33: Dégradation de l'absorbeur

Dans la figure II.35 La dégradation au niveau de l'absorbeur est liée à la corrosion interne de la plaque d'Aluminium, et à la corrosion due aux fuites d'eau de l'échelle tubulaire de l'absorbeur.



Figure II. 34: Dégradation d'un capteur sous vide dû ou longue exposition et température de stagnation élevée.

Les caractéristiques chimiques des éléments du capteur (Cuivre, Aluminium, Fer), jouent un rôle très important contre poussé la dégradation ; la pression dans le réseau d'eau, problèmes liés aux soudures et au phénomène électrolytiques (Cuivre, Aluminium).

Les hautes températures de stagnation conduisent à une dégradation plus poussée, les déformation, fuite, dégradation de l'isolation, amorcé le corrosion.....etc.

En milieu désertique, la demande en eau chaude diminue dans les périodes estivales, ce qui expose les chauffe-eaux solaires pendant de longues périodes sous rayonnement sans circulation d'eau, et donc l'absorbeur, les joint d'étanchéité, l'isolation, les couche sélective ou de peinture ; ont subi aux effets de la température de stagnantes très élevées.

10 Conclusion

Le marché local continue de souffrir des restrictions imposées par les crises financières et économiques qui ont un impact direct sur le développement du marché, ce qui conduit à un ralentissement de l'exploitation des énergies renouvelables et limite la conscience nationale de ses avantages, diminue les dispositifs publics de soutien à l'exploitation de la chaleur solaire.

Le chauffe-eau solaire est le système solaire thermique le plus développé, il a atteint une maturité dans une technicité maîtrisée dans les pays développés, ailleurs il existe des chauffe-eaux solaires fiables, très performants et d'une durée de vie meilleure.

la connaissance et la description de la dégradation des différents éléments d'un chauffe-eau solaire permet d'aider les concepteurs et les fabricants des chauffe-eau solaires à sélectionner les matériaux adéquats pour améliorer les performances du système, la durabilité des matériaux afin de répondre aux besoins de la conception des systèmes qui fonctionnent efficacement avec le respect de conservation d'énergie, à la conservation des matériaux et à la qualité et à la préservation de l'environnement.

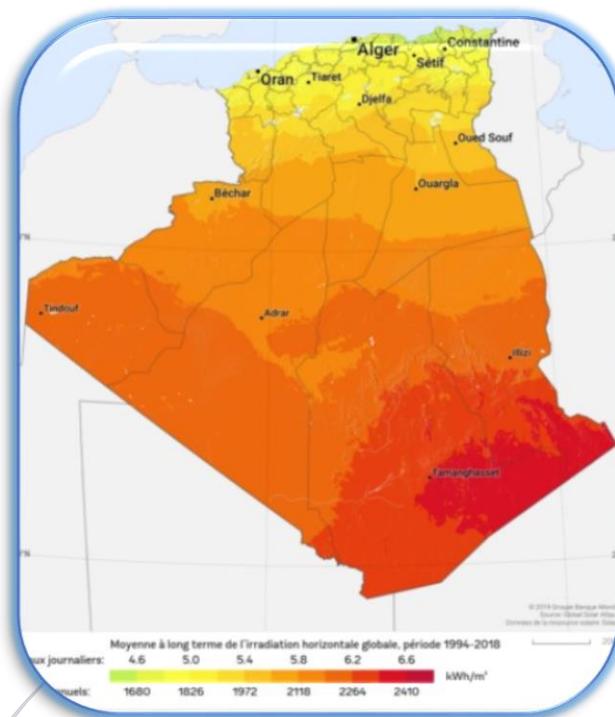
Pour la plupart des applications d'eau chaude, les capteurs solaires à plaques plates ont tendance à être plus rentables en raison de leur conception simple, de leur faible coût et de leur installation relativement plus facile par rapport aux autres formes de systèmes de chauffage à eau chaude.

11 Bibliographie

- [1] Boukar M.& Harmim A. Chauffe-eau solaires dans la région d'Adrar, Expériences et perspectives, Les zones arides " Rétrospective, enjeux et stratégies " Adrar, du 25 au 27 Avril 1998.
- [2]http://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/GSR/2013/Press%20release%20short_French.pdf
- [3]. Anis .M et al. Etude des performances thermiques d'un Chauffe-Eau Solaire Cylindro Parabolique CESC type capteur stockeur, IJSET, ISSN: 2356-5608, Vol.3, issue 2 Copyright IPCO-2015-pp.1-11
- [4] Early solar water heaters-1, A History of the Climax Water Heater in California.
- [5] Site internet. <https://www.chauffe-eau-caledonie.com/historique/>
- [6] Harmim. A, Boukar .M, Etude expérimentale des performances à long terme du chauffe-eau solaire en milieu saharien, communication présentée au SIPE3, CU Bechar, 1996.
- [7] Harmim. A, Boukar Amar .A and Haida .A, Simulation and experimentation of an integrated collector storage solar water heater designed for integration into building facade, Energy (2019)166, 59-71
- [8] Jeronimo V. D. S., Conception et optimisation d'un capteur solaire thermique innovant adapté à la rénovation énergétique grâce à l'intégration du stockage. These doctorates, university de Grenoble (2006).
- [9] International Energy Agency, I., Technology Roadmap-Solar Heating and Cooling. 2012.
- [10] ESTIF, E.S.I., Best practice regulations for solar thermal. 2007. p. 61.
- [11] Ampatzi, E., I. Knight, and R. Wiltshire, The potential contribution of solar thermal collection and storage systems to meeting the energy requirements of North European Housing. Solar Energy, 2013. 91(0): p. 402- 421.
- [12] Henning, H.-M. And J. Doll, Solar Systems for Heating and Cooling of Buildings. Energy Procedia, 2012. 30(0): p. 633-653
- [13] Jeremy Bois. Outil d'aide à la décision pour la conception de maisons solaires à énergie positive. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2017.
- [14]<https://www.nouvennergie.fr/e-formation/solaire-1/les-capteurs-thermiques>.
- [15] Quoilin Sylvain. Les Centrales Solaires à Concentration ; Ingénieur Civil Electromécanicien / Energéticien ; Mai 2007.
- [16] Antoine Leconte, Identification de caractéristiques réduites pour l'évaluation des performances des Systèmes Solaires Combinés, Thèse doctorat à l'Université de Grenoble, Octobre 2011, CUFÉ, Thèse (M.Env.) Université de Sherbrooke Canada, janvier 2010
- [17] <http://www.sun-ray.nc/avantages-chauffe-eau-solaire.html>
- [18] Review of Mid- to High-Temperature Solar Selective Absorber Materials - C.E. Kennedy - NREL/TP-520-31267 Juillet 2002.
- [19] <https://www.lepanneausolaire.net/les-absorbeurs-materiaux-modeles.php>

- [20] http://fr.solarpedia.net/wiki/index.php?title=Chauffage_solaire_de_l'eau_sanitaire
- [21] <https://www.chauffe-eau-solaire.info/>
- [22] Boughedaoui, Menouer, Actions Nationales Recommandées pour l'Energie Durable et la Viabilité Urbaine en Algérie. ENPI 2012/309-311- Alger.
- [23] Marcel Perrot et l'énergie solaire - Sophie Pehlivanian – Université de Savoie – Laboratoire LLS
- [24] Boulemtafes Amel, héliodyne, le premier four solaire algérien, bulletin des ER _027_07 CDER
- [25] Hakem Sid-Ali et Kaci Karim, L'évolution du chauffe-eau solaire en Algérie bulletin des ER _022_03 CDER 2012.
- [26] <https://www.vitamedz.com/fr/Algerie/un-chauffe-eau-solaire-gtp-37966-Articles-0-18300-1.html>
- [27] <http://benchaida.unblog.fr/2011/05/19/thermokad-un-chauffe-eau-solaire-algerien/>
- [28] Harmim A. et al. « Développement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur installé en milieu saharien » Rapport interne, URER/MS, Décembre 2003.
- [29] www.APRUE.dz (Brochure sur le programme de sensibilisation et d'accompagnement)
- [30] R. Sellami et al, Market potential and development prospects of the solar water heater field in Algeria, Renewable and Sustainable Energy Reviews 65 (2016) 617–625.
- [31] www.solalgerie.com/index.php?option=com_content&view=article&id=56&Itemid=56.

Chapitre III.



*Estimation des performances
du chauffe-eau solaires
en milieu Saharien*

1 Introduction

Divers paramètres de performance sont utilisés pour évaluer et comparer les systèmes solaires thermiques. Les plus importants sont la fraction solaire, et l'efficacité du système solaire.

Il existe actuellement deux approches principales pour prédire les performances du système Solar Domestic Heat Water SDHW. Chacune présentant un certain nombre de limitations. La première approche consiste à soumettre le système à une certaine forme de test à court terme, similaire aux tests effectués sur un système conventionnel, de nombreux tests de ce type ont été proposés [1]. La deuxième approche consiste à simuler le fonctionnement du système en utilisant soit un progiciel de simulation informatique détaillé tel que le TRNSYS [2] ou une corrélation de performance telle que F-Chart [3].

Ces programmes informatiques peuvent estimer l'énergie annuelle collectée, les effets du stockage et des échangeurs de chaleur, les pertes de chaleur du système, etc.

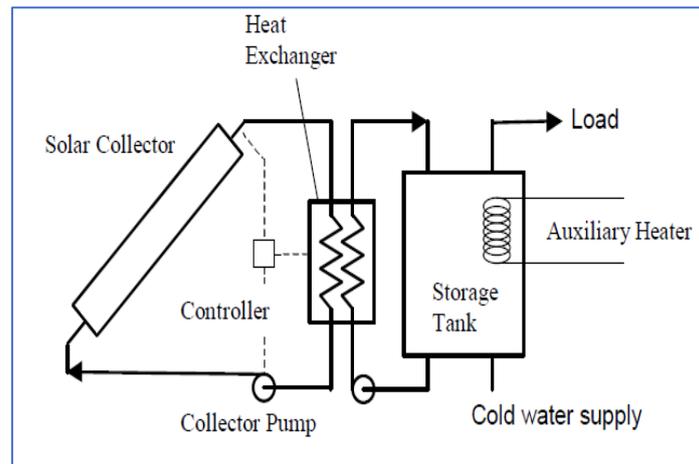


Figure III. 1 : Schéma d'un chauffe-eau solaire domestique [4].

2 Systèmes de thermosiphon

Les systèmes de thermosiphon sont de configuration similaire aux systèmes actifs, à l'exception du fait que la circulation à travers la boucle de collecteur est obtenue par les forces de flottabilité du fluide, résultant des gradients de température dans le réservoir de stockage et le collecteur.

Cette force de flottaison est utilisée en plaçant la sortie du collecteur à un niveau inférieur à la sortie du réservoir qui fournit le fluide au collecteur, produisant une différence de densité de fluide qui entraîne la circulation.

Les performances des systèmes thermosiphon sont donc un peu plus élevées que les systèmes actifs. La figure III.2 montre le schéma d'un système à thermosiphon.

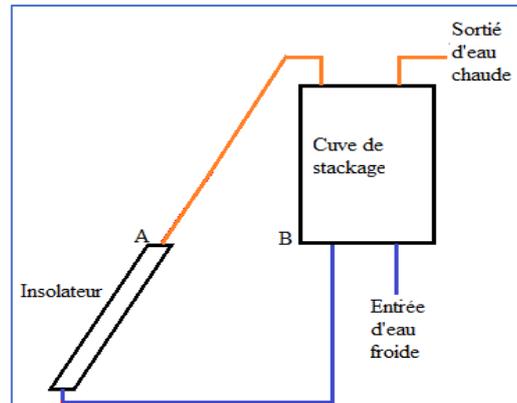


Figure III. 2: Schéma du système thermosiphon. La circulation est commandée par le différentiel de densité entre les points A et B.

Morrison et Braun [5] ont effectué une comparaison entre les simulations de TRNSYS et les mesures prises au National Bureau of Standards. Ils ont constaté que la performance annuelle prédite par le modèle TRNSYS était très proche des données expérimentales.

Le nombre des paramètres requis pour décrire complètement un système SDHW réel peut être inconnu et il serait impossible d'estimer les valeurs de tous ces paramètres. Il est toutefois possible de définir un système actif simplifié, dont les seuls paramètres inconnus sont les paramètres de gain et de perte du collecteur. Il est montré dans ce chapitre qu'une fonction reliant les coefficients de gain et de perte du système actif simplifié équivalent peut-être dérivée uniquement de la fraction solaire ASHRAE-95, de la surface du collecteur et du volume du réservoir du système SDHW réel.

3 Le système actif simplifié

Le système SDHW réel dont la performance à long terme est souhaitée est soumis au test ASHRAE-95, ce qui donne une valeur mesurée de la performance. Logiquement, il doit exister un système actif simplifié ayant la même surface de collecteur et le même volume de réservoir que le système réel, et une combinaison de coefficients de gain et de perte de collecteur telle

qu'elle donnerait théoriquement les mêmes performances que le système réel. Les mêmes performances d'essai que le système réel. Un système actif simplifié ayant ces caractéristiques est dit "équivalent" au système SDHW réel [6].

Dans un système simple on considère que :

- La stratification dans la cuve de stockage à température uniforme à tout instant. Par conséquent, le comportement du système peut être entièrement décrit par un seul bilan énergétique instantané.
- Les pertes dans les conduites sont considérées comme négligeables. Ainsi, la température du collecteur, et la température de soutirage, sont égales à la température du réservoir.
- L'efficacité du collecteur est supposée être indépendante de l'angle du rayonnement incident. Le produit transmittance-absorbance, est donc constant.
- Le coefficient de perte de charge, U_t , est supposé être égal à $1,51 \text{ W/m}^2\text{°C}$. Il s'agit de la valeur supposée dans le développement de la corrélation de la f-chart.
- Le collecteur est défini comme étant constitué d'un seul panneau, quelle que soit sa surface totale.
- Le fluide de travail dans la boucle collectrice est l'eau. Aucun échangeur de chaleur n'est utilisé.

Compte tenu de ces considérations, les performances du système actif simplifié est réduite à quatre paramètres variables. Il s'agit de :

- Surface de capteur, $A_c \text{ (m}^2\text{)}$
- Volume du réservoir, $V_r \text{ (m}^3\text{)}$
- Coefficient de gain du collecteur, $Fr(\tau\alpha)_n$.
- Coefficient de perte du collecteur, $FrUI \text{ (W/m}^2\text{°C)}$.

De ces quatre paramètres, les deux, coefficients, de gain et de perte du collecteur, sont inconnus. Si les valeurs de ces paramètres sont déterminées, les performances à long terme du système peuvent être prédites à l'aide de TRNSYS ou de F-Chart.

3.1 Bilan énergétique

Chaque jour, le réservoir reçoit une quantité d'énergie :

$$Q_{net} = Q_c - Q_{pert} \quad (III-1)$$

Où Q_{net} est la collecte d'énergie nette quotidienne qui peut être exprimée comme suit

$$Q_{net} = MC_p(T_f - T_i) \quad (III-2)$$

Q_c : est l'énergie totale journalière absorbée par le capteur, que l'on peut supposer proportionnelle à l'irradiation journalière incidente sur la pente H_t du capteur, et à l'aire A_c du capteur.

$$Q_c = \alpha \tau A_c H_t \quad (III-3)$$

A_c : Surface du capteur,

Où α est une constante de proportionnalité représentant le coefficient d'absorption effectif du système et du système et H_t , est exprimé comme suit :

$$H_t = \int_{t_i}^{t_f} I_T dt \quad (III-4)$$

Où t_i , et t_f sont le temps initial et le temps final pendant la période de collecte de l'énergie.;

Q_{perte} est la perte de chaleur totale journalière qui peut être supposée proportionnelle à la différence entre la température moyenne du réservoir et la température ambiante $\bar{T} - \bar{T}_a$.

\bar{T} : température moyenne du réservoir ;

\bar{T}_a : température ambiante.

$$Q_{perte} = U_t(\bar{T} - \bar{T}_a) \quad (III-5)$$

Où U_t , est le coefficient de perte de chaleur totale. Pour simplifier, nous supposons en outre que la température moyenne quotidienne \bar{T} du système peut être considérée comme la moyenne arithmétique des températures initiale et finale.

$$\bar{T} = \frac{T_i + T_f}{2} \quad (III-6)$$

À partir des équations (III.2), (III.3) et (III.5), l'équation énergétique (1), basée sur la surface de collecteur unitaire, peut s'écrire comme suit :

$$q_{net} = \frac{Q_{net}}{A_c} = \tau \alpha H_t - U_s(\bar{T} - \bar{T}_a) \quad (III-7)$$

Où

$$U_s \equiv U_t / A_c \quad (III-8)$$

En divisant Eq. (III.7) par H_t , nous obtenir une relation d'efficacité quotidienne du système :

$$\eta_s = \frac{q_{net}}{H_t} = \tau\alpha - U_s(\bar{T} - \bar{T}_a)/H_t \quad (III-9)$$

Un bilan thermique autour de la cuve de stockage est donné par [7], relations générales examinant séparément le réservoir et l'absorbeur, on obtient les équations suivantes du bilan thermique instantané:

$$m_f C_p dt = A_c [F_r(\tau\alpha)_n G_t - F_r U_i (T_i - T_a)] - U_t A_t (T_t - T_{env}) - \dot{m}_d C_p (T_d - T_m) \quad (III-8)$$

m_f = masse d'eau dans le réservoir (kg).

C_p = chaleur spécifique du fluide (J/kg °C).

ΔT = variation de la température du réservoir de stockage (°C).

G_t = rayonnement instantané incident sur la surface du capteur (W/m²).

T_a = température ambiante (°C)

T_t : température moyenne de stockage (°C)

T_{env} = température de l'environnement du ballon (°C).

\dot{m} = débit massique de puisage(kg/s).

T_d : Température de puisage [°C]

T_m : Température de réseau [°C]

4 Application à l'étude des performances des systèmes solaires :

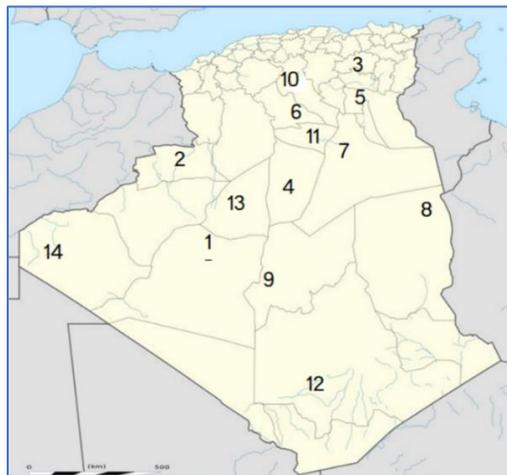
Dans le cadre de l'estimation à long terme des performances des systèmes solaires en milieu saharien en Algérie, Une étude a été menée pour évaluer les chauffe eau solaire du CDER [8] :

- Application au chauffe-eau solaire du CDER en utilisant la méthode f-chart.
- Application aux systèmes solaires de production d'eau chaude à circulation forcée.
- Application aux systèmes à concentration pour la production de chaleur industrielle.

L'évolution des performances en fonction du collecteur utilisé et des conditions météorologiques environnantes est étudiée à travers les résultats obtenus pour les différents sites sahariens pour lesquels les données sont disponibles [8]. Les stations disponibles sont figurées au tableau suivant.

Tableau III. 1 : La liste des stations sahariennes considérées [9].

La Station	Latitude	Longitude	La station	Latitude	Longitude
Biskra	34,80	5,73+	Tindouf	27,66	8,13-
El Oued	33,36	6,88+	Adrar	27,88	0,28-
Hassi Messaoud	31,66	6,15+	In Salah	27,20	2,46+
Ouargla	31,95	5,40+	In Amenas	28,63	9,63+
Ghardaïa	32,38	3,81+	Bechar	31,63	2,25-
El Golea	30,56	+2,90	Laghouat	33,76	+2,93
Timimoun	29,25	+0,23	Tamanrasset	22,78	+5,51



- | | | |
|-------------|-------------------|----------------|
| 1-Adrar | 6- Ghardaïa | 11-Ouargla |
| 2-Bechar | 7- Hassi Messaoud | 12-Tamanrasset |
| 3- Biskra | 8- In Aménas | 13-Timimoun |
| 4- El Golea | 9- In Salah | 14-Tindouf. |
| 5- El Oued | 10-Laghouat | |

Figure III. 3: Répartition les stations sahariennes sur la carte de l'Algérie

4.1 Validation du programme de calcul pour le cas du chauffe-eau solaire :

Par faute de moyens, l'étude expérimentale n'a porté que sur le chauffe-eau solaire à thermosiphon. Dans ce travail on rapport les résultats obtenus moyennant le programme de calcul en application pour des systèmes autres que le chauffe-eau solaire à thermosiphon mais qui fonctionnent selon le même principe [8].

4.1.1 Description et données de base du système :

Le système correspondant au banc d'essai est représenté en figure III.3 sur laquelle on retrouve les différentes hauteurs nécessaires pour les calculs du thermosiphon.

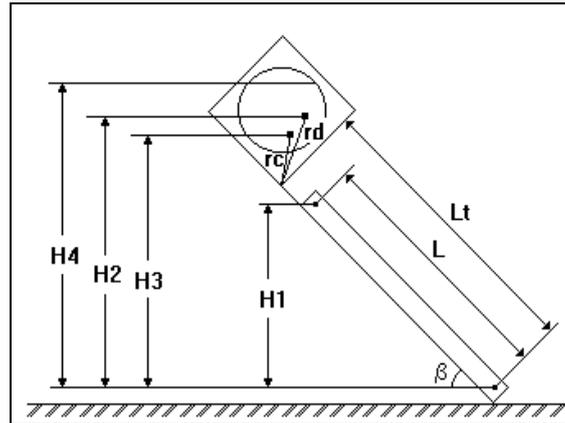


Figure III. 4: Le chauffe-eau solaire du CDER en banc d'essai.

Si on mesure r_c et r_d les différentes hauteurs nécessaires pour le calcul du thermosiphon seront données par les expressions suivantes :

$$H4 = L_t \cdot \sin(\beta) + 341 + 35,35 \sin(\pi/4 + \beta)$$

$$H3 = L_t \cdot \sin(\beta) + r_c \cdot \sin(\pi/4 + \beta)$$

$$H2 = L_t \cdot \sin(\beta) + r_d \cdot \sin(\pi/4 + \beta)$$

$$H1 = L \cdot \sin(\beta)$$

$$r_d = 0,23 \quad r_c = 0,18 \quad L = 1,83 \quad L_t = 1,905$$

Toutes les longueurs sont exprimées en mètres.

Compte tenu des résultats expérimentaux, le stockage sera considéré comme non stratifié.

Les caractéristiques thermo-physiques du chauffe-eau sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau III. 2: Caractéristiques du chauffe-eau solaire du CDER.[8]

La cuve de stockage.

La capacité théorique..... $M_t = 222$ l

La capacité réelle..... $M_I = 182$ l

Le diamètre interne..... $D_c = 0,4$ m

La hauteur de stockage..... $H = 0,316$ m

Le coefficient des pertes thermiques..... $(UA)_t = 1,24$ W/m².

Les conduites d'entrée-sortie.

Longueur de la conduite d'entrée eau froide..... $L_{cond1} = 2,595$ m

Longueur de la conduite de sortie eau chaude..... $L_{cond2} = 0,46$ m.

Longueur de la conduite se trouvant dans la cuveLccuve 0.8m
Le diamètre des conduites entrées-sortie.....D12=0,02 m
Le nombre de coudes du circuit..... Ncoud = 4
Le coefficient des pertes à l'entrée..... (UA)_e= 1,53 W/m²
Le coefficient des pertes à la sortie.(UA)_{so}= 0,27 W/m²

Le capteur.

Le nombre de panneaux..... Ncap=2
La surface de captation par panneau. Ac= 1,63 m²
Le nombre de colonnes par panneau..... Ncol=9
Le diamètre d'une colonne.Dcol=0,012 m
La longueur d'une colonne.....Lcol= 1,816 m
La longueur du collecteur.....Lcole 0,95 m
Le diamètre du collecteur,Dcole= 0,02 m
Le facteur d'extraction de chaleur en test.FrUlt- 7,9 W/m²/°C
Le facteur optique en test..... FrTot 0,62
Le débit test.....mt= 52 kg/h.m².

4.1.2 Résultats et comparaison :

La méthode f-chart a été appliquée à l'étude du chauffe-eau considéré, pour le site de Bouzaréah (CDER) et au mois de Mai.

La simulation a donné une valeur de f égale à 0,53 contre 0,66 pour l'étude expérimentale.

L'écart enregistré (de l'ordre de 20%) peut s'expliquer par :

- La difficulté à maîtriser les conditions de fonctionnement du système qui nécessite un minimum de moyen pour réguler le débit de puisage et maintenir constantes la pression et la température d'eau du réseau.
- L'état du stockage n'est certes pas stratifié mais on ne peut pour autant parler de température uniforme. Cet état intermédiaire, non pris en considération par le modèle, permet d'améliorer les performances du système.

4.2 Application à l'étude comparative de plusieurs variantes de chauffe-eau solaire à thermosiphon.

4.2.1 Variantes du chauffe-eau solaire CDER.

4.2.1.1 Les différentes variantes étudiées.

a. Suivant le montage de la cuve :

Il y a deux types de montage :

- Le montage actuel qu'on note "I" et dont l'arête extérieure de la cuve se trouve à la même inclinaison que le capteur (Voir figure III.4).
- L'ancien montage qu'on note "H" et dont l'arête extérieure de la cuve se trouve horizontale (Voir figure III.5).

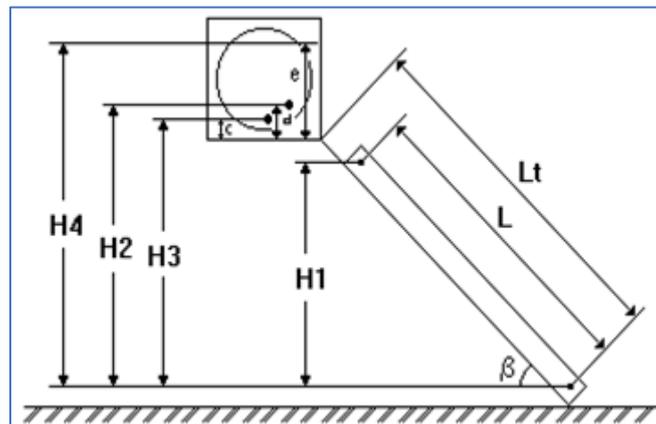


Figure III. 5: Schéma de principe de la variante "H" du chauffe-eau CDER.

Les différentes hauteurs mentionnées en figure III.4 sont données par les expressions :

$$H1 = L \cdot \sin(\beta)$$

$$H2 = L_t \cdot \sin(\beta) + d$$

$$H3 = L_t \cdot \sin(\beta) + c$$

$$H4 = L_t \cdot \sin(\beta) + e$$

Avec :

$$d = 0,105 \quad c = 0,075 \quad e = 0,366 \quad \text{et } L = 1,83 L_t = 1,905$$

Toutes les longueurs sont en mètres.

b. Suivant la disposition de la tuyauterie d'entrée-sortie de la cuve

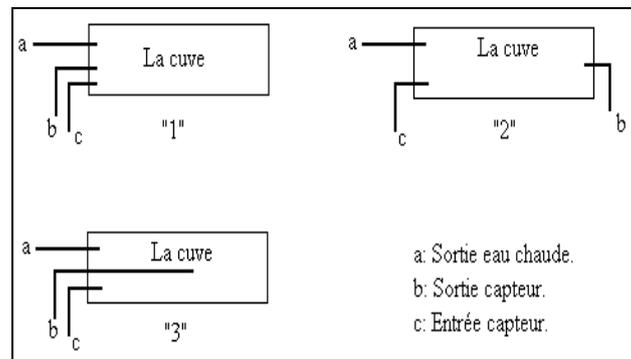


Figure III. 6: Les différentes dispositions de la tuyauterie par rapport à la cuve.

En combinant les différents cas représentés en figure III.5, on aura les 6 variantes suivantes :

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1- La variante : H1 | 4- La variante : I1 |
| 2- La variante : H2 | 5- variante : I2 |
| 3- La variante : H3 | 6- La variante : I3 |

4.2.1.2 Résultats et discussions :

La méthode de la carte f a été mise en œuvre par un programme de calcul appliquée pour les différentes variantes précédentes du chauffe-eau solaire du CDE en calage annuel, à 6 différents sites représentatifs du Sahara Algérien (Tableau III 3).

Tableau III. 3: Liste des stations sahariennes retenues pour l'étude

- | | |
|-----------------|--------------|
| 1- Béchar | 4- Adrar |
| 2- Tamanrasset. | 5. In aménas |
| 3- Tindouf. | 6. Biskra. |

a. Comparaison entre les configurations "H" et "I" :

Pour la station de Bechar on trace pour chaque variante (1, 2 et 3), les distributions de la fraction de satisfaction du chauffe-eau solaire du CDER suivant que la cuve est en montage "H" ou "I". On peut voir ces distributions sur les figures III.6 à III.8

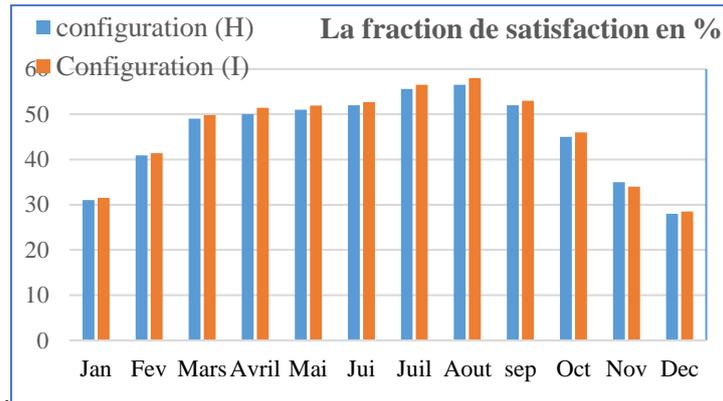


Figure III. 7 : Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "1" à Bechar.

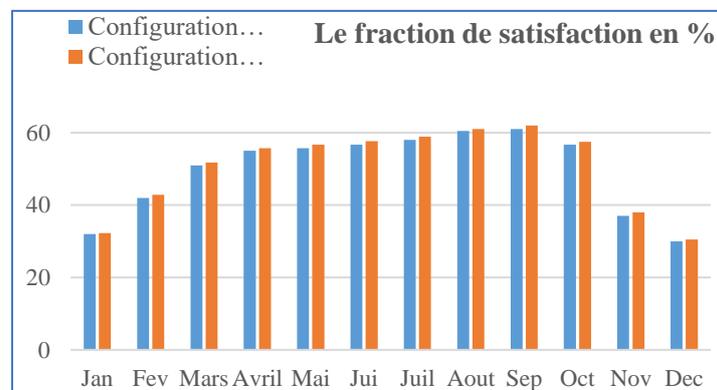


Figure III. 8 : Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "2" à Bechar.

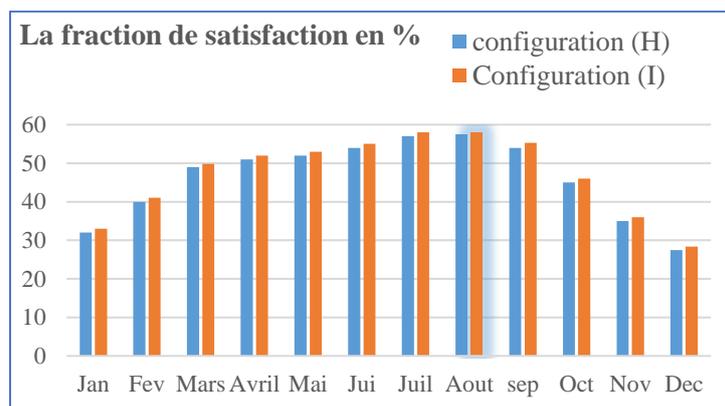


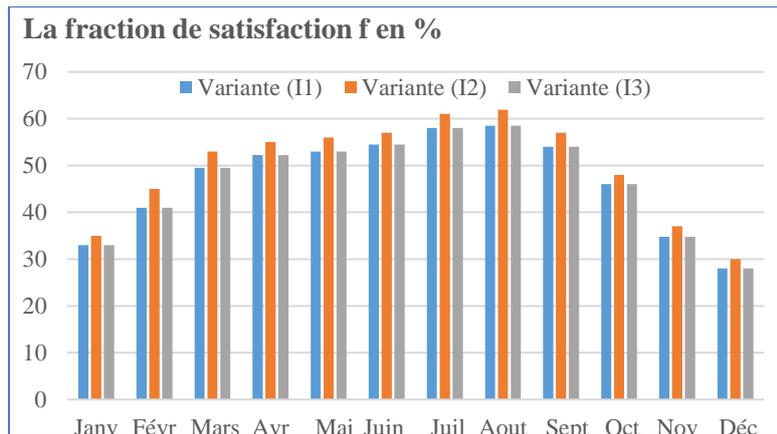
Figure III. 9 : Comparaison des configurations "H" et "I" pour la variante "3" à Bechar.

Partant de ces résultats on constate que la configuration de la cuve de stockage est montée de telle sorte qu'elle ait une arrête inclinée suivant la position du capteur (La configuration "I") reste la meilleure. L'écart entre les deux configurations est d'autant plus grand que l'on descend vers l'extrême sud. Ceci est dû au fait que la hauteur du thermosiphon est fonction de la latitude

par des relations géométriques dépendant du capteur. Pour la suite du travail on ne considérera que cette configuration.

b. Comparaison entre les variantes "11", "12" et "13".

Toujours pour les deux stations de Béchar et Tamanrasset on trace les histogrammes de la fraction de satisfaction du chauffe-eau solaire du CDER suivant les variantes "11", "12" et "13" en calage annuel.



La station de BECHAR

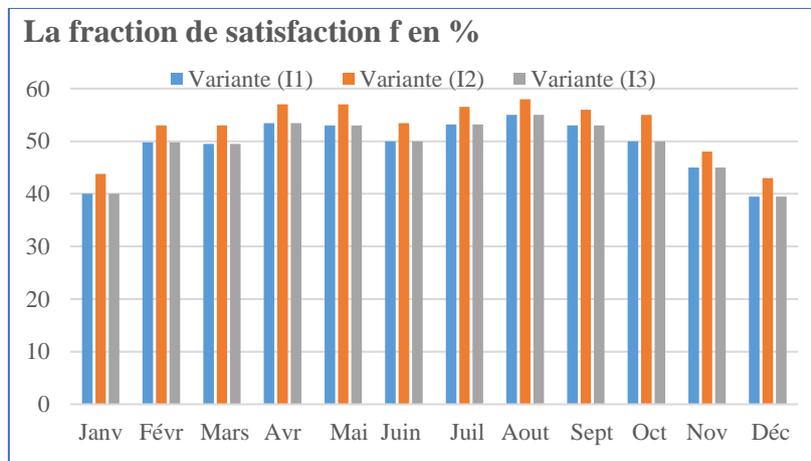


Figure III. 10: Comparaison entre les variantes "11", "12" et "13" sur les sites de Béchar et Tamanrasset

A partir de ces graphes on peut noter que la variante "12", non fabriquée par le CDER à cause du coût d'usinage de la cuve, présente les meilleures performances sur les deux sites. Cet apport est essentiellement dû au bon fonctionnement du capteur plan avec un débit d'écoulement d'eau uniforme dans toutes les colonnes. C'est cette variante qui sera retenue pour la suite de

l'étude. Il est à noter également que les pertes de charge introduites par la variante "I3" n'affectent que très légèrement les performances du système.

c. Comportement du chauffe-eau solaire du CDER en variante "I2" sur plusieurs sites sahariens.

Les performances thermiques à long terme du chauffe-eau solaire du CDER en variante "I2" et en calage annuel ont été calculées pour toutes les stations sahariennes retenues. Les résultats de ces calculs sont présentés par les histogrammes suivants :

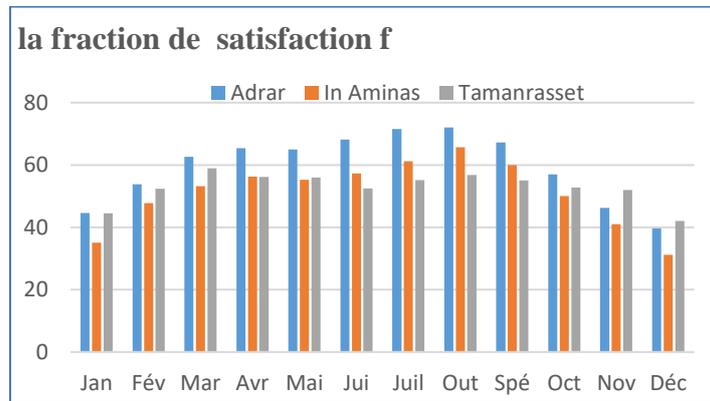


Figure III. 11 : Performances du chauffe-eau solaire du CDER en variante "I2" sur 3 stations sahariennes

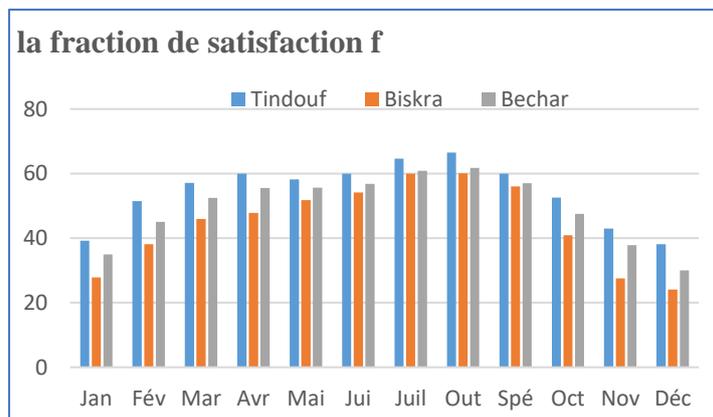


Figure III. 12 : Performances du chauffe-eau solaire du CDER en variante "I2", sur 3 stations sahariennes

Partant de ces résultats on peut conclure les observations suivantes :

- Le chauffe-eau du CDER tel qu'il est présenté, arrive à satisfaire entre 40 et 60% des besoins annuels moyens, en eau chaude sanitaire, d'une famille algérienne mégas située au sud de l'Algérie.
 - Cette satisfaction peut être nettement améliorée en période hivernale si le capteur plan est convenablement incliné ($\varphi+23$),
 - Les stations d'Adrar et de Tindouf présentent un potentiel énergétique très important.
 - On peut également constater que ce système se comporte d'une meilleure manière sur les sites sahariens de l'ouest (Béchar, Adrar et Tindouf). Sites pour lesquels la fraction diffuse du rayonnement solaire est relativement plus faible. Ce résultat met en garde contre la confusion que font certains entre chaleur et potentiel énergétique.
- Toutefois, la cartographie des performances exérgétiques de ce système reste à étudier avec beaucoup plus de détails et moyennant de plus denses données radiométriques.

4.2.2 Etude de différentes combinaisons cuve-capteur :

4.2.2.1 Les deux combinaisons étudiées :

Le chauffe-eau solaire cité par Malkin [9], représenté en figure III.12 et dont les caractéristiques sont données dans le tableau III.8 est très performant (comme indiqué par ses caractéristiques).

A titre d'illustration, le comportement à long terme et en calage annuel pour les stations d'Adrar et Béchar est montré au figure III.12

Tableau III. 4: Caractéristiques du chauffe-eau solaire étudié par Malkin [8]

La cuve de stockage.

La capacité réelle.....	MI-2501
Le diamètre interne.....	...Dc 0,49 m.
La hauteur de stockage.....	H=1.32 m
Le coefficient des pertes thermiques.....	(UA) 1,49 W/m ²

Les conduites d'entrée et sortie.

Longueur de la conduite d'entrée eau froide.....Lcond1= 4 m
Longueur de la conduite de sortie eau chaude.....	..Lcond2-3 m
Le diamètre des conduites entrées-sortie.....	D12=0,02 m
Le nombre de coudes du circuit.....	...Ncoud=5
Le coefficient des pertes à l'entrée.....	(UA)e-0.78 W/m ²

Le coefficient des pertes à la sortie..... $(UA)_{so} = 0,57 \text{ W/m}^2$.

Le capteur.

- Le nombre de panneaux..... $N_{cap} = 2$
- La surface de captation par panneau..... $A_c = 1,4 \text{ m}^2$
- Le nombre de colonnes par panneau..... $N_{col} = 10$
- Le diamètre d'une colonne..... $D_{col} = 0,005 \text{ m}$
- La longueur d'une colonne..... $L_{col} = 1,80 \text{ m}$
- La longueur du collecteur..... $L_{colc} = 0,78 \text{ m}$
- Le diamètre du collecteur..... $D_{colc} = 0,02 \text{ m}$
- Le facteur d'extraction de chaleur en test..... $Fr_{Ult} = 4.72 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$
- Le facteur optique en test..... $Fr_{Tot} = 0,80$
- Le débit test..... $mt = 71.5 \text{ kg/h.m}^2$

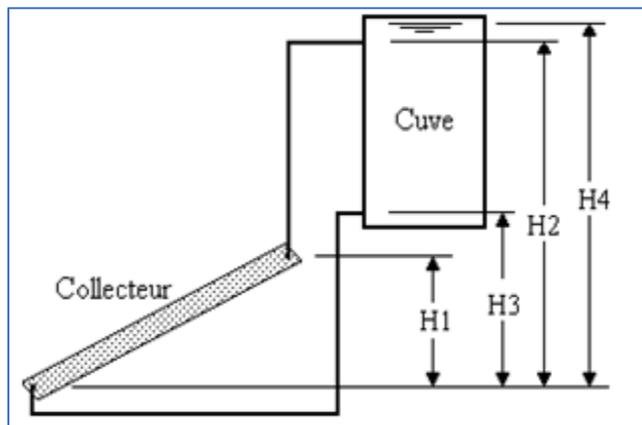


Figure III. 13 : Vue schématique du chauffe-eau solaire cité par Malkin [9]

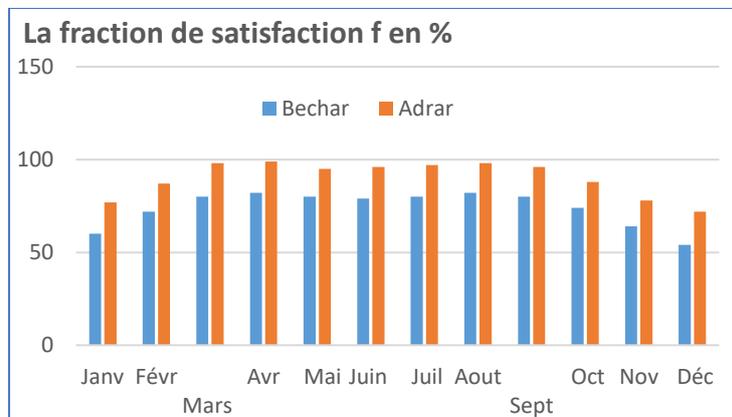


Figure III. 14: Performances du chauffe-eau solaire de Malkin. ($T = 60^\circ\text{C}$)

A partir des composantes des deux chauffe-eaux cités précédemment (Chauffe-eau du CDER et celui de Malkin) on considérera les deux combinaisons suivantes :

- 1- Capteur du chauffe-eau de Malkin + Cuve et tuyauterie du CDER : notée C1.
- 2- Capteur du CDER + Cuve du chauffe-eau de Malkin (Stockage stratifié) : notée C2.

4.2.2.2 Résultats et discussion :

Le programme écrit est utilisé pour calculer les performances des deux combinaisons (C1 et C2). Les résultats comparés à ceux du chauffe-eau du CDER sont présentés sous forme d'histogrammes (figures III.14 et III.15).

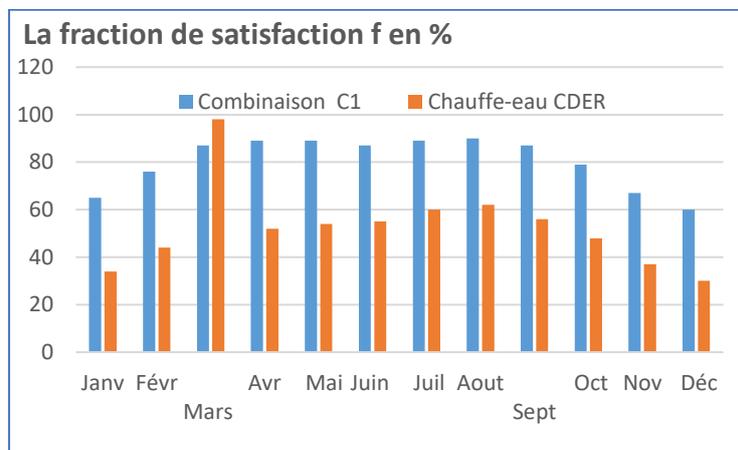


Figure III. 15: Comparaison des performances de la combinaison "C1" et du chauffe-eau du CDER à la station de Bechar. ($T=50^{\circ}\text{C}$)

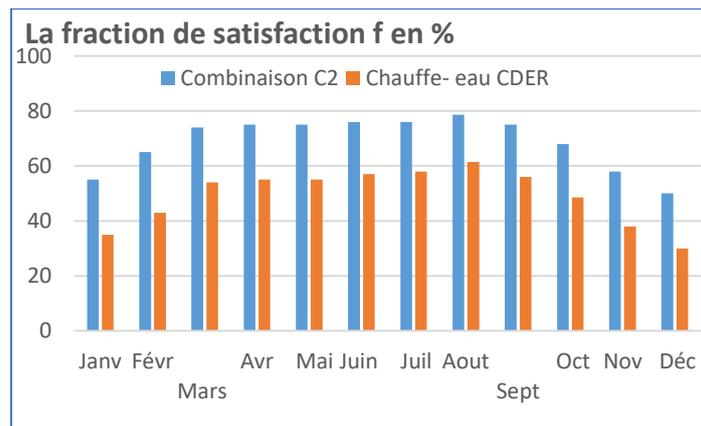


Figure III. 16 : Comparaison des performances de la combinaison "C2" et du chauffe-eau du CDER à la station de Bechar ($T, = 50^{\circ}\text{C}$)

A partir des figures III.14 et III.15 on peut noter que :

1- Les performances légèrement faibles du chauffe-eau du CDER sont essentiellement causées par :

a- Les faibles performances thermiques du capteur.

- Faible rendement optique.
- Grand facteur de pertes thermiques.

b - La cuve de stockage est sujette à d'importantes déperditions thermiques nocturnes. Ce phénomène a été même constaté lors du test expérimental où l'on a parfois enregistré jusqu'à 18°C de perte entre le soir et le matin.

c- La configuration actuelle de la cuve de stockage ne permet pas la stratification de l'eau chaude stockée.

2- Les performances du chauffe-eau solaire du CDER peuvent être nettement améliorées si on procède au changement de l'ensemble cuve-tuyauterie. A savoir : - Cuve cylindrique verticale.

- Plus grande hauteur de stockage.
- Meilleur calorifugeage de la cuve.

5 Conclusion

Les zones sahariennes représentent un gisement solaire très favorable pour le fonctionnement d'un tel système solaire.

Les différents modes d'exploitation du chauffe-eau solaire CDER dans les différents sites et configurations, et après comparaison avec ceux délivrés par un chauffe-eau plus performant (les données de la littérature), on a pu noter que :

- les sites sahariens d'Adrar, d'in Salah, de Tindouf et de Béchar présentent le meilleur potentiel énergétique.

- La version de chauffe-eau solaire du CDER, tel qu'il se présente, nécessite des modifications afin d'augmenter l'efficacité de système dans les périodes hivernales ; assurer une bonne étanchéité durant les fortes tempêtes. La cuve de stockage ne favorise pas la stratification de l'eau stockée, puisqu'elle est moins isolée. Elle est lourde et encombrée du point de vue conception et architectural reste inadaptable aux conditions climatiques hostiles du milieu désertique avec prix de revient est très élevée.

6 Bibliographie

- [1]. Klein, S.A., "A Design Procedure for Solar Heating Systems," Ph.D. Thesis, University of Wisconsin-Madison 1976
- [2]. Klein, S.A., et al. TRNSYS 12.2 User's Manual, University of Wisconsin-Madison, Engineering Experiment Station Report 38-12 1983
- [3] ASHRAE, Standard 95-1981, "Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Domestic Hot Water Systems," Proceedings of the 1982 ASES Passive Solar Conference, ASES (1982)
- [4] International Energy Agency, Summary of National Approaches to Shortterm SDHW Systems Testing, Technical report, August 1984
- [5] Morrison, G.L. and Braun, J. E., "System Modelling and Operation Characteristics of Thermosiphon Solar Water Heaters," Solar Energy, Volume 34, pp. 389-405, 1985 .
- [6] Blakem, V.M., «A long-term performance prediction method for solar domestic hot water systems" Thesis, University of Wisconsin-Madison (1989)
- [7] John A. Duffie, William A. Beckman (auth.)-Solar Engineering of Thermal Processes, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison Fourth Edition 2013
- [8] Harmim A. ' Contribution à l'estimation des performances exégétiques de différents systèmes solaires en milieu Saharien' Thèse de magister CDER 1994
- [9] Harmim A ; Rapport interne "bilan d'activité scientifique 2003.
- [10] Design of thermosiphon solar domestic hot systems by Mark. P Malkin: Master of Science 1985

Chapitre IV.



Isolation Thermique

(Lif de palmier dattier)

1 Introduction

En raison des préoccupations croissantes concernant le réchauffement climatique, il existe un fort intérêt pour les énergies renouvelables et leurs applications et leur intégration dans la communauté. Parmi les applications très Les capteurs solaires produisent de l'eau chaude par voie solaire afin de diminuer la quantité d'énergie nécessaire pour la production d'eau où chauffage domestique.

Bien que l'utilisation de capteurs solaires se développe, les producteurs demandent de constantes améliorations de la qualité, la performance et la productivité. Pour cela, les matériaux de construction ; l'isolant thermique par exemple ; jouent un rôle prépondérant. En évitant les pertes thermiques par l'arrière et les côtés des capteurs.

L'isolant thermique est caractérisé par le coefficient de conductivité ; plus il est faible, meilleur isolant. Les principaux matériaux utilisés pour les capteurs solaires thermiques sont la laine de roche, la laine de verre, des mousses de polyuréthane et autres. On retrouve parfois des isolants plus naturels.

Les matériaux locaux constituent une solution adéquate pour réduire les prix, et développer les communautés ; Compte tenu du coût élevé des matériaux industriels et de l'absence d'un vrai marché.

Le palmier dattier et ses dérivés apportent depuis l'Antiquité des solutions pour l'homme, notamment en milieu désertique. C'est une source de nourriture, en plus des différentes utilisations de ses différentes parties. Il joue un rôle important dans la préservation de l'environnement, lutte contre la désertification, en raison de sa capacité à s'adapter au climat désertique, facteur d'équilibre environnemental, économique et social des populations désertiques [1].

Le palmier dattier peut survivre dans une large gamme de températures allant de 0 jusqu'à 60 °C [2]. De plus, le palmier dattier a besoin de moins d'eau et d'entretien et sont moins sujets aux maladies que les autres arbres [3].

Ainsi, le palmier dattier représente un exemple éloquent de l'utilisation durable des ressources matérielles renouvelables.

Selon les données du ministère de l'agriculture et du développement rural, les palmiers dattiers en Algérie s'étalent sur une superficie de plus de 165.4 milles hectares. Bien que ce patrimoine soit réparti sur 27 wilayas du pays [4]. Les oasis de la wilaya d'Adrar occupent plus de 16 % du patrimoine national.

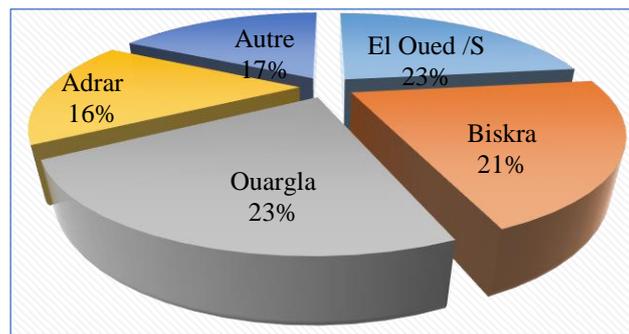


Figure IV. 1 : Répartition des palmiers dattiers de l'Algérie par wilaya [5].

2 Classification des isolantes thermiques :

Au cours des dernières décennies, les matériaux naturels sont apparus comme une solution viable aux problèmes environnementaux actuels et ont suscité l'intérêt des industriels et des chercheurs. Un isolant thermique limitant les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial pour optimiser les performances de système.

Trois principales catégories d'isolants thermiques sont utilisées : les isolants en mousse synthétiques, les isolants à base de matériaux d'origine minérale et les isolants à base de matériaux d'origines végétales [6]

2.1 Isolants minéraux :

Ce sont des fibres obtenues à partir de minéraux. Les variétés les plus connues dans l'industrie, la laine verre ; la laine de roche ; ...etc.

2.1.1 Laine de verre :

La laine de verre est une laine minérale, comme la laine de roche. Elle est obtenue à partir de silice, de verre de récupération, par fusion puis fibrage et polymérisation. C'est donc un matériau léger. Très performante et peu onéreuse, la laine de verre est le matériau d'isolation le plus vendu dans le monde. À base de minéraux incombustibles, la laine de verre n'est pas inflammable et offre une bonne résistance aux rongeurs. Elle perd ses qualités isolantes quand elle est humide contrairement à la laine de roche. [7]



Figure IV. 2 : Photo représentant la forme commerciale de la fibre de verre.

2.1.2 Laine de roche :

Les fibres de laine de roche sont liées à l'aide de résines synthétiques polymérisées pour former des rouleaux et des panneaux. La laine de roche est totalement perméable à la vapeur d'eau mais non hygroscopique. Elle est non capillaire et totalement perméable à l'air. Elle a une bonne stabilité thermique et une bonne résistance au feu. Elle est fortement compressible, mais elle possède une faible résistance au délaminage.



Figure IV. 3 : Photo représentant la matière isolante de la laine de roche.

2.2 Isolants végétaux.

Les isolants végétaux sont des variétés de fibres des matériaux naturels existant dans la nature, parmi lesquelles ; les fibres du bois qui sont les plus utilisées au niveau mondial, parmi lesquelles ; les fibres du bois qui sont les plus utilisées au niveau mondial, à cause de leur utilisation dans la fabrication des pâtes à papiers, tissu dans les industries du mobilier et la construction [8,9].

Les fibres végétales présentent une plus grande variabilité de leurs propriétés mécaniques ; Cette variabilité pose des inconvénients pour certaines applications industrielles.

Un autre inconvénient potentiel des fibres végétales est leur sensibilité à l'humidité. Par contre, leurs disponibilités en grandes quantités au prix bas.

2.2.1 Liège :

Elle est un isolant naturel, issu d'un arbre méditerranéen. Grâce à sa structure formée de millions de cellules remplies d'air immobile, le liège expansé est un très bon isolant thermique (96 % d'air). Son coefficient de conductivité thermique est situé entre 0,032 et 0,042 W/m. K.



Figure IV. 4 : Le liège aggloméré est disponible en plaques, dalles et rouleaux [10].

2.2.2 Fibre de bois :

Est assure d'excellentes performances pour l'isolation thermique. Son coefficient de conductivité thermique est compris entre 0,037 et 0,049 W/m.K. Elle est sensible à l'humidité; elle est facilement inflammable. Les fibres de bois sont obtenues à partir d'un défibrage des chutes de bois, en le trouve se forme des panneaux flexibles ou rigides et en volume. [11]



Figure IV. 5 : Fibres de bois défibrées des chutes de bois.

Comme il existe plusieurs types d'isolant végétal dont la conductivité thermique est faible peut remplir la fonction suitée, sous forme de panneaux, en rouleaux, rigide ou flexible.

Tableau IV. 1 : liste des isolants végétaux les plus utilisés

- Isolation au lin..... 0,037 et 0,040 W/m. K
- Isolation à la plume de canard..... 0,33 et 0,42 W/m.K.
- Isolation à la fibre de coco.....0,037 et 0,045 W/m.K.
- Isolation aux panneaux de roseaux.....0,056 W/m.k.
- Isolation à la ouate de cellulose.....0,038 et 0,043 W/m.k
- Isolation à la laine de coton.....0,037 et 0,040 W/m.K
- Isolation à la paille.....0,050 et 0,075 W/m. K

2.3 Fibres Animales

Les fibres animales sont plus coûteuses que les fibres végétales due à l'indisponibilité et sa limitation dans les marchés par rapport aux fibres végétales. Elles se classent comme la deuxième source naturelle [12]. Ces fibres pourraient être utilisées dans des applications plus sophistiquées telles que les applications biomédicales.

2.3.1 La laine de mouton :

C'est un isolant naturel, sain et écologique. C'est un bon isolant thermique, avec un coefficient de conductivité thermique entre 0,035 et 0,042 W/m.K.

Après la tonte, la laine subit différentes étapes : trempage, dégraissage, rinçage, traitements. Elle subit également un traitement spécial contre les mites, qui se nourrissent de la kératine de la laine.[13]



Figure IV. 6 : Photo représentant l'isolation de laine de mouton.

2.4 Isolants synthétiques

Il existe plusieurs types d'isolants synthétiques, nous citons quelques exemples :

2.4.1 Isolation au polystyrène extrudé (XPS)

Les performances thermiques du polystyrène extrudé (XPS) sont bonnes, avec une conductivité thermique très faible (entre 0,029 et 0,038 W/m.K). C'est un matériau assez léger ; sa grande résistance aux charges, il peut être employé pour les chantiers les plus contraignants, y compris les lieux humides.

Le polystyrène expansé (PSE) est instable dans le temps et peut perdre de son volume.

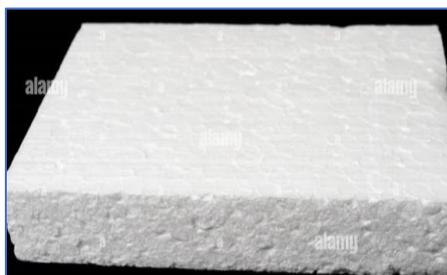


Figure IV. 7 : Photo représentant l'isolation de polystyrène.

2.4.2 Isolation au polyuréthane (PUR)

Le Polyuréthane (PUR) est un matériau fréquemment utilisé pour combler les défauts d'isolation. C'est un produit léger, efficace et adaptable.

Elle est l'un des isolants thermiques les plus performants, avec un coefficient de conductivité thermique de 0,022 à 0,030 W/m.K.

Le polyuréthane est proposé en mousse ou en panneaux. Sous forme de mousse, il convient particulièrement aux parties difficiles d'accès, où elle peut être projetée.



Figure IV. 8 : Photo représentant l'isolation polyuréthane.

3 Choix durable des matériaux d'isolation thermique

Le choix de l'isolant thermique est soumis à plusieurs impératifs dont le plus important est de bonnes performances thermiques. Parmi ces impérative en peut citer les fonctions suivantes :

- La résistance thermique de la paroi

- L'inertie thermique de la paroi
- La perméabilité à la vapeur d'eau
- La résistance à la compression
- La flexibilité et compressibilité de l'isolant

Pour les isolants à base de matières premières minérales et pétrochimiques, les performances sont généralement connues avec précision par leurs agréments techniques. Les matériaux à base de matières premières végétales ou animales ne disposent pas tous de performances certifiées par les organismes nationaux ; mais peuvent disposer de valeurs déclarées sur la base de différentes normes étrangères.

Dans le tableau suivant on donne quelques performances techniques des isolants thermiques

Tableau IV. 2: Quelques isolants utilisés pour les capteurs thermiques.

Matériaux	Conductivité thermique
Laine de roche	0,032 - 0,040 W/m.K
Laine de verre	0,030 - 0,040 W/m.K
Mousses de polyuréthane (étanchéité)	0,022 - 0,030 W/m.k

Récemment, des chercheurs se sont intéressés aux déchets de palme comme source de fibres naturelles, aux bonnes propriétés thermiques et mécaniques, pour développer de nouvelles matières actives utilisables dans des produits à faible valeur.

Des travaux expérimentaux ont été menés pour étudier certaines propriétés physiques des variétés de palmiers dattiers. Un cuiseur solaire a été isolé thermiquement par les rejets de palmier, et évalue l'effet de l'orientation des fibres et les températures atteintes. Les résultats de cette étude révèlent une faible conductivité thermique par rapport aux autres matériaux conventionnels utilisés dans ce domaine [14].

Dans le domaine de la construction, une étude a été menée sur la possibilité d'inclure les fibres de palmier comme nouveau matériau d'isolation dans la construction [15]. Également d'autres ont rapporté un état de l'art des matériaux isolants thermiques et acoustiques innovants réalisés à partir de matériaux naturels ou recyclés. [16]



Figure IV. 9 : Photo représentant la récolte de FDEM

Dans le Sahara algérien, le palmier dattier est le pilier des écosystèmes oasiens où il permet de limiter les dégâts d'ensablement, protecteur contre le rayonnement solaire intense pour les cultures sous-jacentes (arbres fruitiers, cultures maraîchères et céréales).

Il a de plus un rôle socio-économique majeur pour les populations de ces régions pour lesquelles il fournit d'une part un fruit, dont les qualités alimentaires sont indéniables et qui constitue une source de revenus très appréciables, d'autre part une multitude de sous-produits (culinaire, artisanal et menuiserie...). [17]

4 Description du palmier dattier

Notre étude s'intéresse uniquement aux fibres extraites entre le Kornef et le tronc (FDEM, Lif) de palmier dattier. Les autres organes sont pleins de fibre mais la fibre de FDEM est caractérisée par sa forme originale comme structure poreuse ordonnée.

Les différentes surfaces de lif ont été collectées à partir de palmiers dattiers de la région d'Adrar et plus précisément ceux se trouvant au sein de l'URERMS.

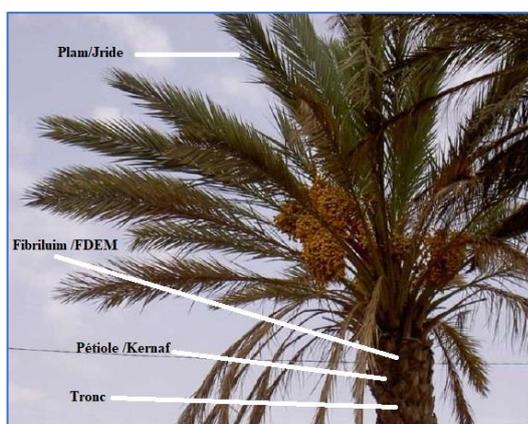


Figure IV. 10 : Les organes fibreux de palmier dattier.

Le palmier dattier a une structure fibreuse, possédant cinq types de fibres [18] :

- Fibres de bois du tronc ;
- Fibres de tige au niveau des tiges des pédoncules et du support dattier (grappe) ;
- Fibres de feuilles au niveau des pédoncules ;
- Fibres de surface autour de son tronc ou de base de palmes (pétiole) ;
- Fibres de lif (Fibrillium) (entre les Kornaf, le tronc est recouvert d'une bourre fibreuse que l'on appelle le lif).

Le palmier dattier est composé en général d'un tronc unique non ramifié possédant au sommet une couronne de feuilles. En ce qui suit on va identifier les différents types de bois constituant le palmier dattier :

Le palmier dattier se compose de parties de base, les racines, la tige et la tête, et chaque partie a sa propre importance et ses propres détails. Aussi, certains organes peuvent jouer en quelque sorte le rôle d'isolant thermique, mais dans cette partie l'intérêt principal est limité au FDEM en tant qu'isolant thermique.

4.1 Les Racines :

Le système racinaire du palmier dattier est fasciculaire, les racines ne se ramifient pas et n'ont relativement que peu de radicelles. Le bulbe ou plateau racinal est volumineux et émerge en partie au-dessus du niveau du sol.

4.2 Le Tronc :

C'est un stipe généralement cylindrique, très garni en lif. Son diamètre est de 45 à 55 cm, son élongation s'effectue dans sa partie coronaire par le bourgeon terminal ou phallophore [19]. Il reste couvert pendant de nombreuses années des bases foliaires des anciennes feuilles desséchées qui finissent par tomber.

4.3 Fibrillium (lif):

La fibre de surface de palmier dattier est "Lif " en Arabe. Le Fibrillium est la gaine de fibres qui entourent le stipe entre les bases des palmes. Il est constitué de la superposition de trois treillis, et la forme d'une plaque presque rectangulaire de longueur 300-500 mm et de largeur de 200-300 mm Le rôle écologique des fibres de surface de palmier est de renforcer le

tronc et le protéger contre les chocs extérieurs et la chaleur du désert. Pendant l'entretien annuel des palmiers, chaque palmier peut se débarrasser d'environ 3kg de Fibrillium [20].

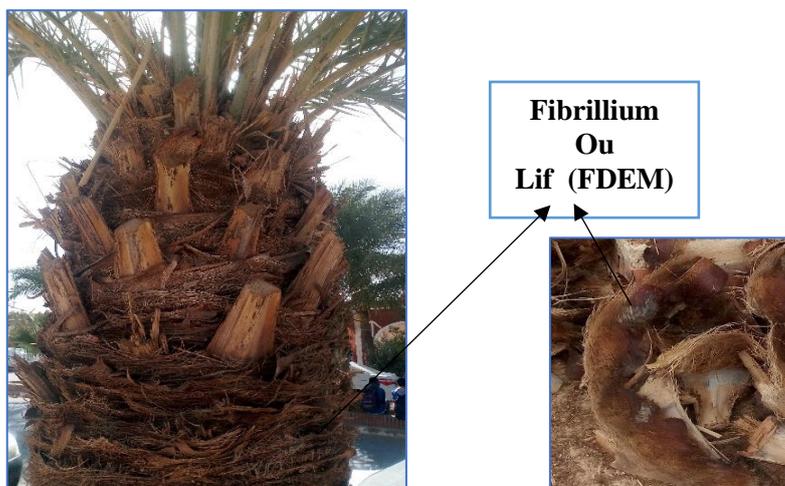


Figure IV. 11 : Le Fibrillium et son emplacement dans le palmier

Également cette partie est utilisée comme matériau de renfort pour le mélange de boue afin de renforcer le toit et d'éviter les fissures qui peuvent apparaître dans l'épaisseur de la boue placée.

Dans le tableau VI.2 en citer quelque utilisation des organes et le rejet de palmier dattier dans les divers activité traditionnel et artisanal de la région

Tableau IV. 3 : tableau montre certaines industries qui dépendent des parties du palmier dattier

Partie de palmier daté	Industries dépendantes
	Toits/ poutre poteaux / portes / ponts pour les piétons /pour le chauffage
	Brise-vent / Construire des huttes et des tentes
	Fabrication de paniers / chapeaux / éventails / balais / sacs de rangement des dattes.
	Cordes / rembourrage des meubles et oreillers / bain / nettoyage des récipients alimentaires.
	L'alimentation animale ;

Dans le figures IV.12 et IV.13 des terrasses qui construits par pétiole opposé, quartiers de troncs et la boue d'argile renforcée par lif (FDEM), maison de ksour du Touat.

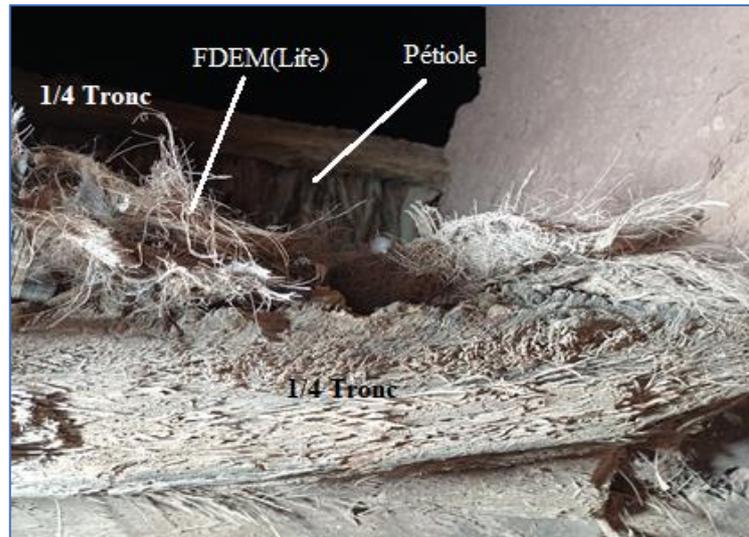


Figure IV. 12 : Photo représentant un toit construit de composite boue et fibre



Figure IV. 13: Quartiers de troncs de palmiers forment des supports de toit

Le commerce du palmier dattier dans la wilaya d'Adrar est d'une importance primordiale dans l'économie familiale, en termes de nombre de palmiers dattier 2.4 million. Les palmeraies de la wilaya sont particulièrement concentrées dans la commune de Timi et Sali.

Tableau IV. 4 : distribution des palmier dattier dans les différentes communes

Commune	Hamra	Tinacer	Aghamou	Teggaza	Takarbouche	Autres
Tsabit	71885	16245	3545	7450	1985	19290
Sbaa	44.310	12100	2050	4610	1020	11830
Adrar	134.600	10320	40010	7090	8400	10680
Timi	152661	25060	72880	33840	20270	91429
Bouda	45420	11900	28820	18000	9850	20000
Tamantit	46660	17150	880	12960	4290	3780
Fenoughil	64560	5520	8640	21600	2740	4610
Tamest	61740	6220	-	22510	6240	27590
Z.kounta	73290	11930	7340	54870	4650	32800
Inzegmir	61125	4920	-	111420	-	12869
Sali	1327304	42750	-	130650	9740	26640
Reggane	102460	28360	-	97380	7790	15730
Aoulef	2390	6520	-	43950	1720	27210
Timogten	4780	11080	-	68680	3470	42120
Tit	-	3460	-	10420	-	3490
Akabli	-	1485	-	14920	350	6830

Sur le figure IV.13 on présente le nombre total des palmiers contés dans le territoire d'Adrar, ce qui permet de récolter une quantité de lif dont le but est utilisé comme matériau isolant.

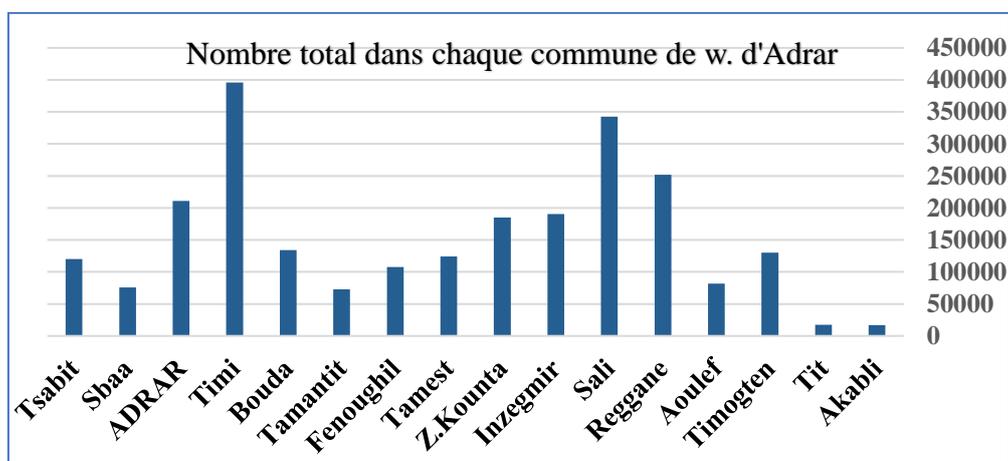


Figure VI. 13: Distribution des palmier dattier dans les communes de w. d'Adrar (D.S.A d'Adrar)

5 Caractérisation thermique des matériaux isolants

Ce paragraphe propose dans un premier temps de faire quelques rappels sur les propriétés thermiques des matériaux. L'objectif visé est de connaître la valeur ajoutée avec ce matériau éco-matériaux dans le domaine de constructions où le caractère isolant des fibres naturelles est essentiel. Il est donc indispensable de connaître parfaitement leur comportement thermique.

La majorité des travaux portent sur l'association de la fibre du palmier dattier avec une autre substance de base liant comme le ciment dans la construction ou de l'argile dans les constructions traditionnelles. Le but recherché dans la plupart des cas est d'apporter un renfort mécanique en introduisant des « fibres ».

L'intérêt est d'utiliser des matériaux cellulosiques (chutes, copeaux, papier,) afin d'apporter un moyen de les valoriser. Il s'agit également de faciliter et diversifier les matériaux durables, sans dépense.

Depuis l'antiquité, les fibres naturelles ont été utilisées comme renfort dans diverses applications (habitation, poteries...).

6 Propriétés thermiques

D'un point de vue thermique, quatre propriétés intrinsèques caractérisent un matériau : la conductivité thermique, la capacité calorifique, la diffusivité thermique et l'effusivité thermique. Parmi ces dernières, deux seulement sont indépendantes. En conséquence, la connaissance de deux d'entre elles suffit à la déduction des deux autres.

6.1 La conductivité thermique :

C'est une mesure de la capacité d'une substance à transférer de la chaleur à travers un matériau par conduction, et s'exprime en (W /mK) [21].

La conductivité thermique de la plupart des liquides et des solides varie avec la température. Pour les vapeurs, cela dépend aussi de la pression. En général :

En régime permanent, dans le cas le plus simple de l'écoulement unidimensionnel de chaleur à travers un mur homogène d'épaisseur (e) et de températures uniformes T_1 et T_2 , Ce flux de chaleur Φ (W) s'exprime sous la forme :

$$\Phi = \frac{\lambda}{e} * S(T_1 + T_2) \quad (\text{IV-1})$$

Avec : S : la surface traversée par le flux (m²)

T₁-T₂ la différence de température (K)

e : épaisseur du matériau (m)

λ : conductivité thermique en (W /mk)

Φ : flux de chaleur(w)

6.2 La capacité calorifique :

La capacité calorifique massique à pression constante C_p s'exprime en $J/Kg.K$ et peut être assimilée à la quantité d'énergie à apporter à un kilogramme de matière pour élever sa température d'un Kelvin [22]. Cette propriété reflète donc l'aptitude du matériau à emmagasiner de l'énergie et à restituer la chaleur. En métrologie thermique, la capacité calorifique apparaît souvent sous la forme d'une capacité volumique qui s'exprime donc par le produit ρc en $J.m^{-3}.K^{-1}$ en faisant intervenir la masse volumique ρ du matériau.

6.3 La diffusivité thermique :

La diffusivité thermique notée a exprimée en m^2/s est la grandeur qui régit le comportement thermique d'un matériau en régime transitoire Elle caractérise l'aptitude du matériau à transmettre la chaleur plus ou moins rapidement [23]. Cette grandeur est reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation :

$$a = \frac{\lambda}{\rho c_p} \quad (IV-2)$$

λ : est la conductivité thermique du matériau (en $W m^{-1} K^{-1}$);

ρ : masse volumique (kg/m^3),

C_p : Capacité thermique massique à pression constante ($J kg^{-1} K^{-1}$).

6.4 L'effusivité thermique :

L'effusivité thermique E en $J/K.m^2.s^{(1/2)}$ traduit la capacité d'un matériau à échanger de la chaleur avec son environnement. Plus précisément, cette propriété rend compte de la sensibilité de la température de surface d'un matériau à une variation du flux de chaleur reçu par cette surface. Ainsi, un matériau très conducteur et très capacitif aura une température de surface peu sensible à des variations de flux et sera donc très effusif. Cette propriété est reliée à la conductivité thermique et à la capacité calorifique volumique par la relation :

$$E = \sqrt{\lambda \rho c} \quad (IV-3)$$

6.5 L'absorptivité d'eau :

La fibre de surface du tronc du palmier dattier, a été obtenue du palmier de ville d'Adrar. Les fibres ont été séchées à l'état ambiant après lavage et nettoyage. Malgré la sensibilité de ce matériau isolant à l'eau et à l'humidité, des études indiquent que lorsque les fibres de palmier sont traitées de la résine [21] ; et qu'il est court, son taux d'absorption d'eau diminue [20,22].

En outre, les composites à base de fibres de tronc de palmier auraient la plus grande absorption d'eau par rapport aux composites à base de fibres des autres parties du palmier [23].

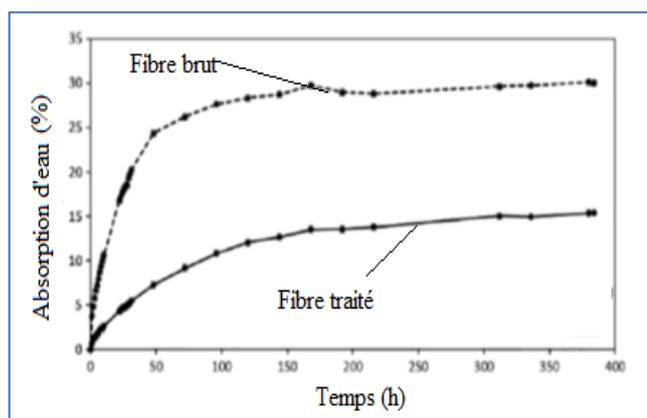


Figure IV. 14 : l'absorption d'eau des composites phénoliques renforcés de fibre de palme non traitée et traitée.

6.6 Dégradation thermique

L'analyse thermogravimétrique (ATG) des fibres traitées et non traitées. Les deux courbes montrent que la décomposition des fibres a commencé vers 250 °C. Les fibres se sont dégradées en trois étapes. La première étape de 40 à 120 °C était due à l'évaporation de l'humidité. La deuxième transition la plage de température de la décomposition était de 195 à 400°C était liée à la dégradation des substances celluloses, telles que l'hémicellulose et la cellulose [22]. La troisième étape (400–469 °C) de la décomposition était due à la dégradation des matériaux non celluloses dans les fibres [23].

Les résultats du TGA indiquent que la réaction de mercerisations améliore la résistance thermique des fibres en éliminant l'hémicellulose, qui est plus sensible à la dégradation thermique [23].

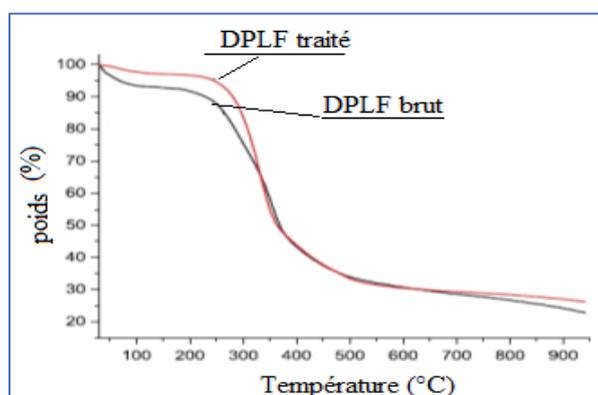


Figure IV. 15 : Thermogravimétrie courbe des fibres de palme brut et traitées. [24]

7 Techniques de mesure des propriétés thermiques :

Il existe différentes méthodes permettant de mesurer la conductivité thermique des matériaux. Ces méthodes peuvent être directes ou indirectes. En effet, la conductivité thermique est le produit de la diffusivité thermique (α), de la masse volumique (ρ) et de la chaleur spécifique (C_p). Ainsi, il est possible de mesurer directement la conductivité thermique ou ses composantes. [25]

Les techniques expérimentales de mesure de la conductivité thermique connaissent un important progrès. Pour accéder à cette mesure. Une des faces de l'échantillon à étudier est soumise à un flux thermique d'une durée dépendant de la nature du milieu étudié. Un suivi de l'évolution de la température en fonction du temps permet alors de déduire la conductivité thermique. La relation liant la variation de la température et l'évolution du temps dépend du modèle thermique utilisé pour identifier cette dernière [26].

Tableau IV. 5: propriétés physique et mécanique du lif (FDEM)[27]

Physique			Mécanique		
Densité (gm/cm ³)	Diamètre (µm)	L(mm)	Résistance à la traction MPa	Force spécifique (MPa/gm/cm ³)	Elongation (%)
1.3-1.45	100-200	10-300	215-45	165 38-353.08	-

8 La composition chimique

Le bois est un matériau très hétérogène ; sa composition chimique est complexe. On peut classer les matériaux de structure en trois catégories : la cellulose, les hémicelluloses et les lignines, organisées dans une structure composite [28].

La composition chimique pourrait être déterminée en utilisant les méthodes standard TAPPI. Le test est effectué pour déterminer les pourcentages en poids de chaque composant selon les normes numéro T 203 cm-09, T 223 cm-10 et T 222 om-11 respectivement.

Les résultats des analyses chimiques du lif sont présentés dans le tableau IV.4.

Tableau IV. 6: Composition chimique du lif (FDEM) [27]

Cellulose (wt %)	Hémicellulose (wt %)	Lignine (wt %)
47.5	12.64	39.86
43-50	8-19	24-32

9 Vérification de l'efficacité de l'isolation moyennant le « FDEM ».

Dans une expérimentation similaire à celle de notre application, Harmim et al. (2002) a utiliser lif de palmier dattier comme isolant. L'efficacité d'isolement est comme s'en présenté à la figure suivent

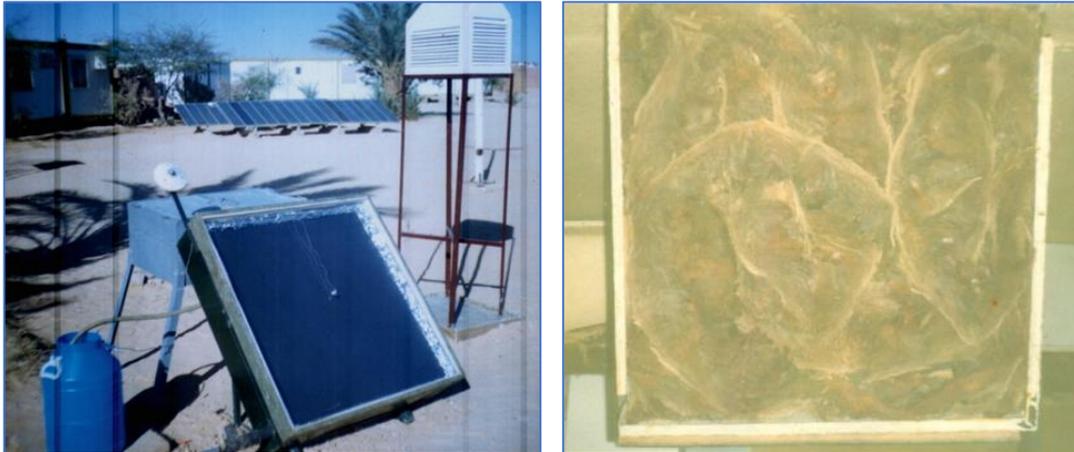


Figure IV. 16 : Photo de prototype capteur-stockeur (Harmim et al)

L'évolution des températures relatives à la plaque arrière de l'absorbeur (T_{abs}) et celle de la plaque arrière du bac (T_{bac}) qui est en contact direct avec l'ambiance ; reste assez important ($T_{abs}-T_{bac} \geq 30$) alors que le système est exposé à une ambiance très froide [29].

Ce résultat valorise la performance de ce matériau comme isolant thermique à utiliser pour ce genre de système.

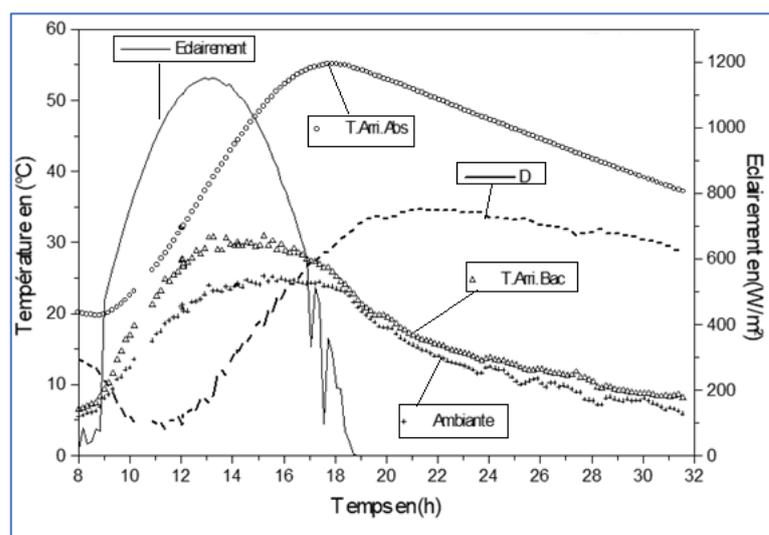


Figure IV. 17 : Evolution du gradient de température « D » entre la surface arrière

10 Conclusion

La lif de palmier dattier sont des morceaux de tissu en matière végétale sèche, localement connus sous le nom de « FDEM » et en arabe littéraire « El Massed » ; on le récupère au niveau du tronc du palmier. Est un tissu naturel de fibres croisées de différents diamètres. Ils ont une structure fibreuse et forment une couche poreuse lorsqu'ils sont superposés les uns sur les autres.

C'est l'un des vestiges du palmier dattier, que les grands-parents utilisaient pour résoudre de nombreux besoins ménagers. D'autre part, ses propriétés physiques thermique et mécanique ont encouragé les chercheurs d'introduire dans les domaines de construction comme matière composite, et de renforcement.

L'utilisation de ce produit dérivé du palmier contribue à la valorisation et la promotion de cet arbre qui constitue un support important pour la protection de l'environnement des oasis sahariennes.

Lorsque ces morceaux de FDEM sont superposés les uns sur les autres, le matériau se comporte comme un isolant thermique dont leur conductivité thermique a été rapporté dans les divers application se forme de fibre entre 0,475 et 0,0697 W/mK.

11 Bibliographie :

- [1] Biotechnologies du palmier dattier https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers12-09/010051487.pdf
- [2] Barreveld, W. H. Date palm products. FAO Agricultural Services Bulletin No. 101-1993
- [3] El-mously .H, The industrial use of the date palm residues: an eloquent example of sustainable development, Second International Conference on Date Palms (Al-Ain, UAE, March 25-27, 2001)
- [4] REKIS Abdelkrim, Conservation des ressources phylogénétiques en Algérie. Cas des palmiers dattiers cultivés et sub-spontanés (Phoenix dactylifera L.). Thèse Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra Avril 2021.
- [5] Laouini, Salah Eddine « Etude phytochimique et activité biologique d'extrait de des feuilles de Phoenix dactylifera L dans la région du Sud d'Algérie (la région d'Oued Souf) » Doctoral thesis, Université Mohamed Khider Biskra 2014
- [6] I.M. De Rosa, C. Santulli, F. Sarasini, "Acoustic emission for monitoring the mechanical behaviour of natural fibre composites: A literature review," Composites: Part A, vol. 40, pp. 1456–1469, 2009 [4].
- I isolation thermique et efficacité énergétique ; INSA /1997
- [7] https://isolation.ooreka.fr/comprendre/isolation_thermique
- [8] Chandramohan D. and Marimuthum .K, A review on natural fibers 2011, www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue2/IJRRAS_8_2_09.pdf
- [9] Sbiai, A. (2011) Matériaux composites a matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier: Effet de l'oxydation au tempo sur les fibres. Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon.
- [10] Benz GmbH & Co. KG Baustoffe, Matériaux d'isolation écologiques, /2020
- [11] Guide des matériaux isolants pour une isolation efficace et durable par l'ADEME
- [12] Abdul Aziz Jamil, isolation thermique et efficacité énergétique STPI/P6/2017-39
- [13] <https://www.toutsurlisolation.com/isolant-biosource>.
- [14] Harmim A., Boukar M. et Amar M. « Etude expérimentale d'un cuiseur solaire de type boîte à trois réflecteurs plans et une surface d'ouverture inclinée » Solar energy Vol. 10 N°1 (2007) 31 – 38
- [15] Mohamed E. Ali et Abdullah Alabdulkarem, On thermal characteristics and microstructure of a new insulation material extracted from date palm trees surface fibers. Construction and Building Materials 138 (2017) 276–284
- [16] Asdrubalia .F, D'Alessandro .F, Schiavon .S, A review of unconventional sustainable building insulation material, Sustainable Materials and Technologies, Volume 4, July 2015, Pages 1-17
- [17] Nadia Bouguedoura, Abderrahmane Benkhalifa et Malika Bennaceur, <https://books.openedition.org/irdeditions/10714>

- [18] W.Y. Feng, Z. Wang, W.J. Guo. A study on chemical composition and fiber characteristics of two sympodial Bamboos. Research Report. Beijing: Research Institute of Wood Industry, CAF, 2002
- [19] D. Sibihi, *Materiaux composites à matrice époxyde chargée par des fibres de palmier dattier : effet de l'oxydation au tempo sur les fibres*. Thèse doctorat, INSA De Lyon, 2011.
- [20] F.M. Al-oqla and S.M. Sapuan, *J. Clean Prod.*, 66, 347 (2014).
- [21] F.A. Al-Sulaiman, *Appl. Compos. Mater.*, 9, 369 (2002).
- [22] H. Kaddami, A. Dufresne, B. Khelifi, A. Bendahou, M. Taourirte, M. Raihane, N. Issartel, H. Sautereau, J.F. Gérard, and N. Sami, *Compos. A Appl. Sci. Manuf.*, 37, 1413 (2006).
- [23] D. Shanmugam and M. Thiruchitrabal, *Compos. Interfaces*, 21, 3 (2014).
- [24] Azwa ZN, Yousif BF, Manalo AC, Karunasena W. A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres. *Mater Des* 2012.
- [25] Huda MS, Drzal LT, Misra M, Mohanty AK, Williams K, Mielewski DF. A study on biocomposites from recycled newspaper fiber and poly (lactic acid). *Ind Eng Chem Res* 2012;44 (15):5593–601
- [26] Saheb D, Jog J. Natural fiber polymer composites: a review. *Adv Polym Technol* 1999;18 (4):351–63.
- [27] Alireza Dehghani, Sara Madadi Ardekani et al, Mechanical and thermal properties of date palm leaf fiber reinforced recycled poly (ethylene terephthalate) composites., *Materials and Design* 52 (2013) 841–848 <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2013.06.022>
- [28] Taha I, Steuernagel L, Ziegmann G (2006) Chemical modification of date palm mesh fibres for reinforcement of polymeric materials. Part I: examination of different cleaning methods. *Polym Polym Compos* 14:767
- [29] A. Harmim, M. Boukar et M. Gahgah « Valorisation de l'écorce du palmier comme matériau isolant pour le développement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur installé en milieu saharien » Premier Congrès International de Mécanique, Université de Constantine, du 14 au 16 décembre 2002.

Chapitre V.



Banc d'essai
Expérimentation
Discussion et perspectives

1 Introduction générale

La diffusion des chauffe-eau solaires exige des efforts considérables pour les adapter aux besoins des régions sahariennes : En particulier par la prise en compte des moyens financiers très limités, des conditions climatiques très hostiles, de la disponibilité des matériaux et du savoir-faire local. Les chauffe-eau solaires semblent la solution idéale pour répondre aux besoins d'eau chaude des ménages dans les milieux ruraux.

Les chauffe-eau solaires les plus couramment utilisés sont constitués d'éléments séparés : le capteur plan et la cuve de stockage. De ce fait, le coût de ce genre de système reste toujours élevé et le pouvoir d'achat des citoyens aussi reste très bas malgré la politique de subventions d'état et les modalités de paiement. L'existence d'un vrai marché national et une industrie locale jouent un rôle essentiel pour la vulgarisation et l'implantation de ces systèmes dans programme national. Une simplification consiste à la réalisation de systèmes rustiques où les matériaux locaux sont la base de constructions afin de :

- Réduire le prix de revient par rapport à celui existant ;
- Sensibiliser la communauté à la nécessité d'aller vers des solutions disponibles et environnementale ;
- L'adaptation du système aux conditions d'exploitation en milieu saharien ;
- L'intégration des produits de construction locaux ;
- peu encombrant.

Le solaire thermique permet de fournir de l'eau chaude sanitaire. C'est une bonne alternative au chauffe-eau électrique pour les habitats individuel et famille à petite échelle. L'adaptation et l'intégration de matériaux locaux pour la construction d'un chauffe-eau solaire apportèrent une vraie solution pour les régions désertiques isolées, pour répondre à leur besoin en matière d'eau chaude. Les matériaux constituant le dispositif sont des tôles formées en acier et des tubes en cuivre et des feuilles de lif de palmier constitue l'isolation ; les toutes sont rassemblées et montés sur un cadre en bois. Le niveau de température atteint montre que sa contribution n'est pas nulle, et l'implantation dans l'habitation en milieu saharien Algérien doit tenir compte de ce genre de service, et ainsi répondre aux besoins des ménages en matière d'eau chaude sanitaire. La rampe supérieure de l'échangeur est isolée pour nous permettre de

minimiser la déperdition dans la partie supérieure du système. L'étude expérimentale a montré que le système aux conditions climatiques (vent, pluies) reste robuste et efficace.

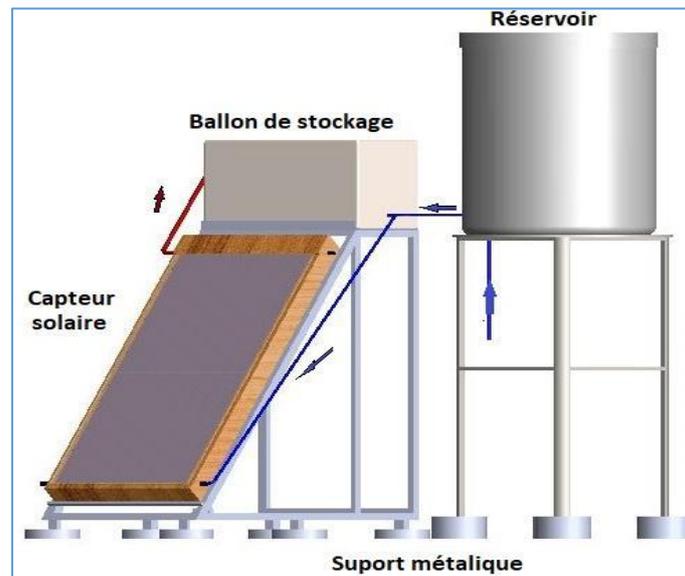


Figure V. 1: Schéma représentant le système de chauffe-eau solaire

Ce chauffe-eau solaire se compose principalement d'un capteur plan et ballon de stockage séparé, reposant sur un support métallique. Un circuit de raccordement fermé relie les deux éléments.

2 Composantes du chauffe-eau solaire réalisé

2.1 Le capteur solaire plan :

2.1.1 Description du capteur solaire plan expérimental :

Comme montré en figures V.1, le capteur solaire fabriqué se compose essentiellement d'un absorbeur en deux parties tôle en acier ordinaire et d'un échangeur en cuivre pour transporter le fluide caloporteur.

L'isolation thermique est assurée par des morceaux en feuille disposée du palmier dattier appelé « FDEM », posée à l'intérieur d'un bâtier qui forme l'enveloppe globale maintenue la rigidité de capteur. La spécificité du capteur plan réalisé, que le collecteur supérieur de l'échangeur est isolé complètement pour minimiser les déperditions, en plus les matériaux de réalisation sont disponibles.

Les caractéristiques générales de ce chauffe-eau sont données dans le tableau suivant.

Tableau V. 1 : Caractéristiques techniques du capteur solaire plan réalisé.

Elément de CES	Nature	Dimensions
Bac	Bois	- 1710 × 800 × 110 mm
Surface d'ouverture		- 1504×700
Vitrage	Verre ordinaire	- Epaisseur=3 mm,
Absorbeur	Acier ordinaire Revêtement	- Epaisseur = 0.8 mm - peinture noir mat
Collecteur (Echelle)	Cuivre N° de segment	- Longueur= 19m, Di/De – 20/22 - 7 (1602×902)
Isolation	Feuilles en fibre de palmier Bois	- Epaisseur Arrière- 40 mm - Face Latérale 40 mm

Les caractéristiques techniques sont données au tableau V.1, avec une surface d'ouverture est égale à 1.05 m², monté sur un support incliné de 50 degrés

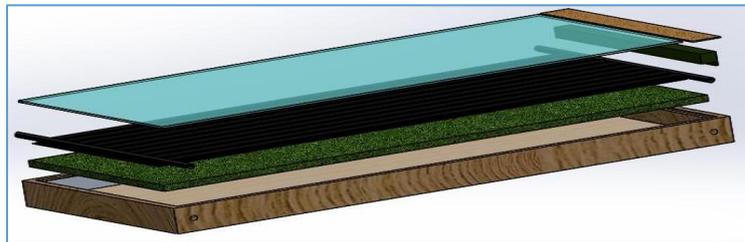


Figure V. 2 : Schéma représentant les composantes du capteur solaire plan

2.1.2 Composantes du capteur solaire réalisé :

2.1.2.1 Absorbeur :

Dans tout capteur, l'absorbeur joue le rôle principal. Il est l'un des éléments très importants du capteur, notre absorbeur se compose de deux parties échangeur en tubes parallèle 'échelle' en cuivre de diamètre Ø22 mm posé sur une tôle en acier d'épaisseur 0.8mm figure 2.



Figure V. 3: Image de l'élément absorbant (tube / plaque métallique).

2.1.2.2 Caisson du capteur solaire

Est un cadre en bois traité avec de l'huile de lin pour fournir une protection mécanique et thermique ; dont les côtés longitudinaux internes sont équipés de rainures pour faire coulisser

l'absorbeur et installer la planche arrière. Deux tiges filetées avec écrous sont également installées entre les côtés pour renforcer le cadre (Fig. 4).

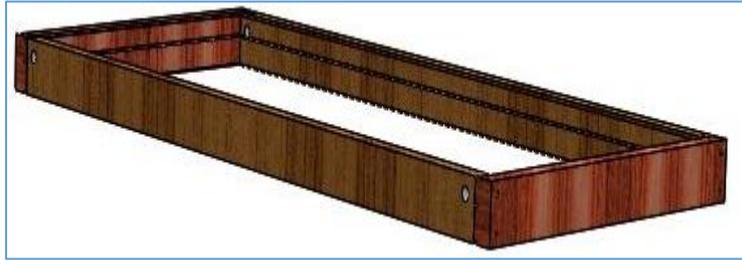


Figure V. 4 : Schéma représentant le caisson en bois



Figure V. 5: Structure de caisson en photo avec des tiges de renforcement.

2.1.2.3 Isolation thermique :

Le matériau choisi pour l'isolation doit avoir un coefficient de conductivité faible car plus ce coefficient est faible, plus le matériau est isolant. Comme montré sur la figure 3. La fibre de palmier dattier est un isolant rustique extrait de palmier dattier. Ces morceaux de tissu en matière végétale sèche, localement connus sous le nom de « FDEM » et en arabe littéraire « El Massed » ; sont récupérés au niveau du tronc du palmier. Ils ont une structure fibreuse et forment une couche poreuse lorsqu'ils sont superposés les uns sur les autres.

L'épaisseur de la couche arrière est de 4 cm.



Figure V. 6 : La fibre de palmier utilisée comme isolant thermique dans le capteur.

2.1.2.4 Préparation d'isolation :

Les fibres de surface du tronc du palmier dattier, a été obtenue du palmier au sein d'unité URERMS Adrar, ont été séchées après lavage à l'eau. Afin d'améliorer la résistivité contre le mouillage et l'absorption d'eau ; une couche de peinture vernie en pression sur les surfaces des fibres. Dans le but d'unifier la teneur en humidité des fibres, les feuilles de FDEM sont placées dans la même condition de séchage à l'air ambiant pendant 24 h avant utilisation pour la préparation du plancher isolant.



Figure V. 7 : Panneau de lif (FDEM) installé dans le capteur.

2.1.2.5 La couverture transparente :

Dans le but de réduire au maximum le prix de revient et la facilité et utilisé les matériaux disponibles, la couverture transparente est assurée par une planché de plastique de la serre ordinaire transparente posée est attachée par un cadre en bois.

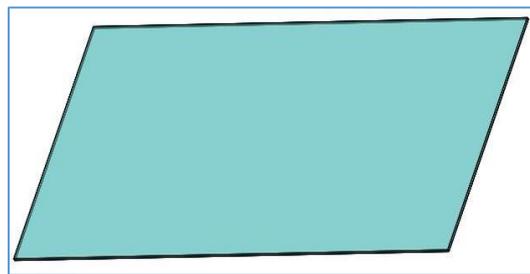


Figure V. 8 : Schéma représentant la cuve de stockage.

2.1.2.6 Support métallique.

Au cours d'essai le capteur est fixé sur un support en acier formé par profils en (U) dont le plan d'inclinaison est fixé sur 60°C . Pendant la période de test, le Chauffe-eau est installé sur le banc d'essai de URERMS. Il peut également être installé dans un espace dégagé ou sur toiture terrasse



Figure V. 9: Schéma représentant la cuve de stockage.

2.2 Unité de stockage :

L'utilisation d'un réservoir de stockage permet d'accumuler l'eau chaude produite afin de répondre aux besoins de l'utilisateur. La cuve de stockage est de forme rectangulaire, faite en tôle noire d'acier galvanisé d'épaisseur de 2mm, isolée thermiquement par "FDEM" sur ces six faces et enveloppée par une tôle mince de 0.8mm d'épaisseur. La cuve de stockage est dotée de quatre trous pour les raccordements avec le capteur solaire, la cuve d'alimentation en eau ainsi que pour le puisage.



Figure V. 10 : Schéma représentant les composants de cuve de stockage.

Également un tube troué adapté pour l'écoulement d'eau dans la cuve ; les trous sont orientés vers la face de paroi de la cuve pour éviter la turbulence d'eau injecté dans la cuve de stockage figure V.10. Les paramètres techniques de la cuve de stockage sont résumés au tableau 2.

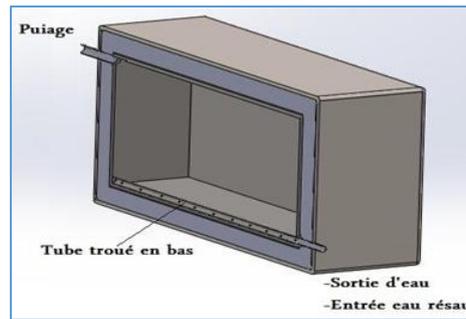


Figure V. 11: Schéma représentant l'unité de stockage réalisée.

Tableau V. 2 Caractéristiques techniques de la cuve de stockage.

Elément de La cuve	Nature	Dimensions
Bac	Acier galvanisé	- 92 litres
Isolation	Feuilles en fibre de palmier	- Epaisseur Arrière- 50 mm
Enveloppe	Acier galvanisé	
Tube troué	Acier galvanisé	

2.3 Bac d'alimentation :

Un bac de stockage de capacité de 350 litres posé sur support métallique de hauteur 3 mètres. Cette cuve est connectée directement au réseau public principal de l'unité soit est alimenté par un réseau local alimenté d'un puit PV.



Figure V. 12: Schéma représentant la hauteur piézométrique du bac d'alimentation par rapport au système.

3 Installation et expérimentation du capteur

3.1 Le capteur plan solaire

Dans les régions sahariennes isolées, où les ressources en énergie du bois sont très limitées alors que les besoins en matière de chaleur en basse et moyenne température sont sans cesse croissantes ; le chauffage solaire comme exemple apparaît alors comme le moyen idéal pour satisfaire ce besoin en matière d'eau chaude en hiver. Dans ce cadre, notre idée vise la réalisation

d'un prototype de chauffe-eau solaire adapté au milieu saharien. Le choix des matériaux de construction est effectué de telle sorte à favoriser la réalisation de ce genre de système dans les régions pauvres et qui ne disposent pas de gros moyens industriels. Dans le cadre de cette thèse, deux prototypes ont été testés ; il s'agit d'un chauffe-eau à échelle parallèle et d'un autre chauffe-eau solaire doté d'un absorbeur avec serpentín. Les essais expérimentaux ont été concluants. Malheureusement ce genre de système reste toujours peu connu et vulgarisé en Algérie. Beaucoup de travail reste à faire dans ce domaine pour le développement et la vulgarisation de ces systèmes dans les régions sahariennes du sud Algérien.

3.2 Montage du banc d'essai

Comme montré en figures (Figure V.12), le capteur solaire fabriqué se compose essentiellement d'un absorbeur en deux parties tôle en acier ordinaire et d'un échangeur en cuivre pour transporter le fluide caloporteur.

L'isolation thermique est assurée par des morceaux en feuille disposée du palmier dattier appelé « FDEM », posée à l'intérieur d'un bâti qui forme l'enveloppe globale maintenue la rigidité de capteur. La couverture transparente est assurée par une couverture transparente en plastique ou de verre, dans les tests expérimentaux nous effectuons deux compagnes des tests avec couverture en plastique et avec couverture en verre.

Le capteur plan réalisé est spécifié que le collecteur supérieur de l'absorbeur est isolé complètement pour minimiser les déperditions dans cette zone. Une fois le capteur développé et préparé, le montage et l'installation du prototype ont été faits au niveau de plate-forme des essais de l'URER/MS.



Figure V. 13: Photo représentant le capteur solaire installé sur la plate-forme des essais de l'URER/MS [2].

3.3 Objectifs de l'étude expérimentale

Le système a fait l'objet d'un test expérimental sous ensoleillement naturel avec une campagne de mesure durant les années 2019 et 2020 exactement dans les périodes hivernales ou la demande de l'eau chaude se multiplie dans familles et les secteurs industriels.

Les tests expérimentaux effectués sur le chauffe-eau solaire à effet thermosiphon réalisé au URER/MS d'Adrar ont essentiellement ont les objectifs suivants :

- Etude de la faisabilité du système ;
 - Evaluation expérimentale de la production en matière de l'eau chaude ;
 - La vérification du phénomène de stratification de l'eau chaude dans la cuve de stockage.
- La détermination des performances à long terme du chauffe-eau solaire sera étudiée dans les continuité de travaux de systèmes.

3.4 Description du banc d'essai expérimental.

Le système expérimenté est monté selon le schéma représenté en figure V.13. Il se compose de:

- D'un capteur solaire plans inclinés à 50 deg.
- Un fût de stockage. (Éprouvette de mesure)

Un ensemble de tuyauteries qui lie le capteur au bac d'alimentation.

On remarque que l'orifice de la sortie de l'eau chaude est presque de la même niveau de l'orifice d'entrée de l'eau chaude vient de capteur solaire.

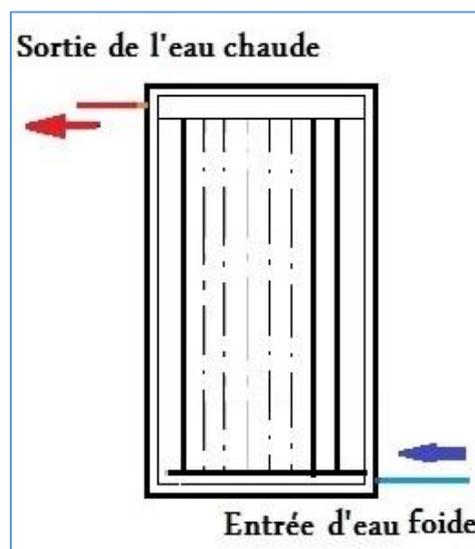


Figure V. 14: Montage réalisé pour l'étude expérimentale du chauffe-eau solaire.

3.5 L'instrumentation :

Afin d'avoir la réponse en terme des températures à l'entrée et à la sortie de capteur deux thermocouples du type (k ; Chromel-Alumel) d'un intervalle de tolérance (-1.5, +1.5) disposés selon le schéma indiqué en figure V.14.

Les différents thermocouples sont reliés à un enregistreur (acquisition des données de type Fluck (2625A) à 30 voies qui fait les prélèvements à un pas de temps de 60 secondes.

Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont :

- Température de l'eau froide a entrée du capteur ($T_{e\text{ eau}}$) ;
- Température de l'eau chaude a sortie du capteur ($T_{s\text{ eau}}$) ;
- Température du milieu ambiant (T_{amb}) ;
- Eclairement sur le plan d'inclusion de capteur.

Le capteur installé est reposé sur structure en métallique incliné d'un angle de 50 degrés par rapport à l'horizontal (calage hivernal) figure (V.15).

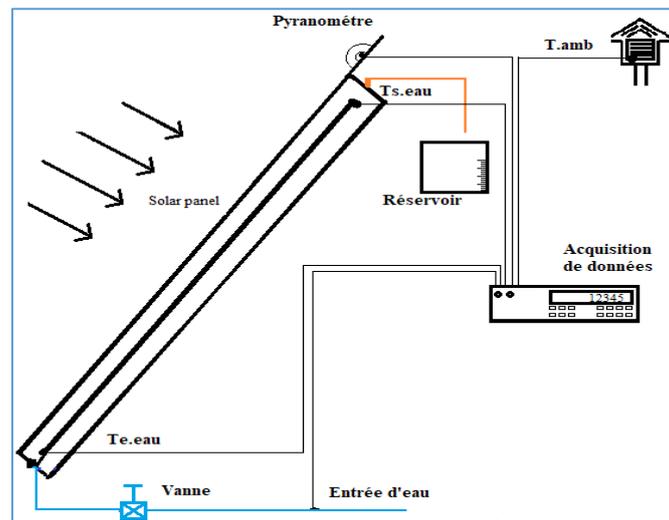


Figure V. 15 : Disposition des thermocouples dans le système.

Les différents tests effectués se sont déroulés durant deux périodes :

- Période hivernale durant deux mois allant du 05 janvier 2019 à la fin de février 2019.
- Période allant de 01 Octobre 2019 jusqu'au 30 Octobre 2019.

Un débitmètre analogique est placé à l'entrée de capteur pour assurer et régler le débit d'eau en (l/m). L'alimentation en eau est assurée par un réservoir de 350 litres fermé doté d'un flotteur. Le prototype du système, sous test réel, a été installé sur la plateforme des essais de l'URER/MS est montré sur la photographie de la figure (V.14).

3.6 Comportement thermique :

Pour vérifier la performance de capteur on a réalisé des tests sous les conditions climatiques de site de URER/MS d'Adrar durant plusieurs journées des tests.

La quantité d'énergie extraite du capteur et récupérée par le fluide peut être exprimée par la relation suivante :

$$Q_{ext} = q \cdot \rho \cdot Cp \cdot (Ts - Te) \quad (V-1)$$

Le rendement moyen horaire est obtenu par la relation suivante :

$$\eta = \frac{Q_{ext}}{A \cdot H_{in}} \quad (V-2)$$

Q_{ext} : est l'énergie délivrée par le capteur. (w)

H_{in} : est l'énergie solaire incidente sur le plan d'ouverture de capteur.

A : la surface de captation de capteur m².

C_p : la chaleur spécifique de l'eau (J/kg · °C) à chaque température.

q : le débit exprimé en l/min ;

ρ : la masse volumique de l'eau en Kg/m³ à chaque température ;

Ts et Te : est la température en sortie et en entrée du capteur en °C.

Pour connaître l'efficacité du capteur au cours de chaque heure, on calcule les températures moyennes de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur, ainsi que le taux d'ensoleillement approprié.

3.7 Le déroulement du test :

L'alimentation en eau de capteur se fait directement à partir d'un bac d'alimentation de placée en hauteur pour assurer l'alimentation de capteur en eau sans circulateur dans une boucle ouverte. La température de l'eau d'alimentation est celle de température de réseau ou de l'eau de réseau locale alimentée par un puits.

Les moyens utilisés pour l'expérimentale ne nous permettent pas de faire une régulation des débits pour assurer la précision totale de la mesure ; mais on supposera qu'elle est mise en œuvre de manière acceptable, qu'il permet au système de fonctionner dans des conditions très proches de la réalité.

3.7.1 Capteur avec couverture transparente en plastique :

Le capteur est posé sur un support incliné par rapport à l'horizontale 60 degré, la couverture transparente est assurée par le plastique de serre agricole. Voir annexe Tableau (a)



Figure V. 16 : Test de capteur avec couverture transparente en plastique.

- 24 janvier 2019

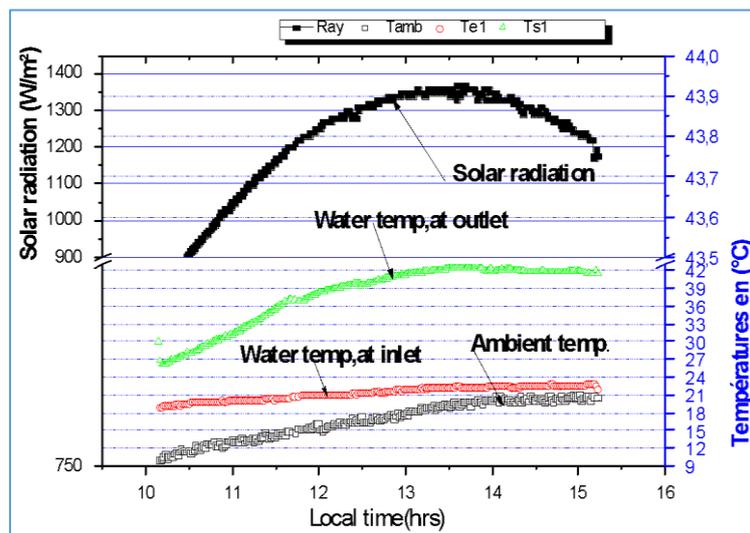


Figure V. 17: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur, dans la journée du 24 janvier 2019 ($q=0.5$ l/mn).

On constate que, malgré la variation très lente de la température d'entrée, le capteur solaire fournit une qualité très intéressante en termes de température d'eau chaude à la sortie. L'écart de températures entre entrée et sortie allant jusqu'à 20 °C à une température ambiante inférieure à 21 °C. De plus, la performance thermique horaire continue lentement jusqu'à 16 heures.

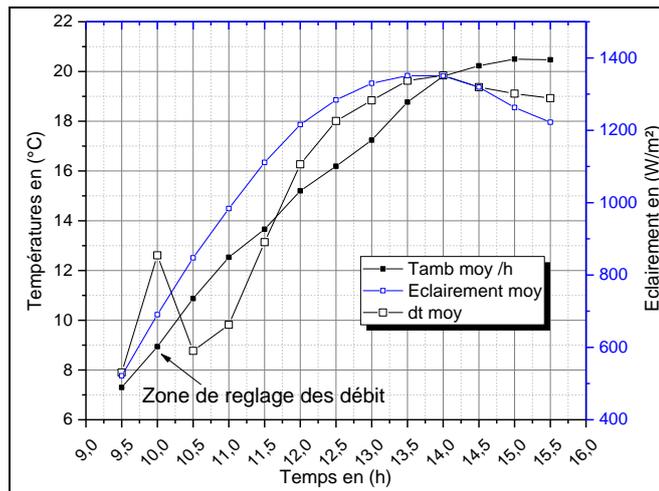


Figure V. 18: Evolution des Δt lors du 24 janvier sous l'effet des paramètres de test (q , T_a moy et H_{moy}).

Sur la figure V.18 on remarque que la différence de température de l'eau Δt augmente, proportionnellement à la température ambiante et au rayonnement, Mais en début de soirée la différence de température diminue du fait de la diminution du taux de rayonnement solaire.

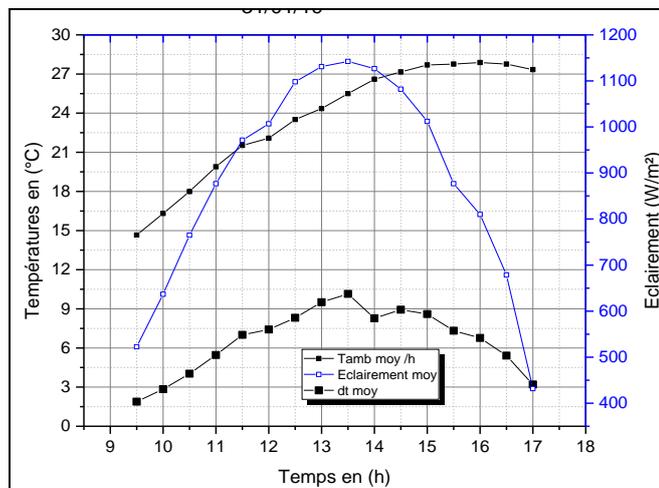


Figure V. 19 : Evolution des Δt lord du 31 janvier sous l'effet des paramètres de test (q , T_a moy et H_{moy}).

Sur la figure V.19 on remarque que la différence de température de l'eau Δt est moins qu'autre test, malgré la présence de rayonnement solaire. Cela est dû à la vitesse d'écoulement d'eau dans le capteur plan, débit d'eau 1 l/mn.

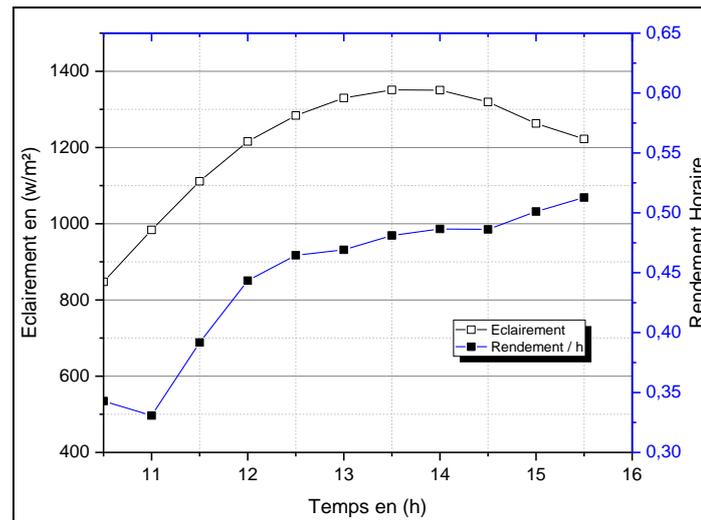


Figure V. 20 : Evaluation de rendement de capteur plan lors du 24/01/2019.

Le graphique présenté dans la figure ci-dessus montre que chaque fois que les conditions climatiques appropriées sont disponibles, les performances de l'appareil augmentent. Le soir, malgré la diminution du rayonnement solaire, le capteur continue à produire de l'eau chaude à 40 °C.

- 06 février 2019

L'efficacité du dispositif a été significativement augmentée du fait de l'état du rayonnement solaire capté et de sa stabilité au niveau du réseau d'adduction d'eau jusqu'à la fin de l'enregistrement. Voir annexe Tableau (b)

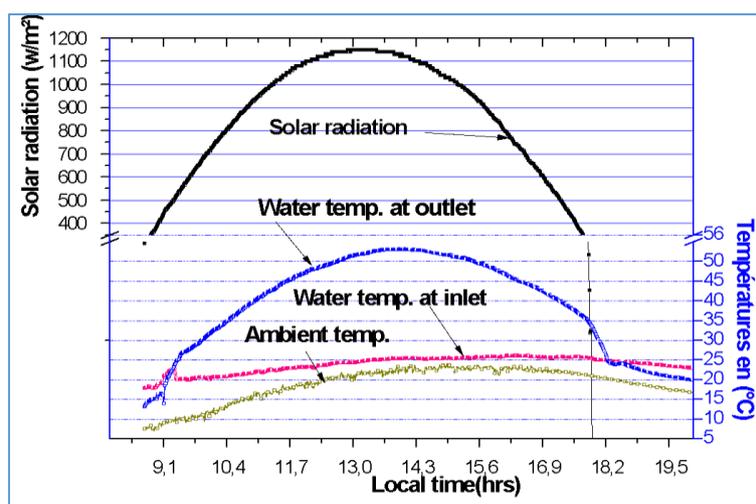


Figure V. 21 : Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur, dans la journée du 06 février 2019, ($q=0.5$ l/mn).

Durant cette journée claire avec une température ambiante inférieure à 18°C, le capteur est alimenté directement de l'eau à une température moins de 25 °C ; l'eau chaude à la sortie est impressionnante et l'évolution de la température de sortie est proportionnelle à la variation de l'irradiation solaire a une température ambiante ne dépasse pas 25°C durant la journée

Il ressort des tableaux précédents que les performances du capteur dépendent du gradient de température enregistré à la sortie figure V.21. Par contre on constat que L'isolation de la partie supérieure de l'absorbeur réduit les déperditions thermiques à ce niveau et permet au fluide caloporteur de drainer cette énergie piégée dans l'absorbeur ; l'isolation permet retardant ainsi la chute du rendement jusqu'au 17 heures, voir figures V.20 et V22.

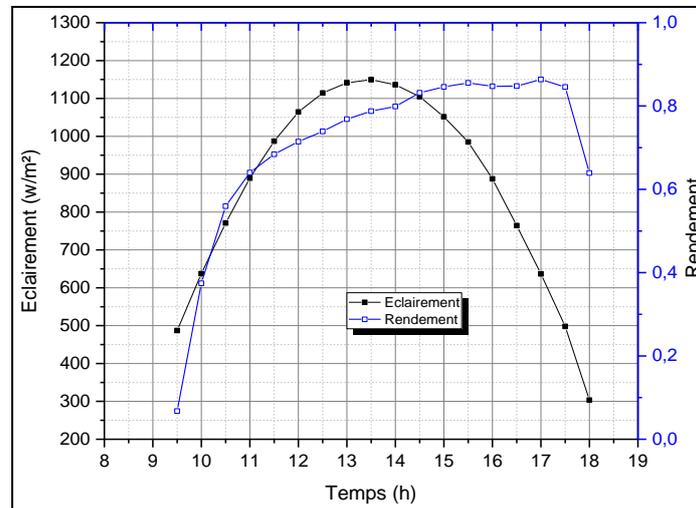


Figure V. 22 : Evaluation de rendement horaire de système leur du 06/02/2019.

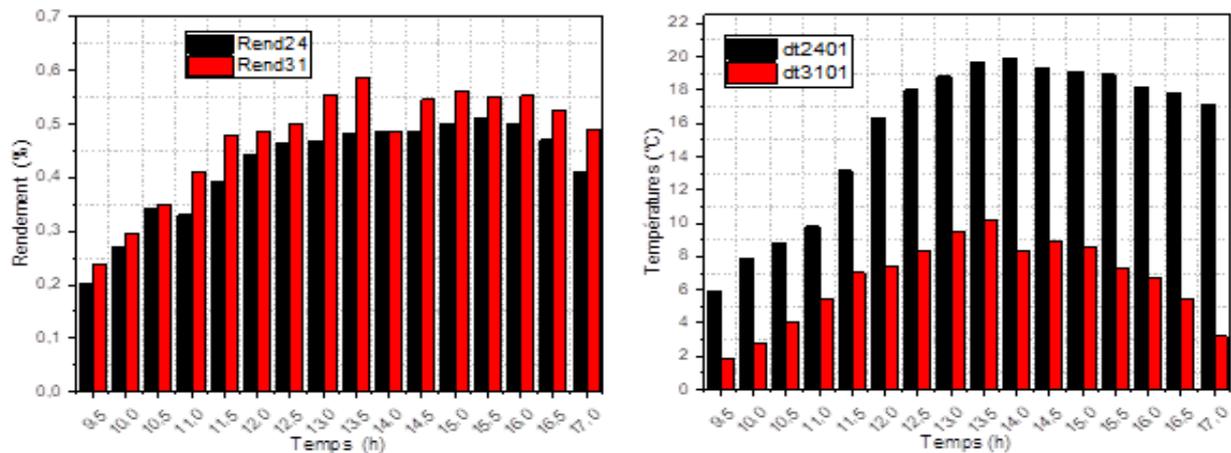


Figure V. 23 : Figure montrant une comparaison des performances thermiques de capteur plan pendant deux jours.

D'après la figure 23, la valeur ΔT varie entre 0,2 °C et 20°C, tandis que le rendement horaire moyen est modifié de 20 % à 60 % pour les jours de test. Nous avons remarqué que les performances du système sont significatives sur les journées du 24 janvier 2019 par rapport au 31 janvier 2019.

3.7.2 Montage de comparaisant avec capteur plans à absorbeur en serpentin :

Le capteur plan à serpentin a déjà fait l'objet d'un travail de recherche presque de la caractéristique technique et le même isolant thermique sauf que leur bâtier est en tôle ordinaire.



Figure V. 24: montage de deux capteurs en même temps.

Les deux capteurs sont posés dans la condition de travail ; angle d'inclinaison, débit d'eau et la température d'eau d'alimentation. Parfois l'alimentation en eau est assurée par un circulateur d'eau et le débit d'eau est contrôlé par le système by-pass.

T1 : représente les températures de capteur plan avec échelle parallèle.

T2 : représente les températures de capteur plan à serpentin

Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont :

- Température de l'eau froide a entrée du capteur (T_{e1}) et (T_{e2}) ;
- Température de l'eau chaude a sortie du capteur (T_{s1}) et (T_{s2}) ;
- Température du milieu ambiant (T_{amb}) ;
- Eclairage sur le plan d'inclusion de capteur.

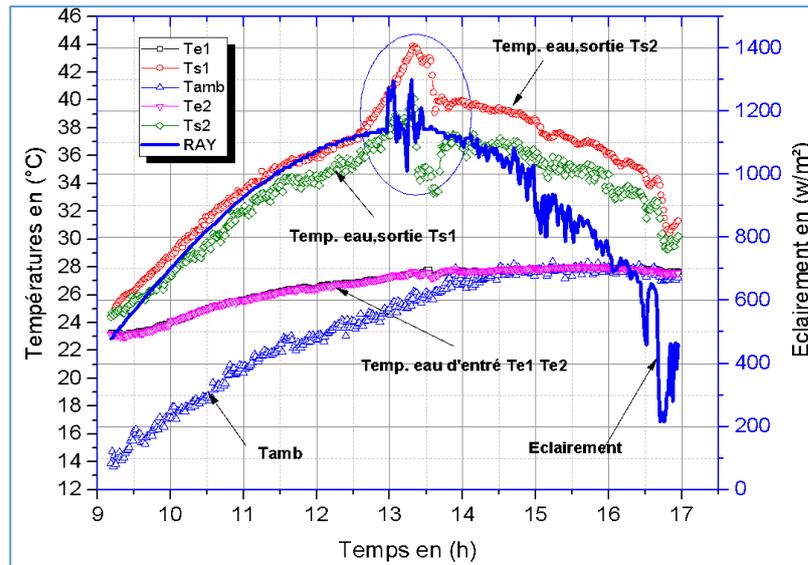


Figure V. 25: Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 31/01/2019.

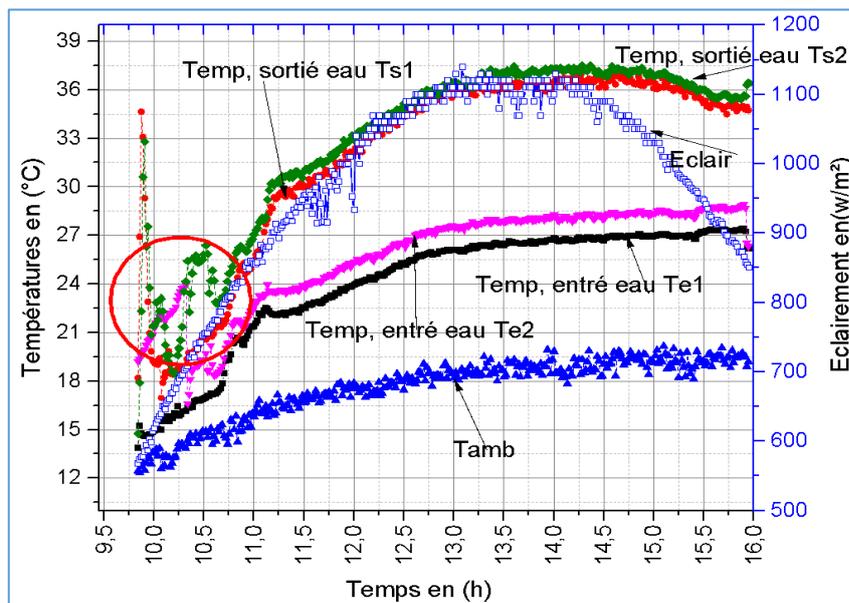


Figure V. 26 : Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 03/02/2019.

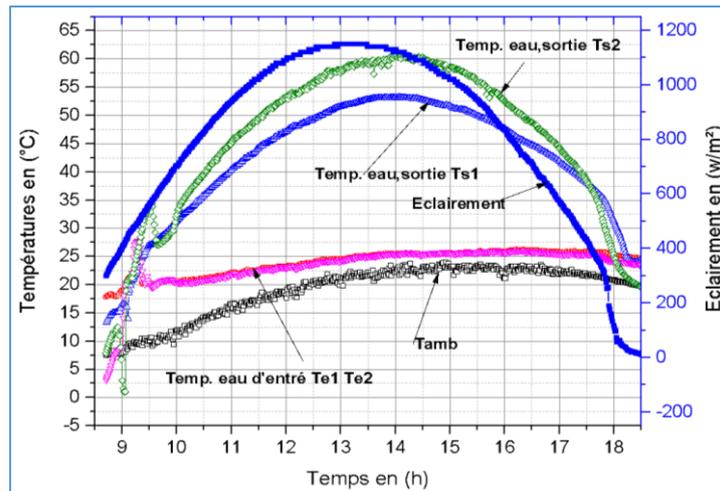


Figure V. 27: Evaluation des températures entre deux capteurs solaires pour la journée du 06/02/2019.

Malgré la différence entre les formes de l'échangeur de deux capteurs (tuyauterie) et en raison de la circulation de l'eau ; Les résultats concordent largement entre les deux structures figures V.25 et V.26 et diffèrent également en termes de valeur à circulation naturelle figure V.27. On constate que les températures sont plus avancées dans le cas de capteur à serpentin ; dû au long chemin de l'eau dans le capteur.

3.7.3 Capteur avec couverture transparente en verre :

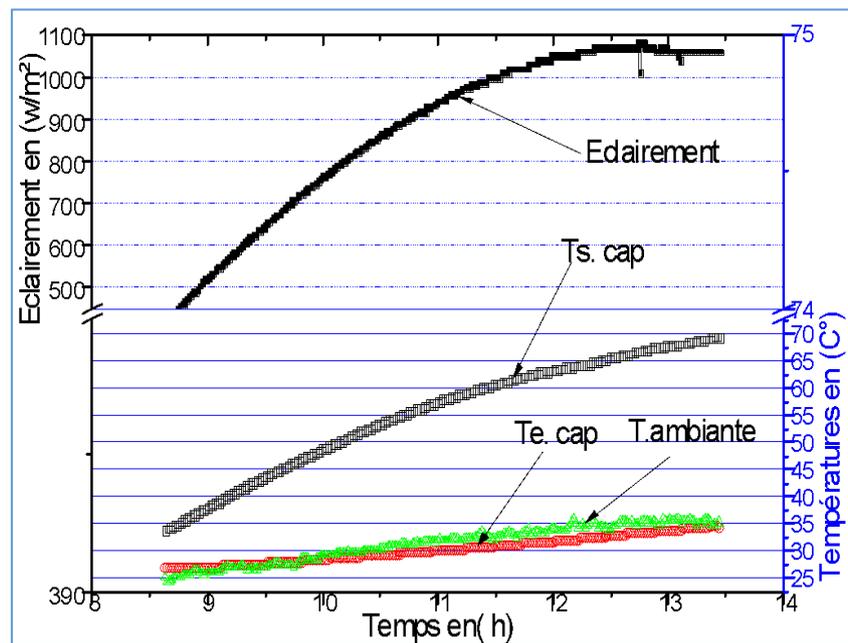
Le capteur est posé sur un support incliné par rapport à l'horizontale 60 degrés, la couverture transparente est assurée par verre de 3 mm. Un débitmètre à l'entrée de capteur afin de contrôler le débit d'eau.



Figure V. 28: Photo représentant le capteur en couverture de Verre.

Les différents résultats des tests sont présentés dans l'annexe. Voir Tableau (c)

- 15 Octobre 2019



- Figure V. 29: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 15 Octobre 2019.

Durant la journée de 15/10/19, On a constaté que le capteur arrive à fournir une quantité d'eau chaude très attrayante dont l'écart de température de sortie et d'entrée atteint 33 $^{\circ}\text{C}$ à une température ambiante moins de 35 $^{\circ}\text{C}$. Cette journée a également été remarquée par des températures de l'eau entrant proche à l'évolution de température de l'ambiante. Cela a rendu le rendement plus uniforme et augmente avec l'éclairement du soleil. Figure V.29.

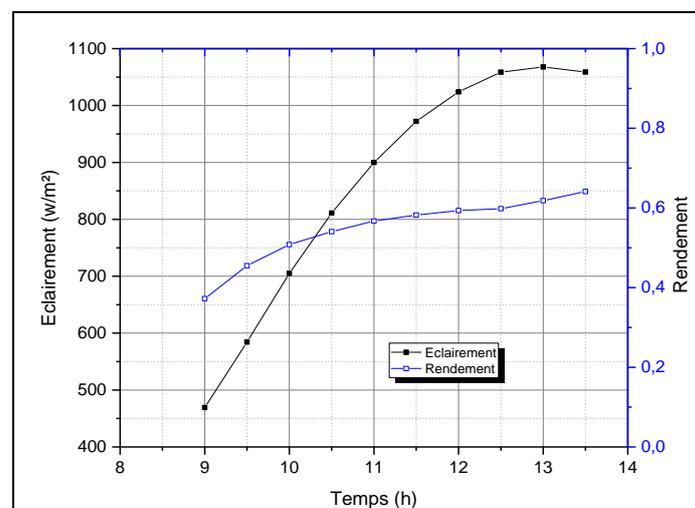


Figure V. 30 : Evaluation du rendement horaire de capteur 15/10/19.

- 17/10/19.

Le matin de la journée 17/10/19, il faisait 27°C et le ciel était partiellement nuageux, mais le temps était ensoleillé par intermittence. Par contre, vers midi il a plus légèrement par averses en intermittence avec du soleil avec un renforcement des températures à 30°C. En soirée, les températures ont diminué avec 28°C vers 19h.

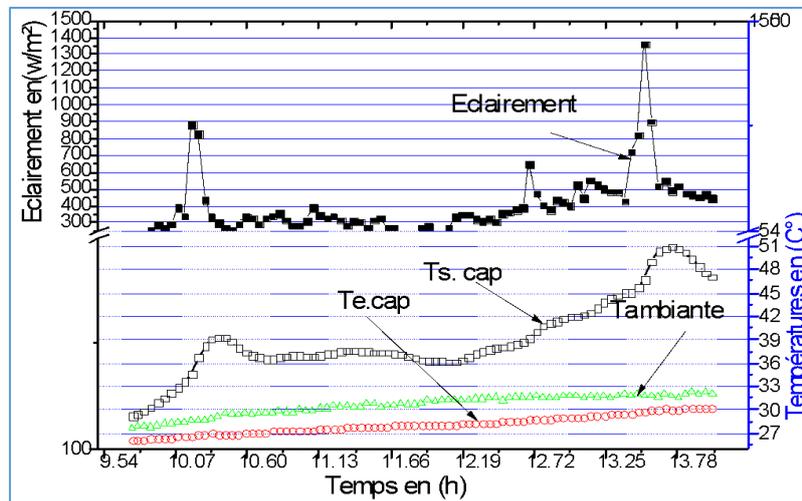


Figure V. 31: Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 17 Octobre 2019.

Malgré la perturbation constatée sur l'évaluation de l'éclairement on remarque que le système a peut fournir des températures importantes durant une journée nuageuse où la température de l'eau l'entrée de capteur est inférieur de la température ambiante. (Canal d'alimentation de capteur sous-sol). Annexe Tableau (d).

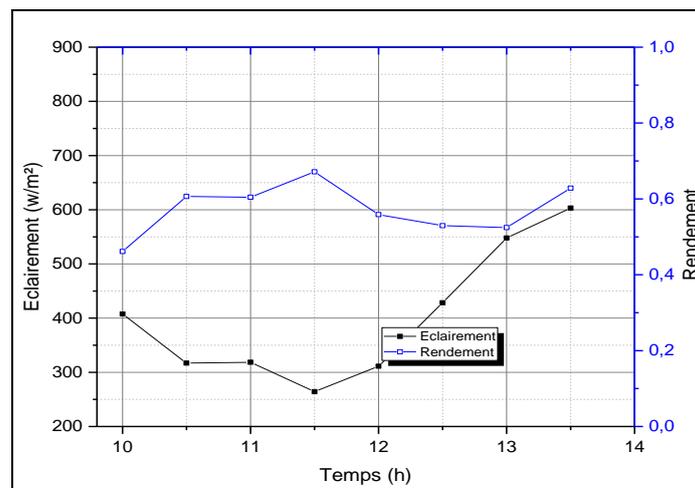


Figure V. 32 : Evaluation du rendement horaire de capteur 17/10/19.

Théoriquement, l'efficacité de capteur plan lors d'une journée instable et n'ensoleillée est faible, mais le capteur a fait la différence et a su produire de l'eau chaude avec un rayonnement diffus et l'efficacité éventuel de l'isolation thermique.

- 16/10/2019

La journée du 16/10/2019 est caractérisée par un ciel nuageux. Cependant, le capteur solaire a pu produire des températures importantes lorsque le rayonnement solaire était disponible, ce qui confirme que l'absorbant et l'isolant thermique ont interagi positivement avec les fluctuations climatiques de cette journée. Voir annexe Tableau (e)

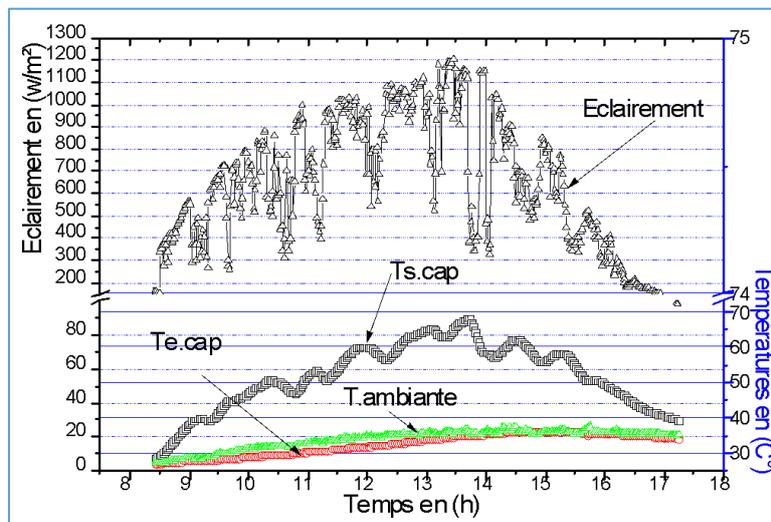


Figure V. 33 : Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 16 Octobre 2019.

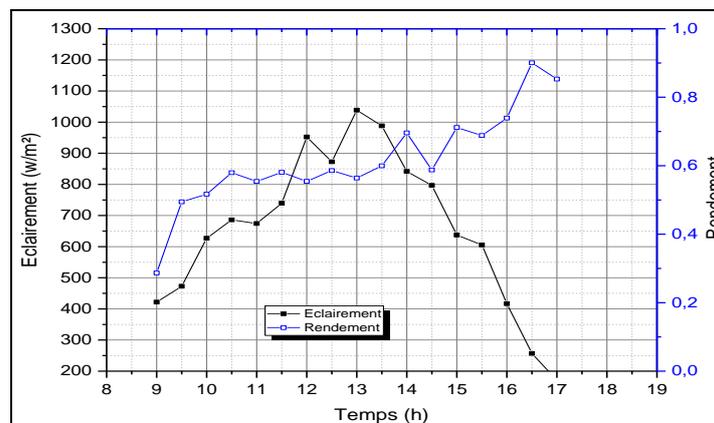


Figure V. 34 : Evaluation du rendement horaire de capteur 16/10/19.

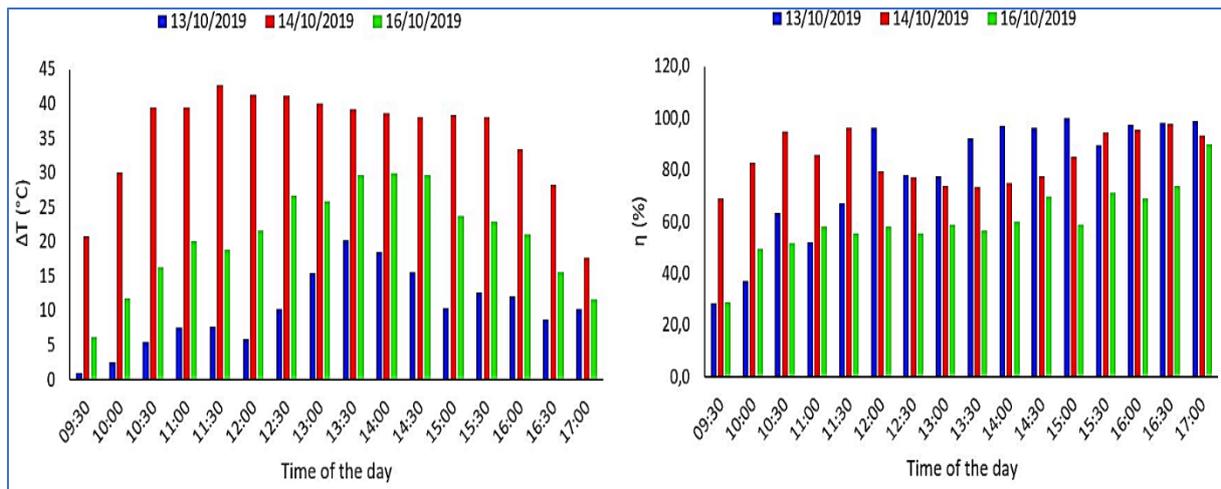


Figure V. 35 : Evaluation ΔT et le rendement horaire moyen pour les jours de test

D'après les figures V.35 et V.36, la valeur de la formule varie entre 0,9 °C et 42,6 °C, tandis que le rendement horaire moyen passe de 28,3 % à 99,9 % pour les jours d'essai. Nous avons remarqué que le rendement du système est important les jours 13 et 14 octobre 2019 par rapport au 16 octobre 2019.

Malgré la perturbation observée dans l'intensité du rayonnement solaire, nous remarquons que le système fournit des températures élevées pendant une journée nuageuse, où la température de l'eau à l'entrée est inférieure à la température ambiante. Nous avons remarqué que la performance du chauffe-eau solaire est directement liée au collecteur. L'isolation du collecteur supérieur de l'absorbeur permet de réduire la perturbation à ce niveau et permet au fluide caloporteur de drainer cette chaleur restée emprisonnée dans l'absorbeur et retarder la chute de rendement jusqu'à 17 h du soir.

On remarque sur les tableaux de calcul de rendements horaires calculés dans les tableaux V (5, 6 et 7) que le fonctionnement de capteur est lié beaucoup plus au gradient de températures atteint à la sortie. Cette énergie stockée se présente sous la forme de l'eau chaude contenue aux échangeurs de cuivre constituant l'absorbeur environ de 4 litres ; et la chaleur restée stockée dans la plaque deuxième partie de l'absorbeur.

Les résultats obtenus dans les tests, à couverture transparente plastique et à vitre, montrent que la contribution de tel système à l'économie d'énergie est fort intéressante et que leur rentabilité est loin d'être négligeable. Les niveaux des températures atteintes confirment notre

choix pour l'importance de la matière isolante. Les résultats expérimentaux montrent qu'avec une température initiale de l'eau de 25 °C ; la température maximale de l'eau obtenue varie de 55 à 75° C, Avec un rendement horaire moyen varie entre 0.30 et 0.90 %, selon les conditions climatiques de fonctionnement.

L'isolation assurée par le tissu végétale extrait du tronc de palmier dattier (FEDM) a donné des bons calorifugeages avec un moindre coût. En contribuant ainsi à la valorisation du palmier et la protection des oasis.

Les résultats obtenus en termes de températures nous encouragent à continuer nos travaux, à intégrer au système une cuve de stockage calorifugé par la même isolant pour constituer un chauffe-eau solaire local.

4 Installation et expérimentation du système

4.1 Montage du système

Une fois les éléments composants du système développé sont préparés, l'assemblage et l'installation du prototype ont été faits au niveau de plate-forme des essais de l'URER/MS. Le chauffe-eau solaire est montré à la figure V.35.



Figure V. 36 : Photo représentant le capteur solaire installé sur la plate-forme des essais de l'URER/MS

4.2 Objectifs de l'étude expérimentale

Le système installé a fait l'objet d'un test expérimental sous ensoleillement naturel avec une campagne de mesure allant du mois Février au Mai 2020.

Les tests expérimentaux programmés pour ce système ont les objectifs suivants :

- Etude de la faisabilité du système ;
- Mise en évidence de la circulation inverse ;
- Evaluation expérimentale de la production d'eau distillée.

4.3 Description du banc d'essai expérimental

Afin d'avoir la réponse en température des différents éléments constituant le système expérimenté, on le munit de quelques thermocouples de type K disposés selon la configuration montrée en figure 13 et détaillée par le tableau V.3.

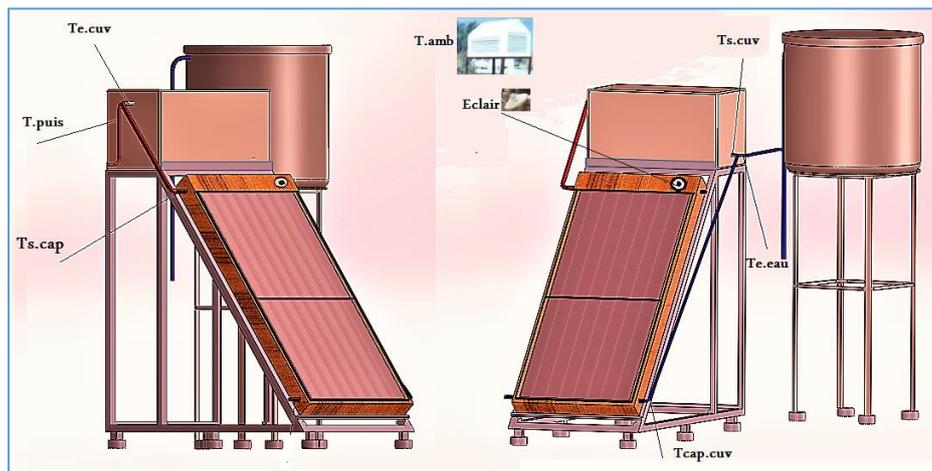


Figure V. 37 : Vue schématique de l'implantation des thermocouples.

La performance d'un système de réservoir d'eau dépend de la quantité d'eau présente, de la forme et de la composition matérielle du réservoir, de la quantité d'isolation externe, de la taille de réservoir et des emplacements des entrées et des sorties, et du débit d'eau.

Le processus thermodynamique et hydraulique à l'intérieur du réservoir peut être très complexe. Néanmoins, les modèles simplifiés peuvent généralement représenter ce comportement avec suffisamment de précision.



Figure V. 38 : Disposition des thermocouples dans la cuve de stockage.

Tableau V. 3 : Liste des thermocouples installés sur le système.

Tamb : Température ambiante ;

Te.eau : Température de l'eau de réseau ;

Te.cap : Température de l'eau à l'entrée du capteur plan ;

Ts.cap : Température de l'eau à la sortie du capteur plan ;

Te.cuv : Température de l'eau à l'entrée de la cuve de stockage ;

Ts.cuv : Température de l'eau à la sortie de la cuve de stockage ;

Tecap.cuv : Température de l'eau de cuve vers le capteur plan ;

Tbv : Température de l'eau en bas de la cuve de stockage ;

Tmv : Température de l'eau en milieu de la cuve de stockage ;

Thv : Température de l'eau en haut de la cuve de stockage ;

Tpuis : Température de l'eau puisée de la cuve de stockage.

On mesure entre autres : La température de l'ambiance ainsi que les températures à la sortie et à l'entrée du capteur plan et de cuve ainsi que trois températures de l'eau à l'intérieur de la cuve de stockage (Tmv ; Tbv ; Thv) à trois niveaux différents. Les thermocouples sont reliés à une acquisition de données de type FLUKE 2625A qui fait les relevés avec un pas de 1 minute.



Figure V. 39 : Photo représentant l'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés.

Le débit du puisage est compté à l'aide d'un compteur d'eau et une éprouvette graduée. L'éclairement solaire global incident sur le plan horizontal est mesuré à l'aide d'un pyranomètre qui est relié à l'acquisition de données.

4.3.1 Préparation des thermocouples

Les thermocouples utilisés sont de type K. Ils sont disponibles sous forme de câbles en bobine. On découpe la longueur nécessaire pour relier le banc d'essai à l'acquisition de données qui se trouve dans un abri. Il suffit de réaliser un seul point de soudure qui sera fixé à l'endroit

et sur la partie dont on veut mesurer la température. La soudure des thermocouples est réalisée à l'aide d'un chalumeau au niveau de l'atelier de l'URER/MS.

Le branchement au niveau de l'acquisition se fait de manière très simple, on configure le canal choisi pour mesurer une température par un thermocouple de type K. Afin de vérifier la soudure obtenue, on procède à l'étalonnage de chaque thermocouple. Cette opération est réalisée en vérifiant les valeurs mesurées pour le point 0°C et le point 100°C.

4.3.2 Installation des thermocouples

Pour la mesure de la température de l'eau qui circule dans une canalisation, on réalise une minuscule fente par laquelle on introduit un thermocouple. La fixation du câble est faite par de la colle qui assure également l'étanchéité. La mesure de la température ambiante est obtenue par un thermocouple installé dans un abri météo réalisé à cet effet comme montré sur la figure en dessous.



Figure V. 40 : Photo représentant l'abri pour la mesure de la température ambiante.

4.3.3 Mesure du rayonnement solaire

Comme indiqué sur la figure V.36, le rayonnement solaire global incident sur le plan incliné de capteur est mesuré à l'aide d'un pyranomètre de type Kipp et Zonen dont la sensibilité est de 4,78 V.m²/W.



Figure V. 41 : Photo représentant le pyranomètre installé sur le plan du capteur au niveau de la plate-forme des essais de l'URER/MS

Le pyranomètre est un transducteur qui délivre une tension continue proportionnelle à l'intensité du rayonnement auquel il est exposé. Il est également relié à l'acquisition de données sur un canal qui est préalablement configuré. Pour cela on sélectionne l'option de conversion de mesure ($\mathbf{Mx+B}$), où M est le facteur de conversion obtenu à partir de la sensibilité du pyranomètre.

5 Déroulement des essais

La cuve de stockage est remplie d'eau à partir du réseau, à une température spécifiée, le matin du premier jour. On suppose que la masse d'eau présente dans la cuve reste conservée le long de chaque journée du test.

Lors de chaque journée d'essai, l'eau est soutirée du système pendant des durées et selon les horaires et les débits spécifiés.

On calcule la quantité **quantité** en énergie de l'eau soutirée du chauffe-eau à l'aide de la quantité soutirée et de sa température qui est relevée par les thermocouples disposés dans le système. On fait puiser la quantité d'eau avec une température de consigne égale à 60°C.

Le puisage d'eau est programmé trois fois par jour, le matin ; à midi et le soir. Parfois on se limite à la matinée du jour seulement.

Les différents tests effectués se sont déroulés durant la période allant du mois de Janvier 2020 au mois Mai 2020. Le système a bien fonctionné sous des conditions climatiques difficiles et variées. Comme montré sur la figure V.25; le prototype et en calage optimale 50 degré par rapport à l'horizontal.

- Lors des premières campagnes de test, le chauffe-eau solaire est à l'état de stagnation.
- Lors des deuxièmes campagnes de tests le système de chauffe-eau solaire est soumis à soutirage de l'eau chaude.
- lors de la troisième campagne de tests le capteur est doté d'une couverture transparente (plastique ordinaire).
- le pas d'enregistrement est fixé à 30 secondes alors que la quantité d'eau puisée est variable.

En fin de journée (après chaque puisage) l'acquisition de données est déchargée sur un micro-ordinateur où l'on enregistre les données numériques pour faire les différents traitements. Le système expérimenté est monté selon le schéma représenté en figure V.32. Il se compose de:

- D'un capteur plans inclinés à 50 deg.
- Une cuve de stockage horizontale d'une capacité théorique de 100 l.

- Un ensemble de tuyauteries qui lie le capteur à la cuve de stockage.

On remarque que l'orifice de la sortie de l'eau chaude est presque de la même niveau de l'orifice d'entrée de l'eau chaude vient de capteur solaire.

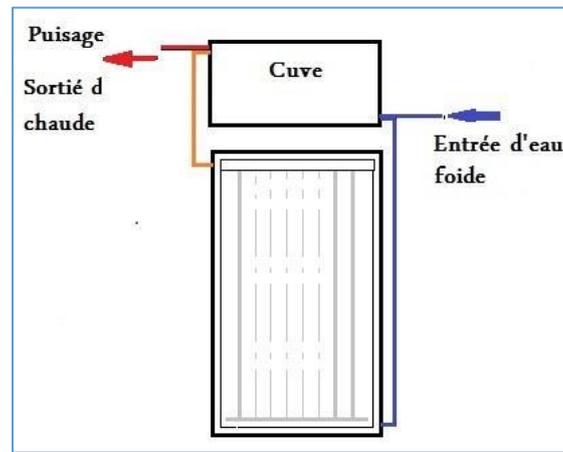


Figure V. 42: Montage réalisé pour l'étude expérimentale du chauffe-eau solaire.

6 L'instrumentation

Afin de vérifier la stratification du stockage, on introduit dans la cuve un dispositif muni de 04 thermocouples du type (k ; Chromel-Alumel) d'un intervalle de tolérance ± 1.5 disposés selon le schéma indiqué en figure V.15.

Les 10 thermocouples sont reliés à un enregistreur (acquisition des données de type Fluck 2625A) à 30 voies qui fait les prélèvements à un pas de temps de 60 secondes.

La position de thermocouple d'entrée d'eau chaude peut aussi m'aider à vérifier la stratification au niveau de la cuve.

Pour l'estimation des performances à long terme du système, on mesure les températures du réseau et du puisage à l'aide de deux thermocouples, de type k, disposés dans la tuyauterie juste à l'entrée et à la sortie de la cuve.

Pour cela on prévoit un montage à deux coudes, comme le montre la figure 5.2, qui nous permet de créer un écoulement tourbillonnaire au niveau de la sonde.

Les différents paramètres mesurés et les instruments de mesure utilisés sont :

- Température de l'eau froide à l'entrée du capteur (T_e eau) ;
- Température de l'eau chaude à la sortie du capteur (T_s eau) ;
- Température du milieu ambiant (T_{amb}) ;
- Eclairement sur le plan d'inclusion de capteur.

Le capteur installé est reposé sur structure en métallique incliné d'un angle de 50 degrés par rapport à l'horizontal (calage hivernal) figure (V.15).

7 Calcul des performances du système

Pendant chaque soutirage, on mesure les paramètres suivants :

- La température de l'eau admise dans la cuve ;
- La température de puisage ;

Lors de tous les essais, on mesure également :

- L'éclairement solaire incident sur le plan du capteur ;
- La température ambiante ;
- La vitesse du vent et l'état du ciel (note par observation).

Le débit d'eau de puisage sera supposé maintenu constant durant toute la durée du puisage et les paramètres de sortie seront mesurés toutes les 30 secondes.

Le pas de mesure est petit, on pourrait alors approximer la température de mélange de chaque puisage par :

- La charge journalière d'eau chaude.

$$Q_L = \sum_{j=1}^{N_s} m_j \cdot Cp_{Lj} \cdot (T_{bes} - T_{res}) \quad (V-3)$$

- L'énergie fournie par le système solaire.

$$Q_s = \sum_{j=1}^{N_s} m_j \cdot Cp_{sj} \cdot (T_{ps,j} - T_{res}) \quad (V-4)$$

Et la contribution solaire sera :

$$f = \frac{Q_s}{Q_L} \quad (V-5)$$

Ns: Le nombre de soutirages par jour

mj: La masse d'eau soutirée par tranche.

98 Résultats et discussion

9.18.1 Journée de stagnation de système

A titre d'exemple, on présente l'évolution des températures dans le stockage et l'influence des différents paramètres climatiques. Tenu en compte l'efficacité de l'appareil, et de l'isolation thermique.

1. Les journées (06 et 07) /02/2020 sont caractérisé par un ciel était presque dégagé avec quelques nuages ; au début d'après-midi il y avait des nuages. Mais le ciel était parfaitement dégagé le 08/02/2020. La température maximale enregistrée ne dépasse pas 25°C et la température minimale de 11°C figure V.43. Il n'y a pas eu de précipitations.

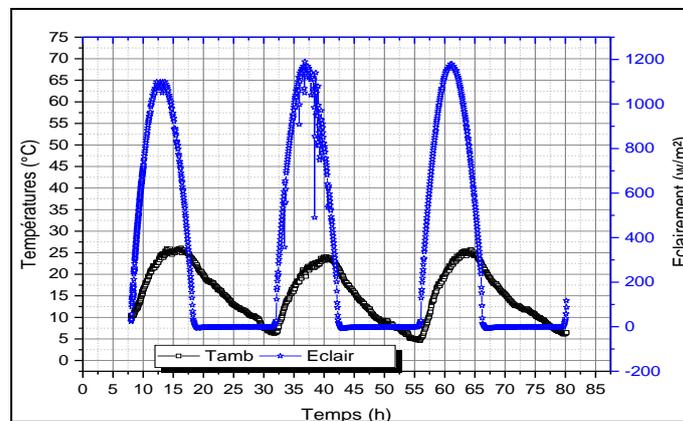


Figure V. 43 : Evolution de la température ambiante et l'éclairement durant les trois Jrs de stagnation du 06 au 09 /02/2020.

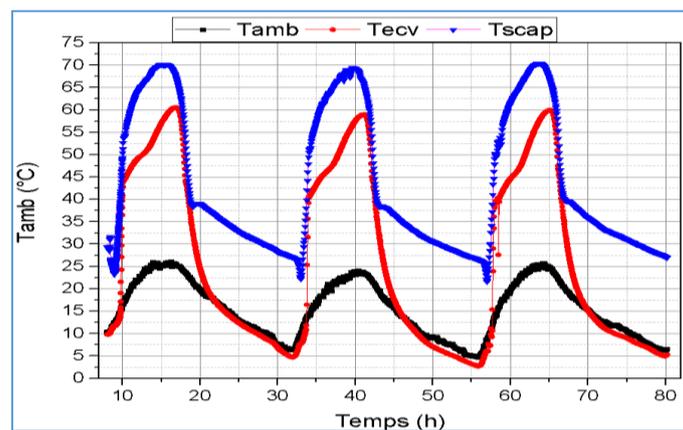


Figure V. 44 : Evolution de la température de l'eau à l'entrée et à la sortie de capteur lors de la journée du 06 au 09 /02/2020

On représente dans les figures V.44 et V.45 l'évaluation des températures du système durant trois journées de stagnation ; la circulation d'eau est assurée en thermosiphon. Le système

fournit des températures a la sortie de capteur assez importantes et ce démunie à la fin de journée, heurs de nuit.

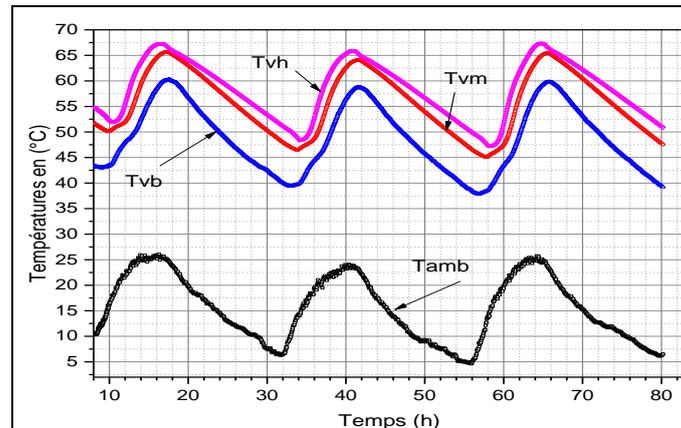


Figure V. 45: : Evolution des températures (T_{vb}), (T_{vm}) et (T_{vh}) dans la cuve de stockage lors de la journée du 06 au 09 /02/2020.

L'évaluation des températures dans le cuve de stockage est liée directement à la chaleur engendrée par le capteur solaire. Durant les trois jours de stagnation, on constate que les températures se comportent presque d'une manière régulière. La matinée ou la température ambiante se basse on remarque que les températures d'eau stockée sont appréciables.

Au cours des journées (10,11 et 12 /04/2020) généralement l'état de ciel était partiellement nuageux, mais le temps était ensoleillé par intermittence. Mais, vers midi le temps est ensoleillé, avec un ciel pleinement dégagé.

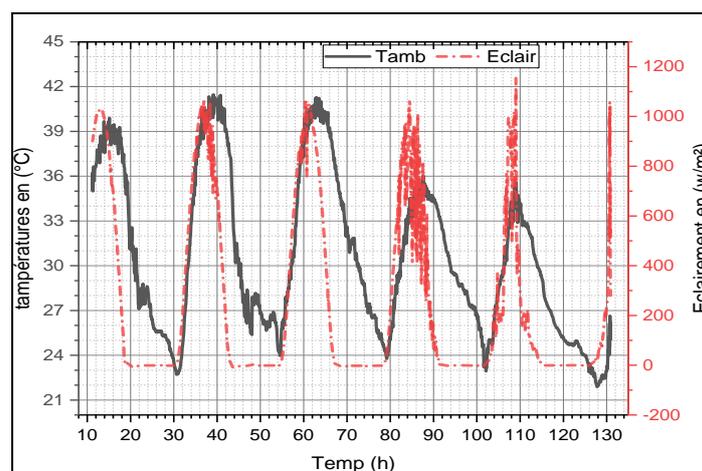


Figure V. 46 : Evolution de la température ambiante et l'éclairement durant les quatre Jrs de stagnation du 10 au 15 /02/2020.

Au contraire, les deux jours (13 et 14/04/2020) le ciel était couvert. Par contre, à la mi-journée il y a eu quelques nuages par intermittence. La température maximale enregistrée le 11/04/2020, était de 40°C et la température minimale de 26°C.

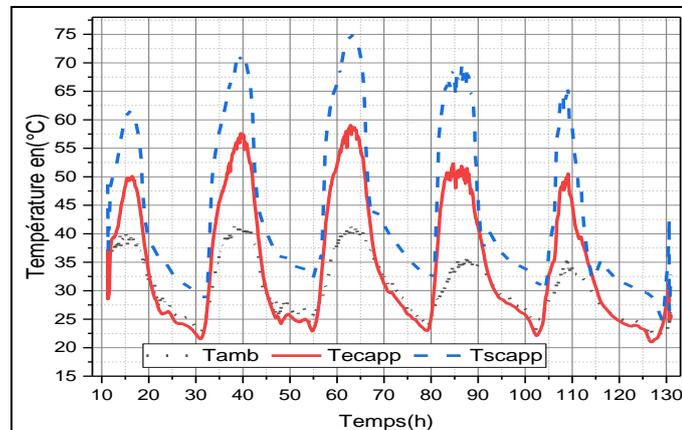


Figure V. 47 :Evolution de la température de l'eau d'entrée et de sortie de capteur en fonction de la température ambiante et l'éclairement du (11 à 14 /01/2020.)

On représente dans la figure 47 l'évaluation des températures du système durant les journées de stagnation ; en circulation à thermosiphon. Le système fournit des températures à la sortie de capteur assez importante et la présence de nuage influant sur la production de journée, en matière de chaleurs.

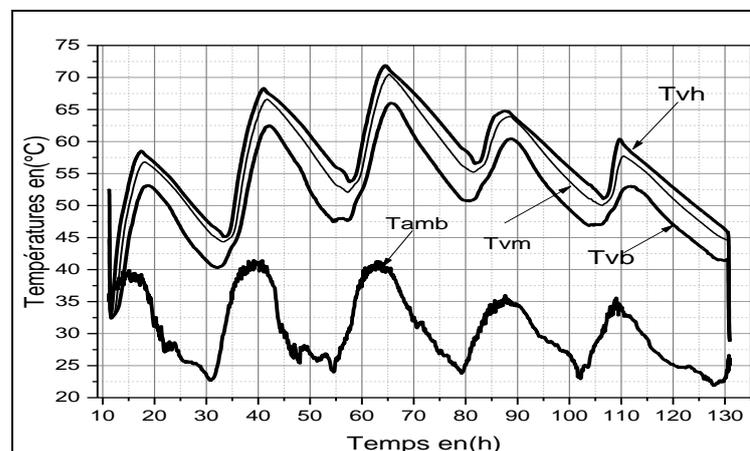


Figure V. 48: Evolution de la température de l'eau stockée en fonction de la température ambiante du (11 à 14 /01/2020).

L'évaluation des températures dans le cuve de stockage figure V.48 est liée directement à l'état du ciel du jour. On remarque sur les cinq jours de stockage que les températures (Tvh et Tvm) s'évaluent identique; les couches de partie supérieures de cuve, mais les températures

des couches bas (Tvb) de cuve est sensible à tout changement. Malgré les temps de nuage, le système fonctionne.

9.28.2 Journée de puisage

Sur le tableau suivant on donne la quantité puisée en litre durant de nombreux jours du test.

Tableau V. 4: quantité d'eau puisée par heure en litre.

Jour 2020	13-févr	17-févr	18-févr	19-févr	20-févr
8h	80	30	25	25	30
12h	-	30	25	30	30
16/30h	-	30	20	30	30

16/02/2020

Au début de matinée on met le système en charge subit aux conditions climatiques de jour. La température enregistrée ce matin est 15 °C et il y a eu quelques nuages par intermittence. Le temps reste similaire à midi. En fin de journée, la température atteint 28 °C, sans précipitations.

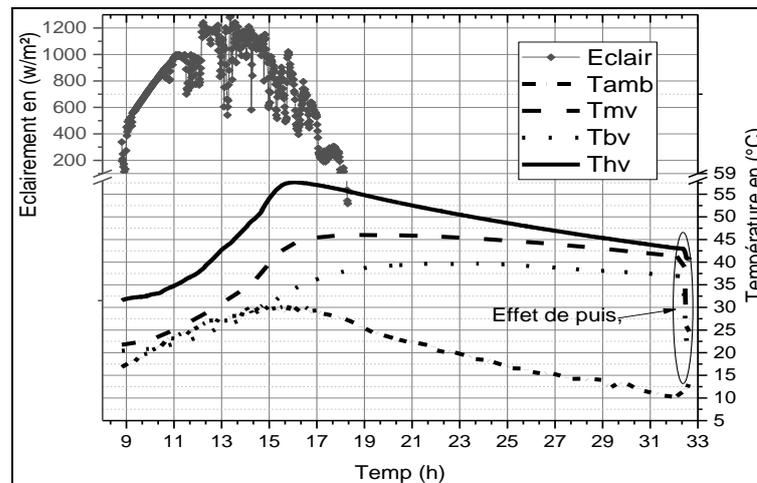


Figure V. 49: Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 16/02/2020.

Au début du deuxième jour on fait sortir la masse d'eau suitée et évalue l'efficacité du système. L'injection d'eau dans la cuve de stockage se fait de telle sorte d'éviter la turbulence pour garder la stratification formée.

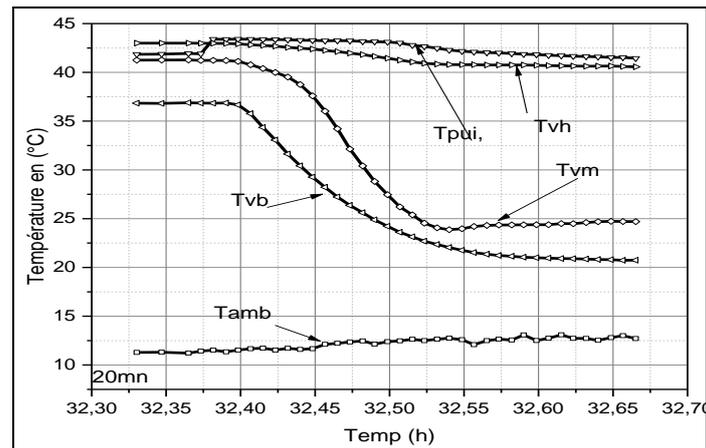


Figure V. 50 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du puisage de matinée du 17 /02/2020.

Les températures enregistrées dans la couche inférieure et supérieure de l'eau stockée est successivement de 36.8 °C et de 43 °C. Où la température ambiante est de 11.3 °C. Durant l'admission d'eau, la température de puisage est légèrement supérieure de la température en haut de la cuve, mais les couches inférieures sont beaucoup plus influencées par l'admission d'eau. Sachant que la température ambiante est de moins 14 °C, le système fournit une quantité d'eau chaude à 42 °C pendant 20 min de puisage.

18/02/2020

La journée du 18 /02/2020 est caractérisée par un ciel était parfaitement dégagé. Le matin il a fait 15°C et le. Le climat est resté similaire à midi avec un renforcement des températures à 24°C. En soirée, les températures ont augmenté à 26°C.

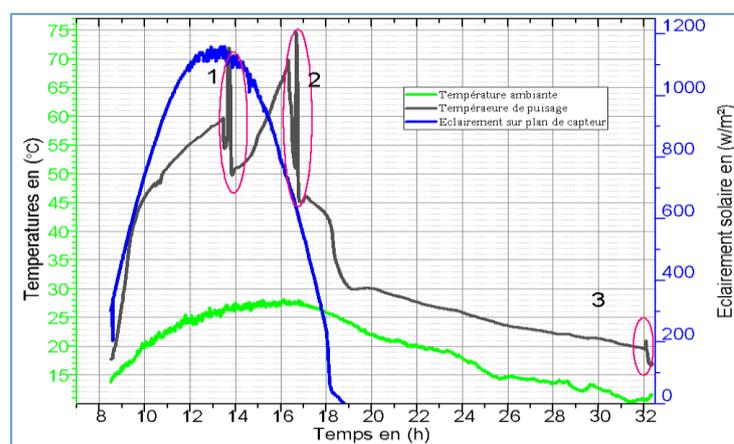


Figure V. 51: Evolution de la température ambiante et l'éclairement lors de la journée du 18 /02/2020.

Sur la figure V.51 on montre l'efficacité de système et l'effet de prélèvement d'eau sur le système pendant la journée.

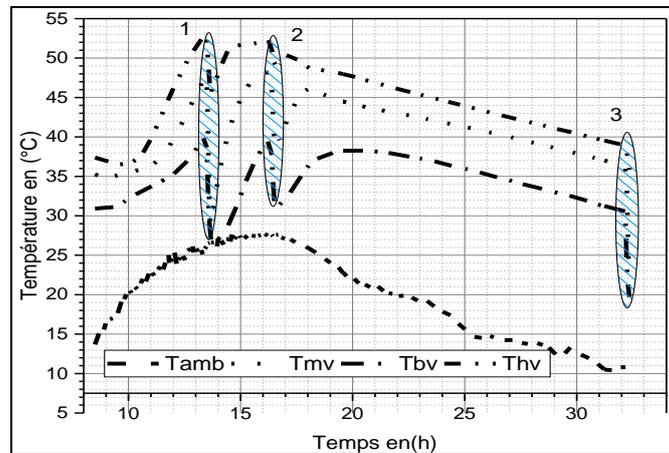


Figure V. 52: Evolution des températures (Tvb), (Tvm) et (Tvh) dans la cuve de stockage.

Sur la figure V.52 en représentant les différentes distributions des températures dans le réservoir ; on peut voir aussi l'influence du puisage de midi sur l'évolution de la température de la couche inférieure de l'eau stockée zone (1 et 2) et la possibilité de récupération pendant la journée.

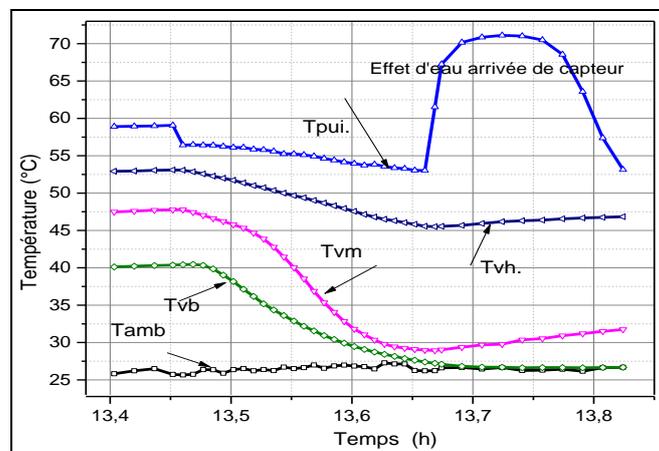


Figure V. 53: Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage de l'après-midi du 18/02/2020.

Le soutirage de l'eau chaude avec un robinet pose le problème de contrôle de débit. Durant l'opération de puisage le robinet est à demi-tour d'ouverture figure V.53; La température de l'eau indiquée à l'entrée de cuve est de 58 °C et celle du milieu était de 26 °C avec intensité moyenne de rayonnement 1124 w/m².

Lors de soutirage de l'après-midi, l'évolution des températures des couches supérieures du réservoir reste presque stable par rapport aux autres niveaux. Mais on peut enregistrer les changements qui s'opèrent au niveau des couches inférieures du réservoir. Le système peut également récupérer une grande partie de la chaleur soutirée.

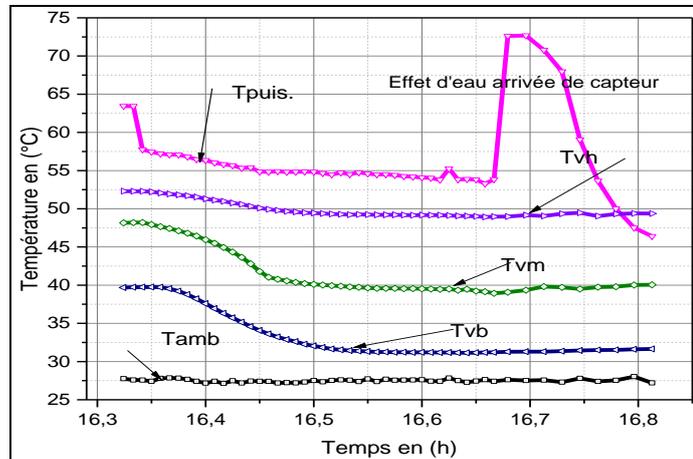


Figure V. 54: Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.

Durant l'opération de puisage le robinet est à demi-tour d'ouverture figure V.54; La température de l'eau indiquée à l'entrée de cuve est de 63.44 °C et celle du milieu était de 27 °C avec intensité de rayonnement 679 w/m².

L'influence des puisages sur l'évolution des températures n'apparaît pas sur les différentes des couches supérieures du réservoir ; mais on peut enregistrer les changements qui s'opèrent au niveau des couches inférieures du réservoir. L'écoulement sous débit très faible assuré un puisage sans perturbation.

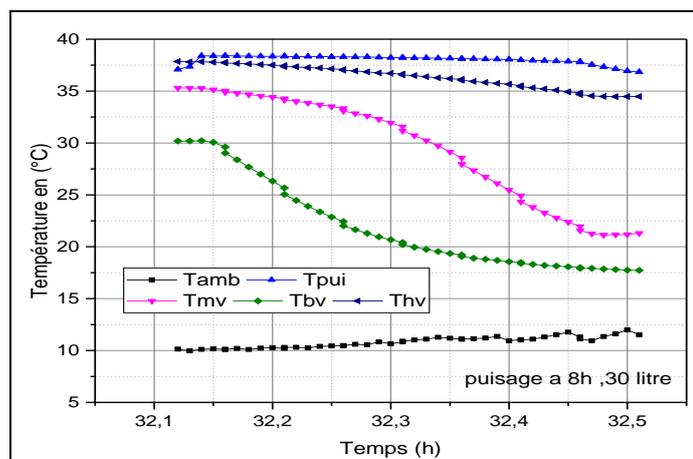


Figure V. 55: Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de soutirage (matiné du 19 /02/2020.).

On remarque que le système a pu conserver des températures très appréciables après trois opérations d'admission d'eau dans le jour passé à une température ambiante de la matinée de 12 °C ; le système à fournir 30 litres de l'eau chaude à 40 °C

Lors du test, effectué il est nécessaire de citer l'observation remarquée plusieurs fois.

- Variation du débit de réseau car l'alimentation se fait à partir d'un stockage lié au réseau d'un puits au niveau de URERMS.
- variation de la température du réseau car le stockage en plein air.
- Le remplissage de la cuve, lors du puisage, est incertain.
- coupures de courant, fuites de réseau d'eau, exploitation du réseau commun.

109 Performances du système

Journée du 19/02/2020.

En début de matinée, les nuages empêchaient le soleil de percer. Mais, vers 13h le ciel était couvert avec des températures atteignant 21°C. En début de soirée, les températures se sont accrues avec 22°C vers 19h et le ciel était partiellement nuageux.

Tableau V. 5 : La contribution solaire de système lors 19/02/20.

N° du soutirage	T _{amb}	T _{ps} °C	T _{res} °C	T _{bes} °C	m (kg)	Q _s (kJ)	Q _L (kJ)
08/00	11,028	39,320	14,8424	60	25	2557,305	4717,815
12/00	22,268	50,295	22,591	60	30	3474,982	4692,198
16/25	27,049	56,004	30,576	60	30	3190,955	3692,371
Total						9223.242	13102.394
La contribution solaire du jour						$f = \frac{Q_s}{Q_L} = 0,704$	

Journée du 20/02/2020.

Ce jour il y a eu quelques nuages par intermittence. Le temps est resté pareil à la mi-journée avec températures atteint à 22 °C. En début de soirée, les températures se sont renforcées jusqu'à 23 °C à 19 h.

Tableau V. 6 : La contribution solaire de système lors 20/02/20.

N° du soutirage	T _{amb}	T _{ps} °C	T _{res} °C	T _{bes} °C	m (kg)	Q _s (kJ)	Q _L (kJ)
08/00	11,896	42,048	18,318	60	30	2975,107	5225,720
12/00	23,556	45,933	22,401	60	30	2950,950	4714,898
16/25	27,859	52,756	26,945	60	30	3238,208	4147,039
Total						9 164,265	14 087,75
La contribution solaire du jour						$f = \frac{Q_s}{Q_L} = 0,65$	

1110

E

tude de la stratification

La stratification dans un réservoir de stockage thermique dépend principalement de la conception du réservoir, de la taille, de l'emplacement et de la conception des entrées et sorties et des débits des flux entrants et sortants.

Les systèmes à thermosiphon fonctionnent généralement à des débits de collecteur beaucoup plus faibles que les systèmes actifs et, par conséquent, présentent un degré de stratification plus élevé.

Pour la vérification-stratification on a considéré l'évolution des températures dans la cuve de stockage mesuré par les thermocouples de type k notés :

T_{bv} : Température de cuve de stockage en bas

T_{mv} : Température de cuve de stockage au milieu

T_{hv} : Température de cuve de stockage au haut

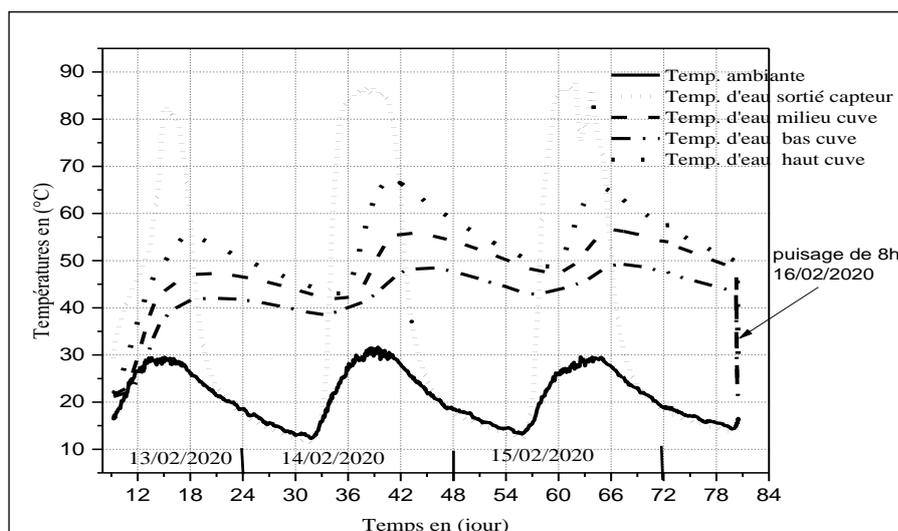


Figure V. 56: Evolution des températures de stockage durant les trois

Jrs de stagnation du 13 au 15 /02/2020.

Sur les figures (V.56) en montre les variations et la distribution des températures dans la cuve de stockage et aussi l'influence de puisage sur les différentes couches de stockage. Également, on peut aussi sentir l'importance de notre isolant choisir surtout dans les heures de nuit et la matinée ou la température ambiante est basse.

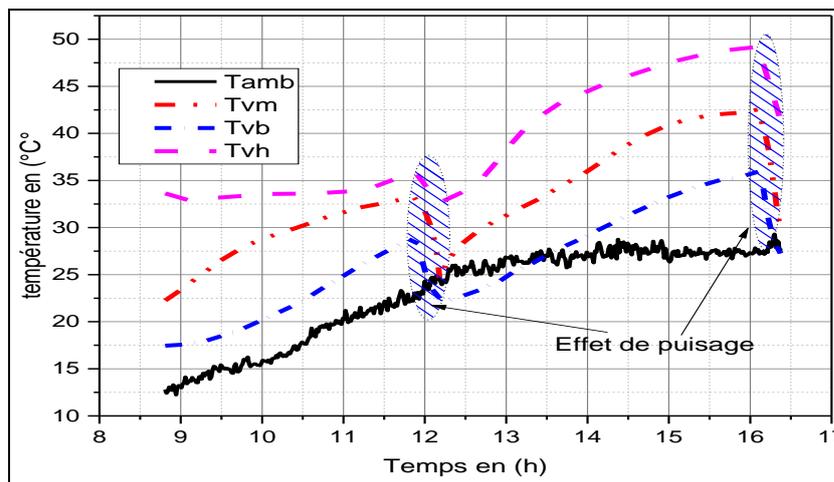


Figure V. 57 : Evaluation des températures 20/02/2020

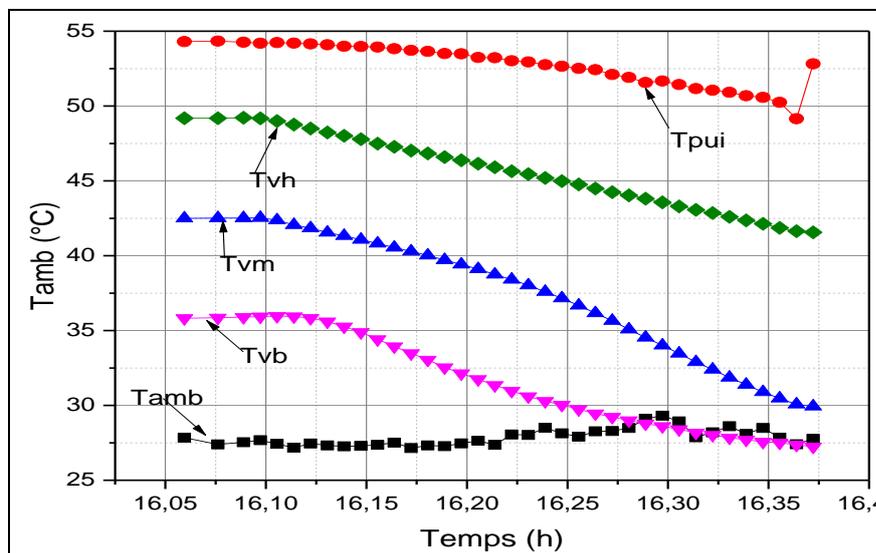


Figure V. 58 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.

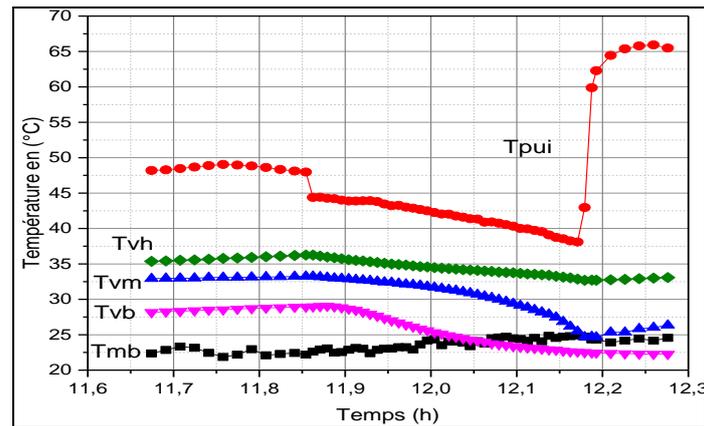


Figure V. 59 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors du soutirage du soir du 18 /02/2020.

Les différentes distributions des températures sont présentées sur les figures V.57 et V.58. Sur les figures V.55 également on peut voir l'influence du puisage de la matinée et d'après-midi figure V.54 sur l'évolution de la température de la couche inférieure de l'eau stockée. Par contre lors des journées ensoleillées l'admission et la puisage d'eau n'influent pas beaucoup sur les couches supérieures de cuve de stockage, surtout lors d'un débit de puisement régulier et convenable (très faible). On constate aussi lors de plusieurs puisages et remplissage la stratification n'apparaît qu'après temps de repos du système. Pour garantir le remplissage total de cuve sans bulle d'air, il faut assurer un faible débit lors de remplissage.

17/02/2020

Durant la journée de 17/02/20 Les différentes distributions des températures sont présentées sur les figures V.60 et V.61.

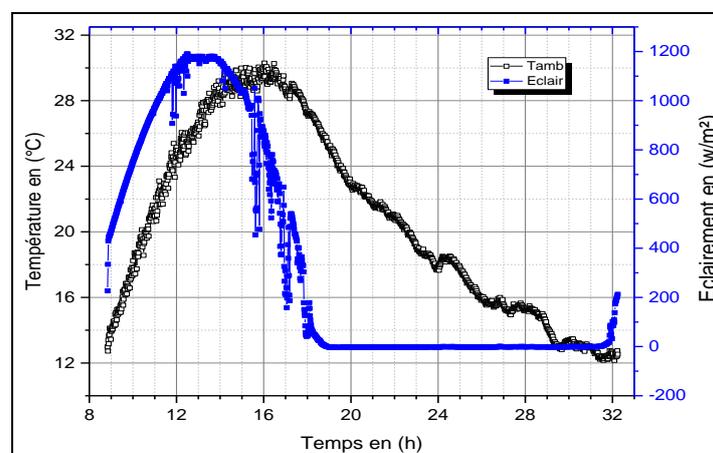


Figure V. 60 : L'évaluation de rayonnement solaire et la températures ambiante

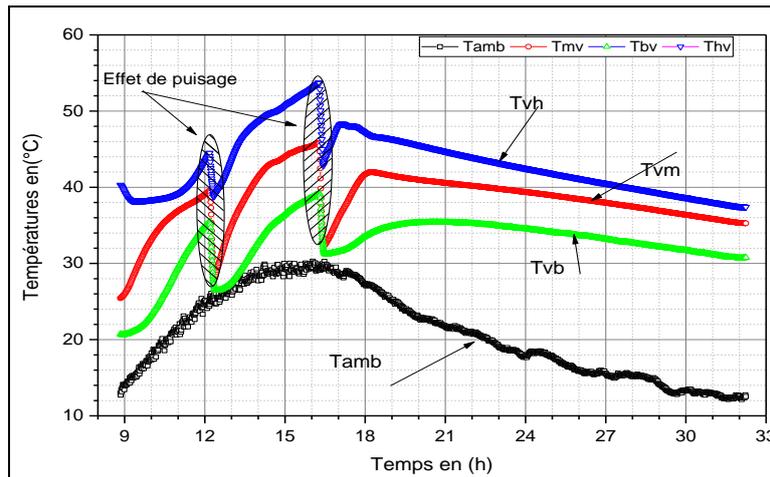


Figure V. 61 : Evolution des températures (T_{vb}), (T_{vm}) et (T_{vh}) dans la cuve de stockage.
17/02/2020.

Sur les figures V.60 en présentant l'évaluation de l'éclairement et de la température ambiante au cours de la journée du 17 février. On peut voir les différentes distributions des températures dans la cuve de stockage et l'influence du soutirage et admission d'eau à la matinée et l'après- midi figure V.61 sur l'évolution de la température de la couche inférieure.

19 /02/2020.

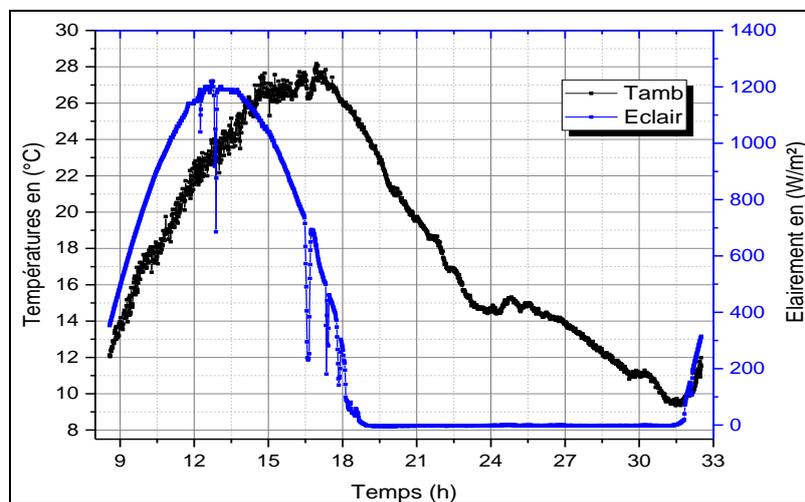


Figure V. 62 : Evaluation de l'éclairement et la température ambiante au cours du 19 février 2020.

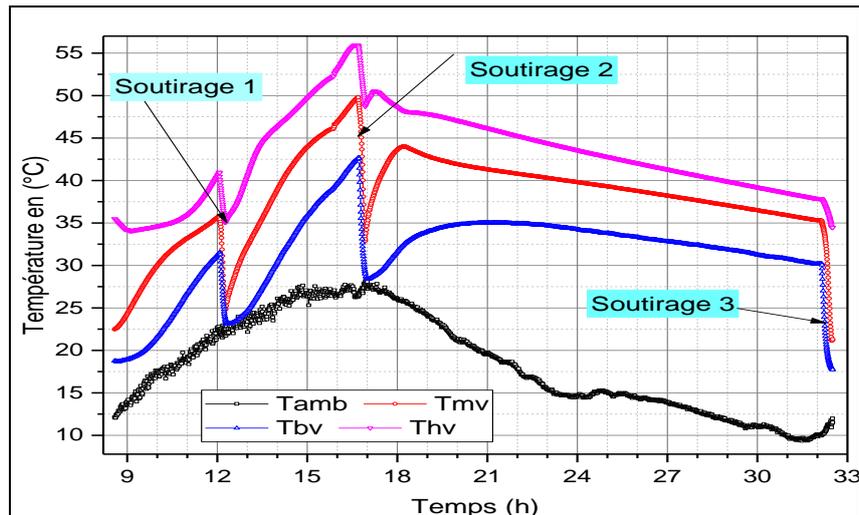


Figure V. 63 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage

Sur les figures V.62 et V.63 en présentant l'évaluation de l'éclairement et de la température ambiante et les évolutions de différentes températures dans la cuve de stockage.

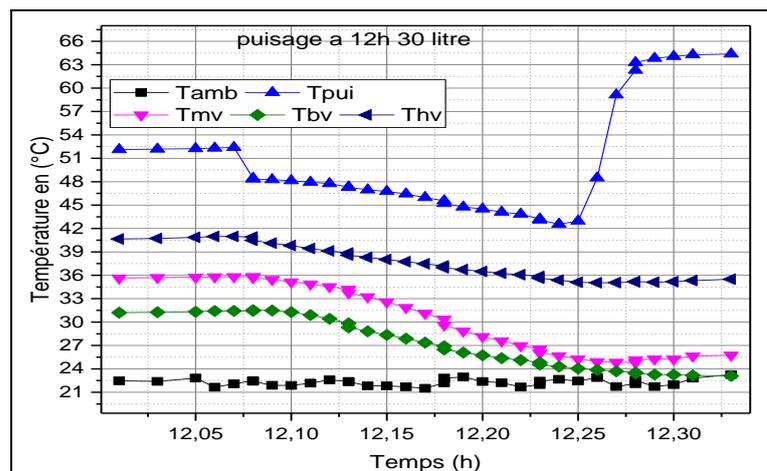


Figure V. 64 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 19/02/2020.

Sur la figure V.64 en présentant l'opération de puisage à 12 h. la température de l'eau provenant de capteur solaire était d'environ 51 °C, au début du soutirage la température de l'eau indiquée à la sortie de cuve était de 48 °C. Le temps de soutirage a duré 20 minutes, pendant lesquelles le système a fourni 30 litres d'eau chaude à une température moyenne de 45 °C. à la fin d'admission d'eau, la température de puisage était de 42 degrés Celsius.

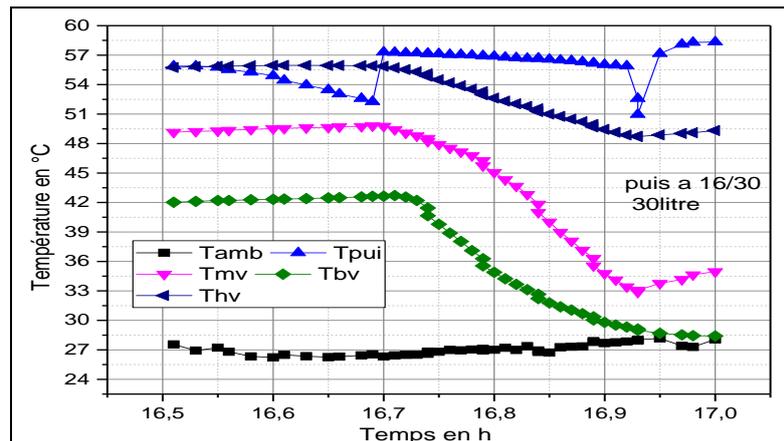


Figure V. 65 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage lors de la journée du 19 /02/2020.

Sur la figure V.65 en présentant l'opération de puisage à 16h30, 30 litres d'eau chaude ont été prélevés. Initialement, la température de l'eau provenant du capteur solaire était d'environ 52°C, le temps d'écoulement a duré 20 minutes, pendant lesquelles le système a fourni 30 litres d'eau chaude avec une température moyenne de 52°C. A la fin du processus d'extraction de l'eau, la température de puisage indiquée était de 55°C.

Dans les deux figures V.64 V.65 on constate que la stratification est remarquable par différents niveaux des températures enregistrées durant les tests. Où les couches inférieures sont plus touchées et la récupération dans l'après-midi est plus efficace figure V.65.

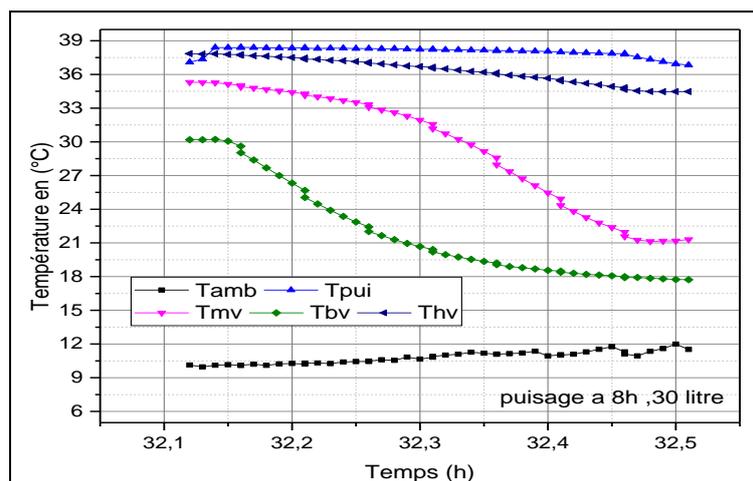


Figure V. 66 : Evolution de la température de l'eau dans la cuve de stockage la matinée de la journée du 20 /02/2020.

Le lendemain matin de 20/02/20, les températures à l'intérieur du réservoir se réparties entre 30°C et 40 ° C ; en raison des prélèvements d'eau la veille et les pertes résultant des basses températures nocturnes.

13 à 15/02/2020

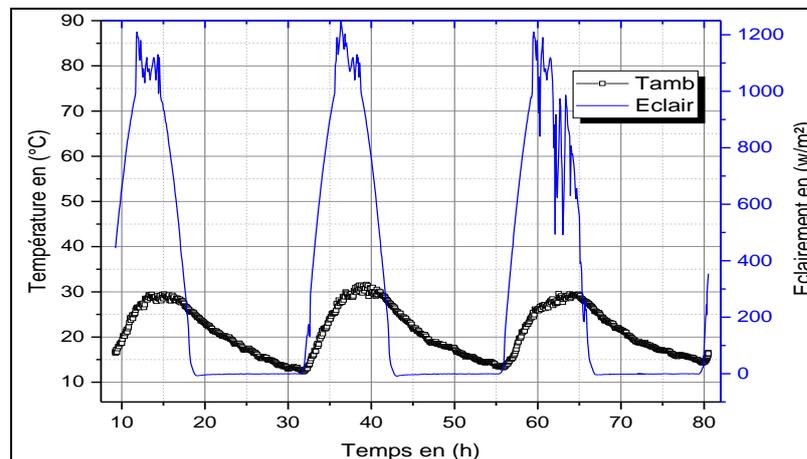


Figure V. 67 : Evaluation de températures ambiantes et l'éclairement pour les Jrs 13 à 15/02/2020

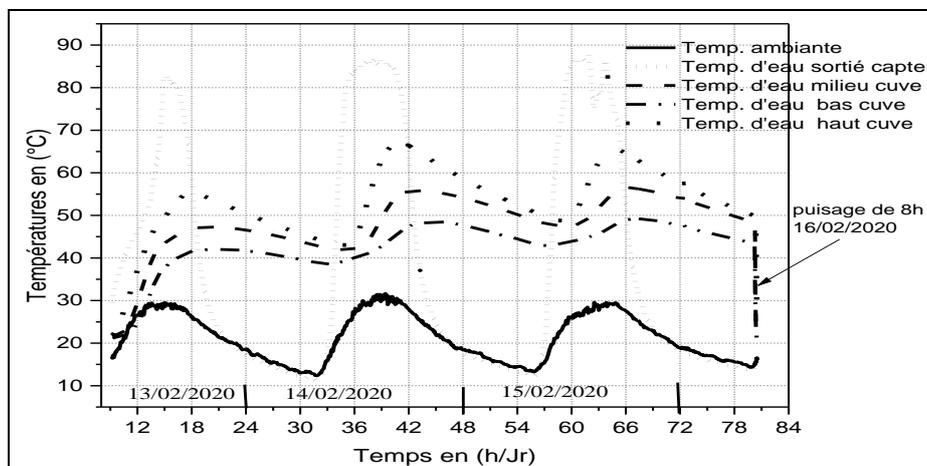


Figure V. 68 : Evaluation des températures durant 3 jrs de stagnation.

Le comportement du système pendant trois jours est illustré aux figures V.67 et V.68. Le bilan de température dans la cuve se comporte de manière identique sur trois jours malgré le fluctué de rayonnement enregistré le soir du troisième jour. L'effet de la température nocturne abaisse la température des couches supérieures de 10 °C. Contrairement à la strate moyenne et inférieure qui a maintenu dans une large mesure les températures acquises pendant la journée.

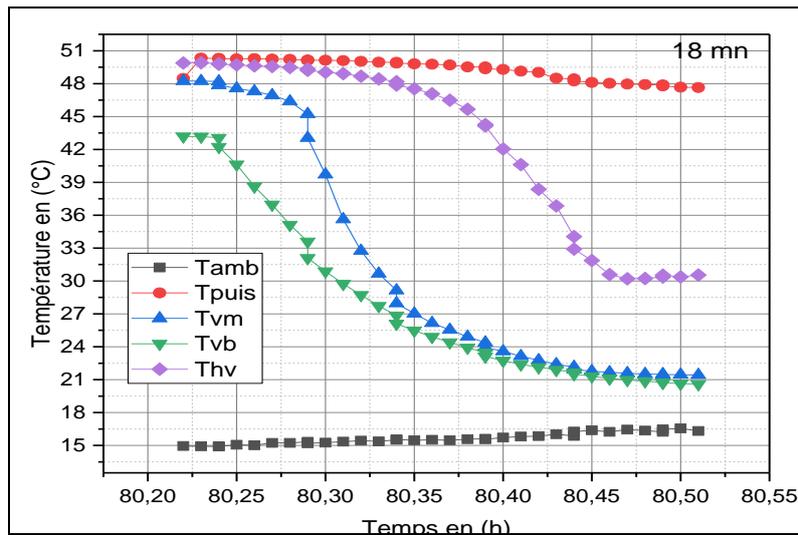


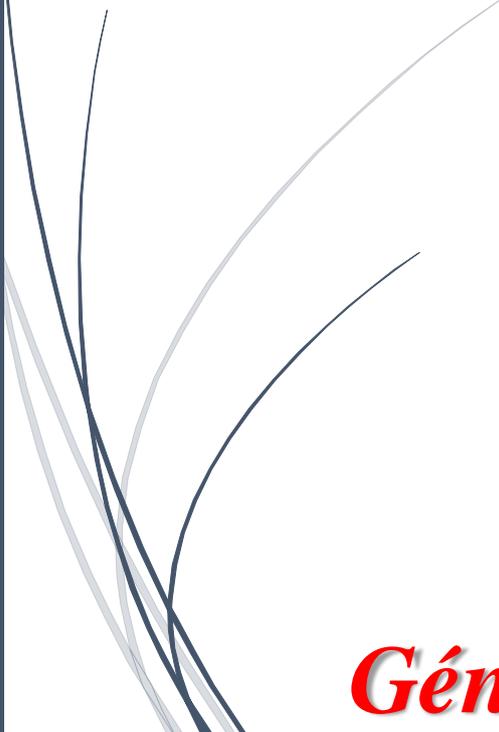
Figure V. 69 : Puisages après 3 jrs de stagnation. 13/14/15/02/2020

Sur la figure V.69 on observe que les températures des couches supérieures est supérieur de 40 °C après le premier puisage avec une vanne totalement ouverte. Donc malgré l'admission de l'eau froide à fort débit ; le système a gardé une quantité d'eau chaude assez chaude au niveau des couches supérieures, sachant que la température du réseau est plus proche de Tvb.

Les résultats de mesure des températures de puisage et du réseau sont présentés dans l'annexe. Voir annexe Tableau (f).



Conclusion



Conclusion
Générale.

1 Conclusion générale :

Notre pays, l'Algérie repose essentiellement sur les sources fossiles dans sa propre production ; mais vu le développement rapide de la technologie dans les domaines des énergies renouvelables, ces dernières années l'Algérie cherche d'autre source inépuisable et amies à l'environnement, parmi ces sources ; l'énergie solaire est considérée la plus importante.

Notre travail était concentré sur la réalisation et études des performances d'un chauffe-eau solaire rustique implantés en milieux sahariens. Pour cela on a utilisé les moyens disponibles localement dont le but est de résoudre les problèmes liés directement au coût du marché et encourager les citoyens d'aller vers la voie solaire dans les alternatives choisies. Habituellement, les zones isolées éloignées des centres de décision connaissent un net retard de développement, en particulier dans les secteurs vitaux.

Dans ce travail nous avons proposé un chauffe-eau solaire pour la production de l'eau chaude en se basant sur les matériaux de construction locaux, dont le but est d'avoir un système solaire à la portée de citoyen avec moindre coût opérant en milieux sahariens, suite aux conditions climatiques de la région d'Adrar et relative à la distribution moyenne de données climatiques mesurées (températures, rayonnements Global et Diffus, etc.) prendre en considération les autres travaux études relatives aux sites de la région saharienne.

Nous avons également défini le matériau isolant utilisé dans le système, le liège est un matériau local très disponible dans la zone désertique algérienne, ses propriétés thermiques sont très appropriées pour être l'une des isolants végétaux.

L'extraction de cette substance du dattier a une importance écologique et économique dans la vie humaine. Des oasis de palmiers qui connaissent un déclin dû à l'abandon et à la restriction des usages des restes de palmiers, comme c'était le cas à l'époque des ancêtres.

Pour vérifier la performance de notre système, deux configurations de chauffe-eau solaire ont subi des tests au même climat en circuit ouvert et fermé à circulation naturelle installé au l'unité de recherche en énergie renouvelable en milieu saharien Adrar. Ce test nous a permis de

- Confirmer notre choix exactement le choix de la matière thermique isolante.
- la température atteint durant les périodes hivernales.

- Du point de vue du site : Les sites d'Adrar, d'Ain Saleh et de Tindouf présentent le meilleur potentiel énergétique.

-durant les journées de testes le système à présenter une meilleure performance malgré parfois la présence de nuage ou de vent, les températures de puisages ou de la sortir de capteur restes élevés plus de 45 °C (tableau de l'annexe).

- Les températures dans la période hivernale sont très impressionnantes où la température ambiante basse moins de 20 °C le système a peu délivré des températures de l'eau chaude à 65 °C.

Notre choix en matière d'isolation est bénéfique : le lif de palmier dattier représente un matériau saine, écologique et économique. Les feuille de lif ont une structure fibreuse et forment une couche poreuse lorsqu'ils sont superposés les uns sur les autres. La conductivité thermique mesurée est de l'ordre 0.006 W/mk.

- Le système peut assurer une quantité d'eau chaude assuré important lors de trois puisages durant la journée et conserver des températures très appréciables à une température ambiante de la matinée de 12 °C ; le système à fournir 30 litres de l'eau chaude à 40 °C.

- La contribution de système calculé dans une journée claire est l'ordre 0.60 %.

- La configuration de la cuve de stockage permet de favoriser la stratification de l'eau stockée.

A partir des différents résultats obtenus tout au long de ce travail et en tenant compte de l'état d'avancement en matière de développement des systèmes solaires en Algérie et les besoins énergétiques des agglomérations au sud ; on ne peut que souhaiter la prolifération des systèmes de petites et moyennes envergures, tant pour des fins domestiques que de réponse aux besoins énergétiques des sites isolés.

Dans la limite de la disponibilité de données climatologiques sur tout le territoire saharien, ce travail pourrait être complété par une étude globale afin d'établir une cartographie des performances exégétiques de plusieurs systèmes solaires. Par ailleurs, l'application à des sites non sahariens (nord et hauts plateaux) permettra une meilleure mise en évidence des particularités liée aux différents sites.

Annexes

Annexe

Tableau(a) : Calcul du rendement horaire de capteur 24/01/2019 ($q=0.5$ l/mn)

Heurs	Ta (°c)	H _{in} (w/m ²)	Te (°c)	Ts (°c)	ΔT (°c)	Qu (w)	Qs (w)	η
09:00/09:30	7,3	521,62	11,78	19,68	7,9	275,82	547,70	0,50
09:30/10:00	8,94	690,4	12,95	25,56	12,61	439,95	724,92	0,60
10:00/10:30	10,87	847,67	19,98	28,75	8,77	305,17	890,05	0,34
10:30/11:00	12,53	983,8	19,9	29,72	9,82	341,71	1032,99	0,33
11:00/11:30	13,66	1111,29	20,25	33,39	13,14	457,14	1166,85	0,39
11:30/12:00	15,2	1215,83	20,8	37,07	16,27	566,03	1276,621	0,44
12:00/12:30	16,19	1284	21,12	39,13	18,01	626,29	1348,27	0,46
12:30/13:00	17,24	1330	21,64	40,48	18,84	655,15	1396,55	0,47
13:00/13:30	18,77	1351	22,17	41,8	19,63	682,47	1418,55	0,48
13:30/14:00	19,81	1350,33	22,39	42,23	19,84	689,77	1417,84	0,48
14:00/14:30	20,23	1319,33	22,53	41,9	19,37	673,43	1385,29	0,48
14:30/15:00	20,5	1262,91	22,67	41,78	19,11	664,39	1326,05	0,50
15:00/15:30	20,47	1222,38	22,69	41,62	18,93	658,14	1283,49	0,51

Tableau (b) : Calcul du rendement horaire de capteur 06/02/2019($q=0.5$ l/mn)

Heurs	Ta (°c)	H _{in} (w/m ²)	Te (°c)	Ts (°c)	ΔT (°c)	Qu (w)	Qs (w)	η
09:30/10:00	9,94	613,3	14,53	21,22	6,69	233,268	643,965	0,362
10:00/10:30	11,55	753,66	15,56	26,02	10,46	364,562	791,343	0,460
10:30/11:00	13,29	886,16	16,55	30,18	13,63	474,885	930,468	0,510
11:00/11:30	14,17	996,54	17,58	34,03	16,45	572,902	1046,367	0,547
11:30/12:00	15,24	1058,66	18,87	37,55	18,68	649,827	1111,593	0,584
12:00/12:30	15,52	1097,33	19,88	39,45	19,57	680,984	1152,196	0,591
12:30/13:00	15,8	1155,33	20,85	41,5	20,65	718,078	1213,096	0,591
13:00/13:30	16,69	1178	22,08	43,72	21,64	752,360	1236,9	0,608
13:30/14:00	17,16	1171,66	22,69	44,75	22,06	766,962	1230,243	0,623
14:00/14:30	17,74	1131,33	23,05	44,9	21,85	759,296	1187,896	0,639
14:30/15:00	17,71	1074,33	23,28	44,15	20,87	725,241	1128,046	0,642
15:00/15:30	17,79	982,17	23,57	42,74	19,17	666,165	1031,278	0,645
15:30/16:00	17,82	885,5	23,86	40,99	17,13	595,274	929,775	0,640
16:00/16:30	17,57	758,33	23,98	38,3	14,32	497,626	796,246	0,624
16:30/17:00	17,28	615,86	23,98	35,91	11,93	414,572	646,653	0,641
17:00/17:30	16,49	468,11	23,64	32,55	8,91	309,626	491,515	0,629
17:30/18:00	15,5	271,7	22,8	25,78	2,98	103,605	285,285	0,363

Tableau (c) : Calcul du rendement horaire de capteur 15/10/2019 $q=0.3l/mn$

Heurs	Ta (°c)	H _{in} (w/m ²)	Te (°c)	Ts (°c)	ΔT (°c)	Qu (w)	Qs (w)	η
08:30/09:00	25,57	469,35	27,19	36	8,81	183,45	492,81	0,37
09:00/09:30	26,75	584,23	27,63	41,03	13,4	279,03	613,44	0,45
09:30/10:00	27,9	704,88	28,3	46,34	18,04	376,04	740,12	0,50
10:00/10:30	29,76	810,98	29,12	51,24	22,12	460,35	851,52	0,54
10:30/11:00	31,32	900	29,91	55,66	25,75	535,90	945	0,50
11:00/11:30	32,44	972,15	30,71	59,28	28,57	594,26	1020,75	0,58
11:30/12:00	33,34	1024	31,58	62,27	30,69	638,17	1075,2	0,59
12:00/12:30	34,66	1058,66	32,52	64,51	31,99	664,98	1111,59	0,59
12:30/13:00	35,25	1067,66	33,58	66,93	33,35	693,03	1121,04	0,61
13:00/13:30	35,66	1058,88	34,48	68,8	34,32	712,88	1111,82	0,64

Tableau (d) : Calcul du rendement horaire de capteur 17/10/2019 ($q=0.3 l/mn$)

Heurs	Ta (°c)	H _{in} (w/m ²)	Te (°c)	Ts (°c)	ΔT (°c)	Qu (w)	Qs (w)	η
10:00/10:30	28,72	407,52	26,72	36,2	9,48	197,40	427,89	0,46
10:30/11:00	29,68	316,89	27,17	36,86	9,69	201,66	332,73	0,60
11:00/11:30	30,33	318,63	27,59	37,3	9,71	202,08	334,56	0,60
11:30/12:00	30,79	264,39	27,94	36,89	8,95	186,26	277,60	0,67
12:00/12:30	31,36	311,22	28,26	37,03	8,77	182,51	326,78	0,55
12:30/13:00	31,66	428,29	28,72	40,16	11,44	238,08	449,70	0,52
13:00/13:30	31,79	548,02	29,32	43,82	14,5	301,77	575,42	0,52
13:30/14:00	31,94	603,12	30,09	49,22	19,13	398,13	633,27	0,62

Tableau (e) : Calcul du rendement horaire de capteur 16/10/2019 ($q=0.3 l/mn$).

Heurs	Ta (°c)	H _{in} (w/m ²)	Te (°c)	Ts (°c)	ΔT (°c)	Qu (w)	Qs (w)	η
08:30/09:00	27,93	421,81	27,49	33,59	6,1	126,95	442,90	0,29
09:00/09:30	28,78	472,89	27,93	39,73	11,8	245,58	496,53	0,49
09:30/10:00	30,45	626,99	28,59	44,93	16,34	340,16	658,34	0,52
10:00/10:30	31,65	686,03	29,35	49,41	20,06	417,49	720,33	0,58
10:30/11:00	32,18	674,29	29,97	48,83	18,86	392,39	708,00	0,55
11:00/11:30	33,21	739,57	30,68	52,35	21,67	450,99	776,55	0,58
11:30/12:00	34,22	952,45	31,56	58,22	26,66	554,37	1000,07	0,55
12:00/12:30	34,87	872,73	32,32	58,15	25,83	536,94	916,37	0,59
12:30/13:00	35,32	1038,39	33,33	62,92	29,59	614,90	1090,31	0,56
13:00/13:30	35,76	988,11	34,25	64,2	29,95	622,17	1037,52	0,60
13:30/14:00	35,84	841,62	35,08	64,69	29,61	614,89	883,70	0,70
14:00/14:30	36,42	796,87	35,67	59,34	23,67	491,54	836,71	0,59
14:30/15:00	36,01	637,36	35,97	58,9	22,93	476,17	669,23	0,71
15:00/15:30	36,15	605,44	36,28	57,35	21,07	437,39	635,71	0,69

15:30/16:00	36,22	416,92	35,66	51,23	15,57	323,54	437,77	0,74
16:00/16:30	35,87	256,92	35,28	46,97	11,69	242,92	269,77	0,90
16:30/17:00	35,55	170,75	34,8	42,16	7,36	152,94	179,29	0,85

Tableau 'f). Relevé des températures de puisage et du réseau le long du test

Jour 2020	Heur de puisage	Masse puisé	T _{rés}	T _{pui}	T _{amb}	obs
			Réseau	Puisage	Ambiante	
13-févr	8	80	18,68711	45,94928	15,65342	60 l > 40 °C
17-févr	12	30	24,10734	52,93483	25,34761	
	16/30	30	30,33551	60,41214	29,49025	
18-févr	8	25	15,28278	39,39787	11,07486	
	13	25	26,3548	58,35249	26,45757	
	16	20	30,38242	56,29888	27,50271	
19-févr	8	25	14,84264	39,32032	11,02867	38 l > 25 °C
	12	30	22,5911	50,29566	22,26181	
	16/30	30	30,57637	56,00434	27,04995	
20-févr	08/	30	18,31762	42,04823	11,89553	
	12	30	22,40113	45,93343	23,55564	
	16/30	30	26,94533	52,75601	27,85916	
23-févr	8	100	18,31762	42,04823	11,89553	60 l > 45 °C
24-févr	12	50	21,47245	47,38585	21,45076	
	16/20	50	25,5852	51,93952	25,44362	
01-mars		60	19,92082	47,01245	16,87518	60 l > 0 °C
02-mars			20,13069	46,97991	16,8902	
03-mars		80	21,69283	47,99093	17,84424	20 l > 51 °C ; 20 l > 50.4 °C ; 20 l > 40 °C ; 08 l > 35 °C.
04-mars		60	21,82948	42,17717	18,71185	20 l > 42.6 °C ; 20 l > 42.2 °C ; 20 l > 40.8 °C.
05-mars		60	22,1273	46,44575	18,88919	20 l > 47.0 °C ; 20 l > 46.6 °C ; 20 l > 45.6 °C.

Montage cap pp + cap z

17-mars		100	22,59478	53,297	18,96028	100 l > 49 °C.
22-mars		100	26,42375	53,3595	20,77443	
27-mars		130	21,89967	45,79788	20,5642	
29-mars		170	27,35971	45,05645	25,02843	
01-avr			33,47483	54,59227	25,76184	
04-avr		100	24,00762	57,45691	29,23914	
10-avr		100	26,31397	42,68464	25,3512	