

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen
Faculté des Sciences



Département de Physique

Laboratoire de Recherche : URMER

Unité de Recherche Matériaux et Energies Renouvelables

Mémoire de Master
Option

Energétique et Matériaux

Présenté par :

M^r BERCHIDE Abdeslam

Thème

**Etude et expérimentation d'un chauffe-eau solaire de
type capteur-stockeur**

Soutenu Oralement le 6 juillet 2011 devant le Jury composé de :

M^{me} RAHMOUN Khadidja	<i>Enseignant</i>	Université de Tlemcen	Présidente
Mr ZERGA Abdellatif	<i>Enseignant</i>	Université de Tlemcen	Encadreur
Mr HARMIM Arezki	<i>Enseignant</i>	URER MS Adrar	Co-Encadreur
M^r SAIM Rachid	<i>Enseignant</i>	Université de Tlemcen	Examineur
Mr BENYOUCEF Abdallah	<i>Enseignant</i>	Université de Tlemcen	Examineur

Année université: 2010 - 2011

الخلاصة:

خلال الفترة التربصية ، كنا مهتمين بالدراسة التجريبية لمسخن ومخزن الماء العامل بالطاقة الشمسية الذي تم انجازه من طرف ورشة الوحدة (URER/MS) أدرار, هذا النموذج يتكيف مع الظروف المناخية القاسية للبيئة الصحراوية. فقد تقدم في بادئ الأمر استعراضا لمختلف الدراسات والعمليات الحسابية الشمسية وسخانات المياه العاملة بالطاقة الشمسية . ومن تم قمنا بوضع تكلفة هذا النموذج التي قد بلغت 16000 دج بمساحة 0.76 متر مربع، وفي الأخير قمنا بتقييم الأداء الحراري للنظام : المردود المتوسطي للإنتاج اليومي لكلا التوجيهين (الشتوي والسنوي) الذي كان بالقرب أو قد يتجاوز قيمة 50 % . وكانت كمية المياه الساخنة المنتجة بمعدل تدفق ثابت (1.5 لتر / دقيقة) تقارب 63 لترا من الماء الساخن بدرجة حرارة تجاوزت 50 درجة مئوية في نهاية اليوم, وقد تحصلنا على نفس الحجم يفوق 35 درجة مئوية بعد ليلة كاملة .

الكلمات الرئيسية:

التسخين الشمسي للماء, المسخن والمخزن, الطاقة الشمسية, الأداء الحراري

Résumé :

Pendant la durée de stage, nous intéressons à l'expérimentation et l'étude d'un chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur réalisé par les moyens de l'atelier de l'URER/MS (Adrar) adapté aux conditions climatiques hostiles du milieu saharien. Ce prototype est destiné à la production d'eau chaude sanitaire naturellement par rayonnement solaire. En premier lieu, nous présentons une recherche bibliographique sur le gisement solaire et les chauffe-eau solaires .En suit nous caractérisons notre système et leur prix de revient qui est proche de 16 000 DA à une surface de captation de 0.76 m² ; et en fin, nous évaluons les performances thermiques du système tel que : Le rendement journalier moyenne dans les deux cas de calage (hivernale et annuel), qui est au alentour ou bien dépassé la valeur de 50% ; Et la quantité d'eau chaude produite à un débit fixé (1.5 l/min), nous trouvons que le système arrive à fournir 63 litres d'eau chaude dont la température supérieure à 50°C à l'afin de jour, et le même volume obtenu supérieure à 35°C après toute une nuit.

Mots clés :

Chauffe-eau solaire, capteur-stockeur, Énergie solaire, performances thermiques

Abstract:

During the traineeship period, we were interested in experimentation and study of a solar water heater-type sensor storekeeper made by means of the workshop of URER/MS (Adrar) adapted to harsh climatic conditions of the Saharan environment. This prototype is intended to produce hot water naturally by solar radiation. First, we present a literature review on solar radiation and solar water heaters. In the following we characterize our system and its cost is close to 16 000 DA with a collecting area of 0.76 m², and finally we evaluate the thermal performance of the system such as: the average daily output for both calibration (winter and annual), which is around or exceeded the value of 50% and the amount of hot water produced in certain fixed flow rate (1.5 l / min), we find that it goes to provide 63 liters of hot water whose temperature exceeds 50 ° C in order to date, and the same volume obtained above 35 ° C after all overnight.

Keywords:

Solar water heater, sensor storekeeper, solar energy, thermal performance

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu et avant tout ALLAH le tout puissant, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce travail dans les meilleures conditions.

Je remercie également ma famille pour les sacrifices qu'elles ont faits pour que je termine mes études.

Un gros merci à tous ceux et celles qui de loin ou de près ont contribué à élaborer ce modeste travail. Je cite nommément :

A mon encadreur Mr. ZERGA Abdellatif, Enseignant à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen pour avoir accepté de nous prendre en charge, et la sollicitude avec laquelle il a suivi et guidé ce travail.

J'exprime mes sincères remerciements à Mr. HARMIM Arezk chargé de Recherche à URER MS (Adrar) qui m'a permis de réaliser ce travail sous sa direction et pour le soutien précieux tout le long de mon stage.

Également je remercie sincèrement :

- *Mme RAHMOUN Khadidja, Enseignante à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen qui a bien voulu accepter de présider le jury de ma soutenance.*
- *Mr. SAIM Rachid, Enseignant à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.*
- *Mr. BENYOUCEF Abdallah, Enseignant à l'université Abou Bekr Belkaïd-Tlemcen d'avoir accepté d'examiner mon mémoire.*
- *Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de physique.*

BERCHID ABDESLAM

Sommaire

Introduction

CHAPITRE I : Présentation de l'unité

I.1 Présentation de l'unité.....2

I.2. Organisation scientifique.....3

I.2.1 La division conversion photovoltaïque.....4

I.2.2 La division conversion thermique et thermodynamique.....4

I.2.3 La division énergie éolienne.....5

I.2.4 la division bioénergie et environnement.....6

CHAPITRE II : Gisement Solaire

II.1 Introduction.....7

II.2 Le soleil7

II.3 Structure et composition de l'atmosphère8

II.4 L'effet de l'atmosphère10

II.4.1 Émissions solaire.....10

II.4.2 Émissions terrestres.....11

II.4.3 Deux autres termes existent.....12

II.5 Le rayonnement solaire au sol..... 13

II.6 Géométrie Terre-Soleil14

II.6.1 Les coordonnées horaires.....14

II.6.1.1 La variation de la déclinaison du soleil.....14

II.6.1.2 Angle horaire.....14

II.6.2 Les coordonnées horizontales.....16

II.6.2.1	Hauteur du soleil	16
II.6.2.2	Azimut du soleil	16
II.6.3	Les coordonnées géographiques.....	17
II.6.3.1	La latitude.....	17
II.6.3.2	La longitude.....	18
II.7	La constante solaire.....	18
II.8	Les temps solaires.....	19
II.9	Potentiel solaire en Algérie.....	20
CHAPITRE III : Rappel thermique et la théorie de chauffe eau solaire		
III.1	Rappel thermique	22
III.1.1	Notions sur la conduction thermique.....	22
III.1.2	La convection	23
III.1.3	Notion sur le rayonnement	24
III.1.4	Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide	25
III.2	La production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire.....	26
III.2.1	Les chauffe-eau solaires conventionnels	26
III.2.2	Les chauffe-eau solaires de type capteur-stockeur	29
III.2.2.1	Compositions du chauffe-eau solaire capteur-stockeur.....	30
III.2.2.1.1	L'élément capteur-stockeur.....	30
III.2.2.1.2	Le caisson et l'isolation	30
III.2.2.1.3	La couverture transparente.....	30
III.3	Présentation de quelques modèles	31
III.4	Conclusion.....	34

CHAPITRE IV:	Réalisation du prototype et instrumentation	
IV.1	Réalisation du prototype	35
IV.1.1	Introduction	35
IV.1.2	Description du prototype réalisé à l'URER/MS.....	35
IV.1.3	Evaluation du prix de revient du capteur stockeur.....	43
IV.2	Instrumentation.....	45
IV.2.1	Préparation et installation des thermocouples.....	45
IV.2.2	Mesure de l'éclairement solaire.....	47
IV.2.3	Description du banc d'essai expérimental	47
IV.2.4	Mode opératoire.....	50
IV.3	Déroulement des essais.....	53
IV.4	Conclusion.....	53
CHAPITRE V:	Résultats et discussions	
V.1	Introduction	54
V.2	Le capteur en calage hivernal, c'est-à-dire incliné de 50° par rapport à l'horizontale.....	54
V.3	Evolution du rendement journalier et les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié par le premier calage.....	65
V.4	Evaluation de la quantité d'eau chaude du système.....	67
V.5	Evolution du rendement journalier et les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié par le deuxième calage	75
V.6	Comparaison des rendements entre les deux calages.....	76
V.7	Conclusion.....	77
	Conclusion générale.....	78

NOMENCLATURE

CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelable
EPST	Etablissement Public à Caractéristique Science et Technique
URER/MS	Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien
UDES	Unité de Développement d'Équipement Solaire
C	Le montant total (DA)
C_m	le coût de main d'œuvre total (DA)
Constantan	c'est un alliage formé par deux métaux « nickel et cuivre ».
C_p	Le montant des produits consommés (DA)
CPC	concentrateur parabolique composé
GES	gaz à effet de serre
P	le prix du système (DA)
h	la hauteur du soleil (°)
ϕ	Latitude d'un lieu (°)
δ	La déclinaison (°)
ω	L'angle horaire (unités de temps)
I_0	La constante solaire $W.m^{-2}$
m	numéro du mois dans l'année;
n	numéro du jour dans le mois.
I_c	la valeur corrigée de la constante solaire
Λ	La longitude (°)
H_{in}	L'énergie solaire incidente sur le plan d'ouverture du système (Wh/m ²)
E	L'éclairement solaire incident sur le plan d'ouverture du capteur- stockeur (w/m ²)

A	La surface de captation du système (m^2)
T_a	La température ambiante moyenne durant la période du test Δt ($^{\circ}C$)
$T_{e,i}$ et $T_{e,f}$	les températures de mélange moyen initial (au matin) et final (au soir) ($^{\circ}C$)
I_j	L'éclairement solaire moyen sur la période du test (W/m^2)
ΔT_j	Différence de température journalière
I_0	La constante solaire
m	numéro du mois dans l'année;
C_e	La consommation d'énergie électrique
a	azimut géographique ($^{\circ}$)
TSV	temps solaire vrai (heure)
TL	temps legal (heure)
DEL	la correction due au changement d'heur légale (heure)
ET	équation de temps (heure)
TU	le temps moyen du méridien de Greenwich (heure)
N°	le numéro du jour dans l'année
TSM	le temps solaire moyen (heure)
η_j	Le rendement moyen journalier
Δt	Différence de temps (heure)
Q_{st}	Est l'énergie emmagasinée par l'eau stockée dans le système (Kj)
dQ	énergie élémentaire (Joule)
λ	Conductivité thermique du matériau ($W.m^{-1}.K^{-1}$)
dx	L'épaisseur (m)
dt	temps élémentaire (s)
φ	la densité de chaleur (W/m^2)

INTRODUCTION

Sachant 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 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.

Le chauffe-eau solaire est manifestement aujourd'hui « l'outil solaire » le plus développé dans le monde entier. Les chauffe-eau solaires existent en effet par millions au Japon, en Israël et au USA, par dizaines de milliers en France, et rares sont les pays où ils sont totalement inconnus, [12].

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

Chez nous le chauffe-eau solaire reste très peu utilisé 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 non adapté aux conditions des régions sahariennes (poids élevé et non adapté à l'habitat saharien, des températures très élevées en période estivale).

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 du type capteur-stockeur 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 indirects, où la cuve de stockage représente une grande partie du prix de revient du système ; le capteur-stockeur 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 de type capteur-stockeur 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.

Dans une première partie de notre rapport, nous présentons des généralités sur le gisement solaire puis une étude bibliographique sur les chauffe-eau solaires de manière générale puis de façon détaillée nous présentons le prototype construit à l'URER/MS. Dans une deuxième partie, nous exposons l'étude expérimentale de ce prototype avec la description du banc d'essai expérimental, les différents instruments utilisés ainsi que les résultats obtenus et leur interprétation.

Chapitre I

Présentation de l'unité
de recherche

I.1 Présentation de l'unité :

L'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URER.MS) est une structure de recherche, créée par arrêté ministériel N°76 du 22 mai 2004 au sein de L'EPST centre de développement des énergies Renouvelable de Bouzaréah.

Les activités de recherche scientifique et de développement technologique menées à L'URER/MS s'inscrivent dans le cadre du programme national de recherche en énergies renouvelables, considéré par les pouvoirs publique comme prioritaire et mobilisateur.

La vocation essentielle de L'Unité est la recherche scientifique appliquée et le développement technologique. Elle est chargée d'entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation pour la promotion et de développement des énergies renouvelables dans les régions sahariens. Il s'agit de:

- collecter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes,
- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipement de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse,
- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne,
- Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et de d'endurance des équipements des énergies solaires et éoliennes,

- Entreprendre des travaux de production et de valorisation de la biomasse à des fins énergétique, environnementale et agronomiques.

I.2 Organisation scientifique:

L'unité de recherche, comprend (4) divisions:

- 1) La division conversion photovoltaïque,**
- 2) La division conversion thermique thermodynamique,**
- 3) La division énergie éolienne,**
- 4) La division bioénergie et environnement.**

I.2.1 La division conversion photovoltaïque :

Cette division a pour mission de maîtriser, d'étudier et de développer les techniques et les systèmes nécessaires à la conversion de l'énergie solaire radiative en énergie directement utilisable. Elle est donc chargée de:

- ✓ La collecte, de l'exploitation et du traitement des données météorologiques nécessaires à l'évaluation du gisement solaire,
- ✓ La conception et la réalisation des dispositifs de régulation, de contrôle et de conversion destinés aux systèmes et applications photovoltaïque,
- ✓ La conception, l'étude et la réalisation de divers systèmes photovoltaïques destinés aux pompages de l'eau, la production de froid et l'éclairage domestique et publique,
- ✓ La mise en place de bancs d'essais pour équipements et matériels faisant partie des systèmes photovoltaïque,
- ✓ Des études concernant la qualification des sites d'installation des équipements d'exploitation d'énergie solaire,

- ✓ La mise en œuvre de travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploitation, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire.
- ✓ Développement de l'atelier de circuits imprimés.

Cette division est composée de cinq (05) équipes de recherche:

- 1. Equipe Pompage Photovoltaïque,**
- 2. Equipement de Gisement solaire,**
- 3. Equipe Froid Photovoltaïque,**
- 4. Equipe Electronique Systèmes,**
- 5. Equipe Installations De Puissance.**

I.2.2 La division conversion thermique et thermodynamique :

Cette division entreprend des activités de recherche sur: L'Héliothermie et à pour principales missions :

- ✓ L'étude, la conception, la réalisation, l'expérimentation et le développement des systèmes de conversion de l'énergie solaire en énergie calorifique utilisable dans différents domaines d'applications thermiques, mécaniques ou électriques,
- ✓ Le suivi d'endurance et de fiabilité des systèmes et équipements en milieu saharien,
- ✓ L'augmentation du taux d'intégration des systèmes solaires thermiques,
- ✓ La bioclimatique et l'architecture solaire,
- ✓ La valorisation des matériaux locaux l'habitat saharien.

La division conversion Thermique et Thermodynamique se compose de cinq (05) équipes de recherche:

- 1. L'équipe de systèmes solaire,**
- 2. L'équipe de séchage solaire,**
- 3. l'équipe de stockage d'énergie,**
- 4. l'équipe de Bioclimatique,**
- 5. l'équipe optimisation de la consommation énergétique des habitations.**

I.2. 3 La division énergie éolienne :

La division énergie éolienne a pour mission de maîtriser les techniques et les systèmes nécessaires à la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique directement utilisable dans différents champs d'applications.

Elle est chargée notamment de :

- ✓ la collecte, de l'exploitation et du traitement des données météorologiques nécessaires à l'évaluation du gisement éolien, pour un meilleur dimensionnement des systèmes de conversion, la qualification des sites d'installation des équipements d'exploitation d'énergie éolienne,
- ✓ l'étude, l'installation et l'expérimentation des éoliennes destinées au pompage de l'eau et à la production d'électricité,
- ✓ la mise en œuvre des travaux d'essais de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie éolienne,
- ✓ l'étude de faisabilité des systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables (éolienne, photovoltaïque, micro hydraulique), pour la production d'électricité,
- ✓ la simulation et la modélisation des aérogénérateurs,
- ✓ l'évaluation du cout réel de production (cout du m³ d'eau ou le cout du kilowatt heure d'électricité) et comparaison avec d'autres sources d'énergie,
- ✓ l'étude de l'ensemble des pièces des aérogénérateurs (hélice, système électrique ...) et des propriétés mécaniques (résistance, rigidité...),
- ✓ l'étude de la faisabilité technique et économique des parcs éoliens raccordés au réseau électrique.

Cette division est composée de 05 équipes de recherche :

- 1. Equipe aérodynamique des éoliennes,**
- 2. Equipe pompage éolien,**
- 3. Equipe électromécanique des éoliennes,**
- 4. Equipe systèmes hybrides,**
- 5. Equipe mécaniques des éoliennes.**

I.2. 4 la division bioénergie et environnement :

Cette division a pour missions de développer des activités de recherche sur la valorisation de la biomasse à des fins énergétiques avec des retombées environnementales et agronomiques positives.

Les activités de recherche s'articulent autour :

- ✓ L'étude et l'évaluation du gisement de biomasse à l'échelle locale,
- ✓ L'exploitation et la valorisation des déchets organiques à des fins énergétiques, avec des retombées environnementales et agronomiques, à travers la production de bio alcool et de biogaz,
- ✓ La maîtrise des techniques de mise en œuvre du micro algues pour la production de bio hydrogène à l'échelle pilote,
- ✓ L'élaboration d'études technico-économique des procédés développés en vue de la réalisation d'installations sur site réel (production de biogaz plus particulièrement).

Cette division est constituée de quatre (04) équipes de recherche :

- 1. Equipe gisement biomasse,**
- 2. Equipe bio alcool,**
- 3. Equipe biogaz,**
- 4. Equipe bio hydrogène.**

Chapitre II

Gisement Solaire

II.1 Introduction

La connaissance du gisement solaire est essentielle pour le calcul de diverses performances de systèmes liées au solaire telles que les panneaux solaires photovoltaïques, pour la construction de bâtiment avec la perspective d'une meilleure isolation thermique adaptée au lieu géographique, aussi pour le chauffage de locaux par l'intermédiaire exclusif du solaire, ou bien même et très essentiellement pour notre travail qui concerne les chauffe-eau solaires.

II.2 Le soleil :

Le Soleil est une étoile – notre étoile – vu de notre planète, il se présente sous la forme d'un disque assez homogène et apparaît sous un angle d'un peu plus d'un demi-degré. Il faudrait donc 93 000 soleils côte à côte pour occuper l'étendue de la voûte céleste. Son rayon est 109 fois celui de la Terre (soit 696 000 km) et sa masse 333 000 fois celle de notre planète. La lune est 400 fois plus petite que le Soleil, mais 400 fois plus près de la Terre, ce qui explique la taille apparente similaire des deux astres dans le ciel, ce dont on peut se rendre compte en particulier lors des éclipses de Soleil [4]. Le Soleil n'est pas une sphère homogène, on peut y distinguer trois régions principales [5] :

- a. **L'intérieur:** où se crée l'énergie par réaction thermonucléaire et qui est inaccessible aux Investigations, car le rayonnement émis dans cette région est totalement absorbé par les couches extérieures. La température atteint plusieurs millions et la pression un milliard d'atmosphère.
- b. **La photosphère:** l'épaisseur est d'environ 300 km qui est responsable de la presque totalité du rayonnement solaire que nous recevons.

- c. **Chromosphère et couronne solaire:** où la matière est très diluée, fait qui explique bien que la température y soit très élevée (1 million de degrés), le rayonnement émis est très faible.

II .3 Structure et composition de l'atmosphère :

L'atmosphère est constituée de plusieurs couches de caractéristiques différentes, ce sont:

- ❖ La troposphère, entre le sol et 15 km d'altitude.
- ❖ La stratosphère entre 15 et 80 km d'altitude.
- ❖ L'ionosphère entre 80 et 200 km d'altitude.

Les caractéristiques absorbantes de l'atmosphère sont déterminées par la présence de:

- ❖ CO₂ (0,03%)
- ❖ Vapeur d'eau: en quantité variable caractérisée par l'épaisseur d'eau condensable qui est l'épaisseur d'eau que l'on obtiendrait en condensant toute la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.
- ❖ Ozone O₃ située entre 10 et 30 km d'altitude.
- ❖ Aérosols: grains de sable, poussières, fumées...

On trouvera sur la figure II-1, la répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol terrestre avec indication des gaz partiellement opaques qui filtrent ce rayonnement selon longueur d'onde [7].

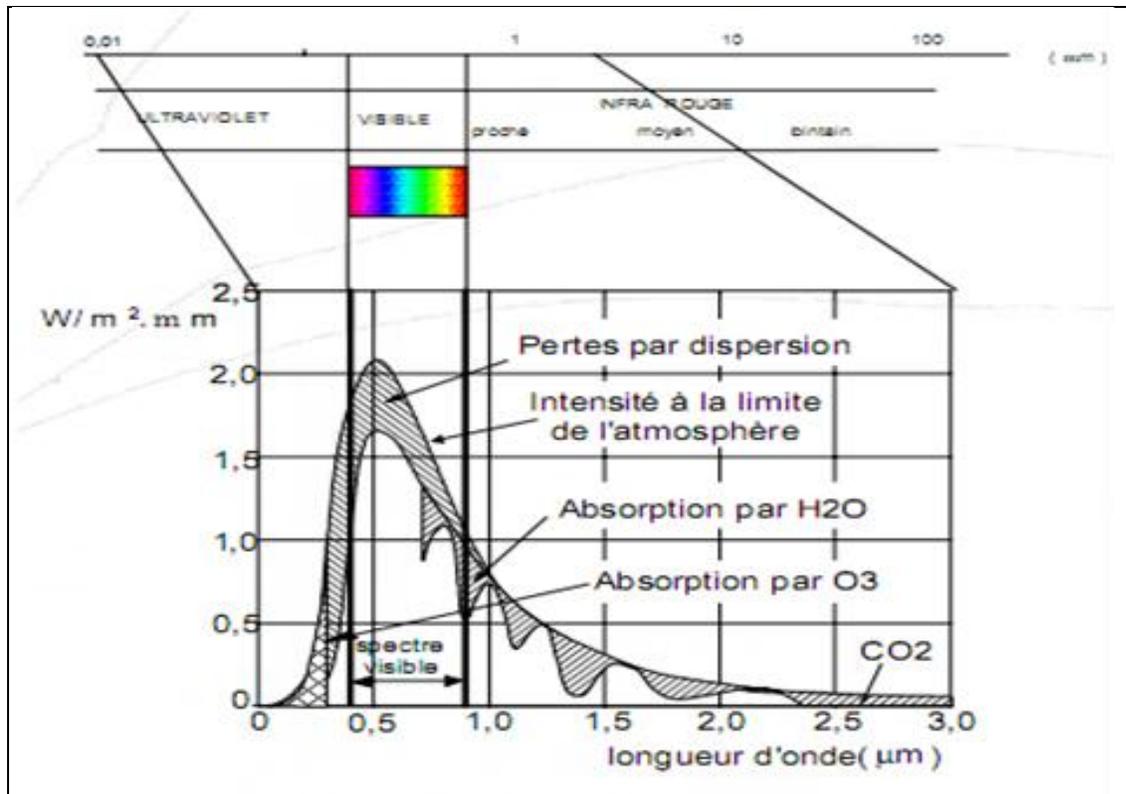


Figure II-1: Répartition spectrale du rayonnement solaire au niveau du sol [7]

Les gaz non transparents de l'atmosphère (CO_2 , O_3 , H_2O) émettent vers la Terre un rayonnement dans les principales bandes suivantes :

- Vers 14,7 μm pour le CO_2 .
- Entre 5 et 7 μm et entre 14 et 20 μm pour la vapeur d'eau.
- Vers 9,6 μm pour O_3 [7].

II .4 L'effet de l'atmosphère :

Partons de l'énergie solaire émise et reçue au sommet de l'atmosphère et regarde comment elle se transforme :

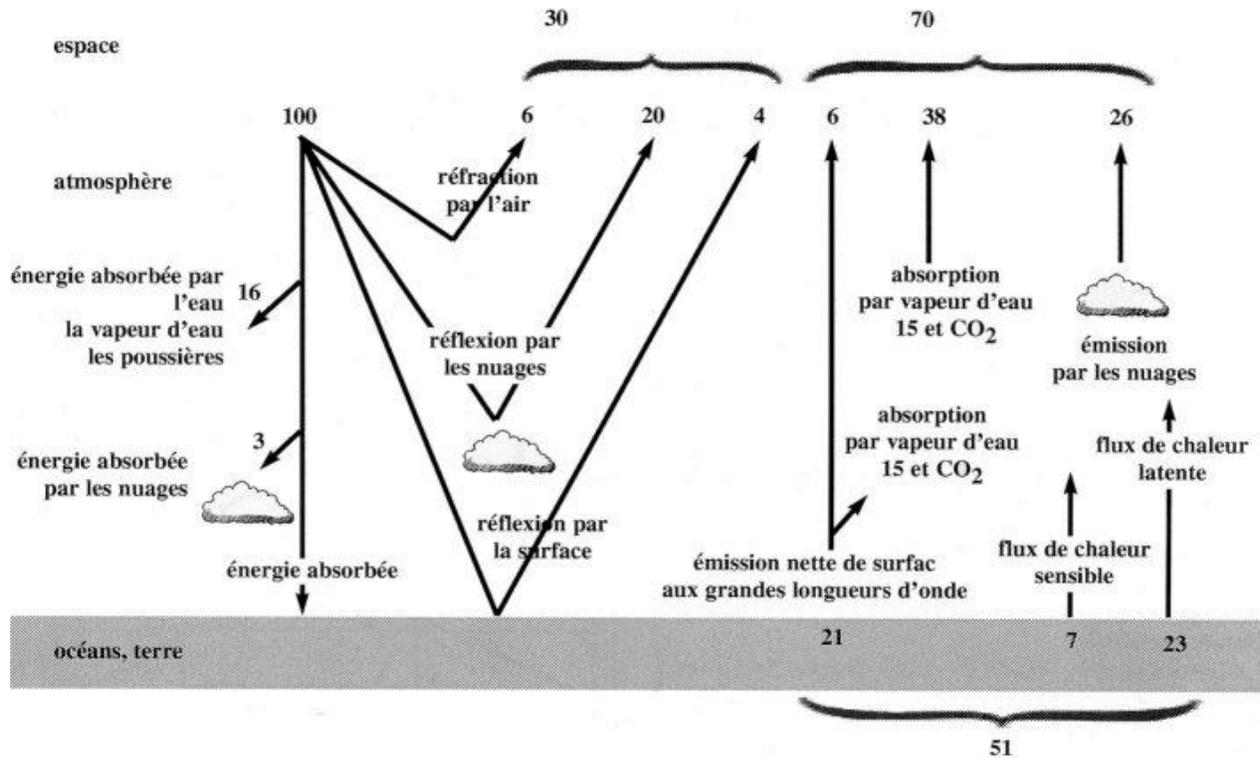


Figure II-2 : Diagramme représentatif de l'effet de l'atmosphère (Figure tirée du livre « océans et atmosphère »)

II .4.1 Émissions solaire :

Sur le diagramme, tout est dimensionné par rapport à la valeur 100 qui correspond au rayonnement solaire incident au sommet de l'atmosphère, soit environ 1360 W/m^2 . Ce rayonnement est absorbé dans l'atmosphère et au sol, ou réfléchi vers l'espace.

L'énergie absorbée directement par l'atmosphère et correspondante au chauffage direct de l'atmosphère par l'énergie solaire se situe sur la partie gauche du diagramme. Elle correspond à environ 20 % de l'énergie solaire incidente au sommet de l'atmosphère. Ce chauffage direct de l'atmosphère par les rayons solaires n'est pas la première source de chaleur dans le système atmosphérique.

Nous verrons que le chauffage de l'atmosphère est essentiellement un chauffage indirect.

50% de l'énergie solaire est absorbée au sol (l'atmosphère est essentiellement transparente pour le rayonnement solaire).

Une certaine partie du rayonnement est perdue pour le système climatique, elle est réfléchie directement vers l'espace selon trois processus essentiels :

- Un processus de réflexion par l'air c'est la diffusion moléculaire, responsable du bleu du ciel. On estime ce phénomène à 6 % du rayonnement solaire incident. Cela constitue la seule contribution des gaz principaux (N_2 , O_2 , H_2O) à l'énergétique de la planète.
- 20 % de l'énergie solaire reçue est réfléchie par les nuages.
- La réflexion par les surfaces : 4% de l'énergie incidente est réfléchie par les surfaces.

Ces surfaces sont très différenciées, on trouve d'énormes oppositions entre des zones désertiques (albédo 30 %), des forêts ou l'albédo est égal à 10 % ou des océans dont les surfaces réfléchissent jusqu'à 80 % [5].

II .4.2 Émissions terrestres

Sur la partie droite de la figure précédente, on voit la manière dont ce chauffage est équilibré par les émissions terrestres.

La principale composante est l'émission de rayons infra-rouges vers l'espace.

Seule une toute petite partie de cette émission se fait directement vers l'espace (6 % sur le diagramme).

La plus grande partie du rayonnement infrarouge est en fait absorbée dans l'atmosphère par des gaz à effet de serre (molécules suffisamment compliquées pour être excitées et ayant au moins trois atomes, H₂O, CO₂, CH₄ ou plus...). Ces molécules absorbent le rayonnement issu de la Terre et elles le réémettent en deux parties : une partie vers le sol et une partie vers l'espace, plus petite, que celle que l'on obtiendrait par une émission directe du sol.

C'est ce que l'on appelle « L'EFFET DE SERRE ».

Il est important de voir que ce ne sont pas les seuls termes d'échanges entre la surface terrestre et l'atmosphère.

II .4.3 Deux autres termes existent :

- Le flux de chaleur sensible qui est un flux de conduction thermique entre le sol et l'atmosphère. L'air se réchauffe près du sol et il monte dans l'atmosphère.
- Le flux de chaleur latente qui correspond à un processus plus compliqué de refroidissement au niveau des océans ou de la végétation continentale par évaporation de l'eau : cette chaleur est regagnée par l'atmosphère lors de la condensation de l'eau dans les nuages. Ce terme (23 %) est en fait le premier terme de chauffage direct de l'atmosphère.

L'atmosphère est donc chauffée en priorité par condensation de l'eau dans les nuages [5].

II.5 Le rayonnement solaire au sol :

Comme nous le savons, le soleil est une étoile en activité qui produit de l'hélium à partir de la fusion de l'hydrogène le constituant. L'énergie provenant du soleil sous forme de rayonnement d'onde de nature électromagnétique, ainsi

libérée, est projetée sous forme de rayonnement de chaleur et de lumière dans toutes les directions. A notre échelle, du point de vue de la terre, perpendiculairement à sa surface, nous recevons un rayonnement de l'ordre de 1000 W/m^2 par ciel clair [6].

Ce rayonnement peut être distingué sous forme de 3 flux : **global, direct, diffus**,

- Le **rayonnement solaire global** : est le rayonnement émis par le soleil incident sur une surface donnée.
- Le **rayonnement direct** : est le rayonnement solaire incident sur un plan donné, et provenant d'un petit angle solide centré sur le disque solaire.
- Le **rayonnement diffus** est le rayonnement solaire global à l'exception du rayonnement direct. Il comprend la plus grande partie du rayonnement diffusé par l'atmosphère ainsi qu'une partie du rayonnement réfléchi par le sol, suivant l'inclinaison de la surface réceptrice [7].

Les ondes arrivant sur terre couvrent un domaine spectral allant du rayonnement X (ultraviolet=200-400nm) aux infrarouges de basses longueurs d'onde (800-2400nm).

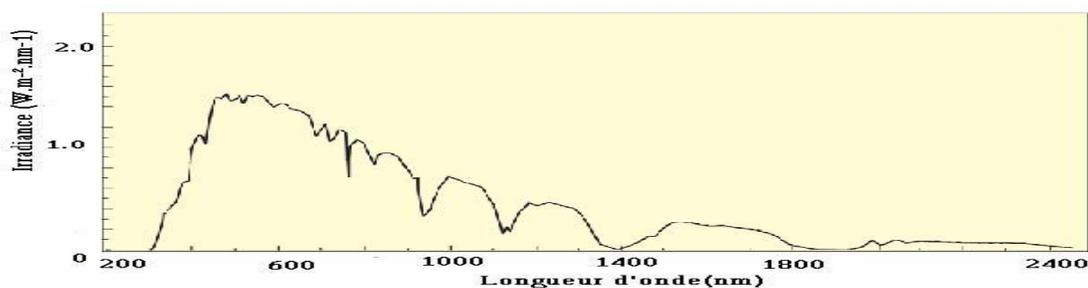


Figure II-3 : variation de l'irradiation arrivant sur terre en fonction de sa longueur d'onde.

L'information à retirer de ce rayonnement se situe plus ou moins entre 300 et 2500nm. L'appareil de mesure du rayonnement doit donc être axé sur ce domaine spectral [6].

II.6 Géométrie Terre-Soleil :

II.6.1 Les coordonnées horaires :

II.6.1.1 La variation de la déclinaison du soleil :

La **déclinaison** δ c'est l'angle fait par le plan de l'équateur avec celui de l'écliptique. Elle varie au cours de l'année de $+23^{\circ}27'$ à $-23^{\circ}27'$ et détermine l'inégalité des durées des jours [7]. Elle s'obtient à partir de la formule suivante:

$$\delta = 23.45^{\circ} \times \sin [0.980^{\circ} \times (\text{jour} + 284)] \text{ [Degré]} \quad (1)$$

Pour « jour », c'est un jour de l'année à partir des données que l'on rentre en entrée de la fonction : le jour et le mois. On introduit une condition nous permettant de prendre en compte le mois de février [6].

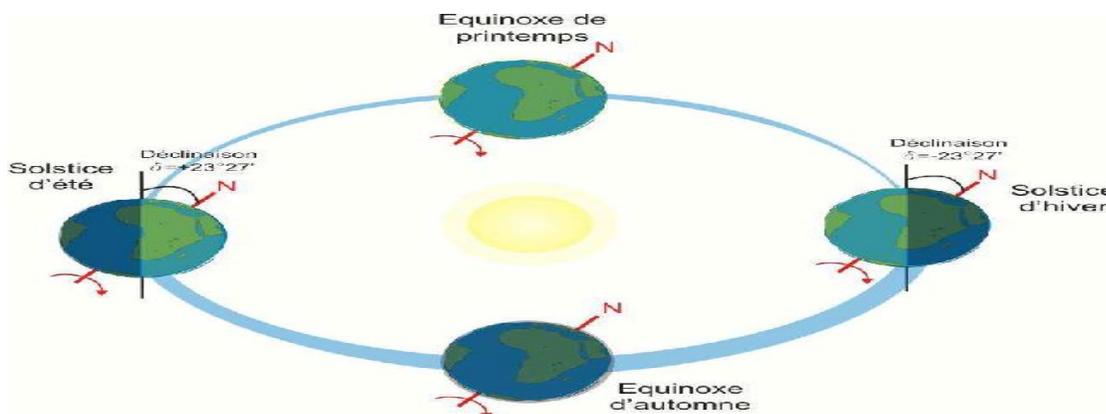


Figure II-4 : variation de la déclinaison du soleil au cours du mouvement de la terre autour de soleil [8].

II.6.1.2 Angle horaire:

L'angle horaire ω étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien) définit le temps solaire vrai TSV [8]. L'angle horaire est donné par l'équation suivante:

$$\omega = 0.261799 \cdot (t - 12) \quad (2)$$

avec t est le temps. Pour calculer l'angle horaire, Capderou a utilisé la formule suivante dans l'Atlas Solaire de l'Algérie [1]:

$$\omega = 15 \cdot (\text{TSV} - 12) \quad (3)$$

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

Si $\omega < 0$, la matinée.

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

II.6.2 Les coordonnées horizontales:

II.6.2.1 Hauteur du soleil :

La hauteur du soleil (h) est l'angle que fait le plan horizontal avec la direction du soleil, la valeur $h = 0$ correspond au lever et au coucher du soleil. La hauteur du soleil varie entre $+90^\circ$ (zénith) et -90° (nadir). La hauteur du soleil est bien représentée par une formule bien connue qui avait été également adoptée par Capderou.

$$\sin(h) = \cos(\phi) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) + \sin(\phi) \times \sin(\delta) \quad (4)$$

avec :

h : la hauteur du soleil, δ : La déclinaison, ω : L'angle horaire et ϕ : Latitude d'un lieu

II.6.2.2 Azimut du soleil :

L'azimut solaire (a) est l'angle mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère nord et dans le sens contraire dans l'hémisphère sud, en utilisant les projections sur le plan horizontal du point d'observation [2] c'est-à-dire la projection de la droite reliant la terre au soleil. Il est compris entre $-180 \leq a \leq 180^\circ$, tel qu'il est négatif le matin (direction Est), nul ou égal à 180° à midi et positif l'après-midi (direction Ouest), sur tout le globe. Il diffère de l'azimut géographique, lequel est toujours mesuré dans le sens des aiguilles d'une montre à partir du Nord, indépendamment de l'hémisphère du point d'observation [7].

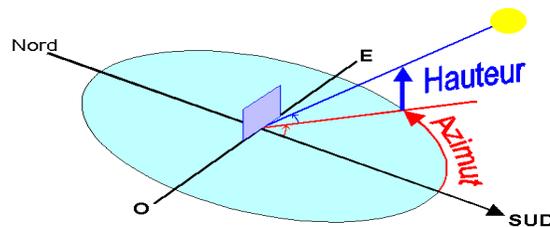


Figure II-5 : Schéma descriptive pour les angles azimut et hauteur solaire

L'équation de passage des coordonnées horizontales en coordonnées horaires est la suivante [4] :

$$\sin (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \sin (\omega) \quad (5)$$

$$\cos (a) \times \cos (h) = \cos (\delta) \times \cos (\omega) \times \sin (\phi) - \cos (\phi) \times \sin (\delta) \quad (6)$$

$$\sin (h) = \cos (\phi) \times \cos (\delta) \times \cos (\omega) + \sin (\phi) \times \sin (\delta) \quad (7)$$

II.6.3 Les coordonnées géographiques:

Ce sont les coordonnées angulaires qui permettent le repérage d'un point sur la terre constitué par deux angles :

II.6.3.1 La latitude :

La latitude est une coordonnée géographique représentée par une valeur angulaire, expression de la position d'un point sur Terre (ou sur une autre planète), au nord ou au sud de l'équateur qui est le plan de référence. Est une mesure angulaire, elle varie entre la valeur 0° à l'équateur et 90° aux pôles [9].

II.6.3.2 La longitude :

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

La longitude, généralement notée Λ , est donc une mesure angulaire sur 360° par rapport à un méridien de référence, avec une étendue de -180° (180°) Ouest à $+180^\circ$ (-180°) Est [9].

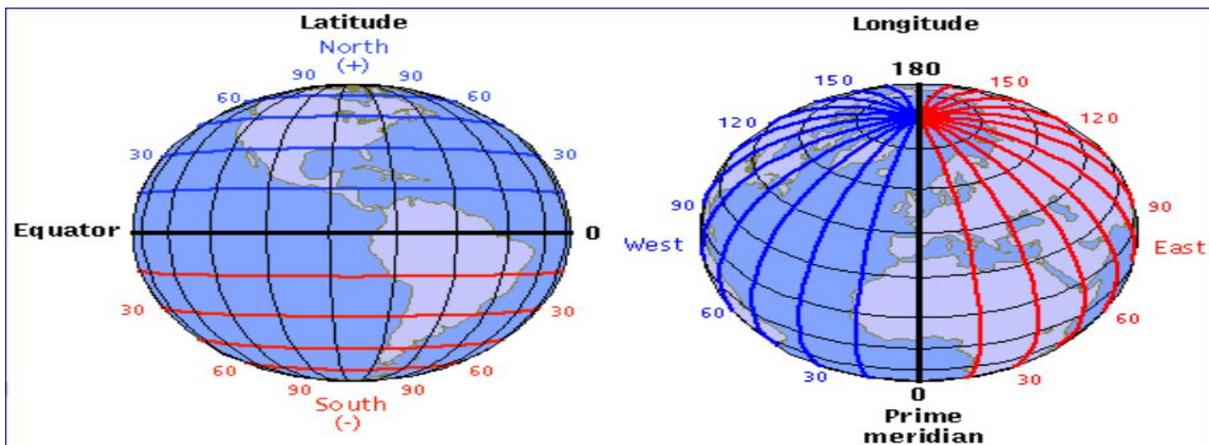


Figure II-6: Schéma descriptive pour les angles latitude et longitude de la terre [10]

II.7 La constante solaire :

L'énergie solaire reçue par unité de temps à la limite supérieure de l'atmosphère, sur une surface unité perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire. La constante solaire a été estimée à 1367 W.m^{-2} par Claus Fröhlich et Christoph Wehrli du Centre radiométrique mondial de Davos (Suisse) [2].

Cette valeur est la moyenne sur l'année du flux extraterrestre. En effet, la trajectoire de la terre autour du soleil étant elliptique, il s'en suit une variation saisonnière de $\pm 1.6 \%$ de la distance Terre Soleil et donc une variation de ce flux.

La relation suivante donne la valeur corrigée de la constante solaire [4]:

$$I_c = I_0 \times [1 + 0.0034 \times \cos(30 \times (m - 1) + n)] \quad (8)$$

Où:

$I_0 = 1367 \text{ W/m}^2$, m : numéro du mois dans l'année, n : numéro du jour dans le mois.

II.8 Les temps solaires [4] :

L'heure solaire est l'heure de la journée déterminée par le mouvement apparent du Soleil, égale à 12h00 au midi vrai. Pour obtenir l'heure légale, il faut lui additionner l'équation du temps, la correction de longitude et éventuellement l'heure d'été. Le **midi vrai** ou midi solaire est l'heure locale à laquelle le soleil passe au méridien du point d'observation et on a

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{DEL} + \text{ET} + \Lambda / 15 \text{ [heure]} \quad (9)$$

Avec **TSV : temps solaire vrai** est définie à partir de la rotation de la terre sur elle-même. Il est donc directement lié à l'angle horaire. L'intervalle de temps entre deux passages du soleil au méridien est de 24 h. Il est donc midi (12h) lorsque le soleil est à son zénith.

TL : temps légal et on peut définir comme le temps moyen du fuseau horaire de rattachement, augmenté éventuellement de l'heure d'été. C'est l'heure de la montre sa relation donnée en fonction de temps universelle : $TL = TU + DEL$ (10)

TU : le temps moyen du méridien de Greenwich (méridien origine)

DEL : est la correction due au changement d'heure légale (en Algérie $DEL = 1$).

ET : équation de temps, ce terme corrige le temps solaire de plus ou moins 15 minutes et pourra donc être négligé en première approximation; sa relation donnée par la formule suivante :

$$Et = 9.87 \sin(2N') - 7.53 \cos(N') - 1.5 \sin(N') \text{ [min]} \quad (11)$$

$$N' = (n - 81) \times 360/365 \quad (12)$$

Où : N' est le numéro du jour dans l'année.

On a aussi autre forme de cette équation mais en fonction de TSV et TSM

$$ET = TSV - TSM \quad (13)$$

TSM : le temps solaire moyen

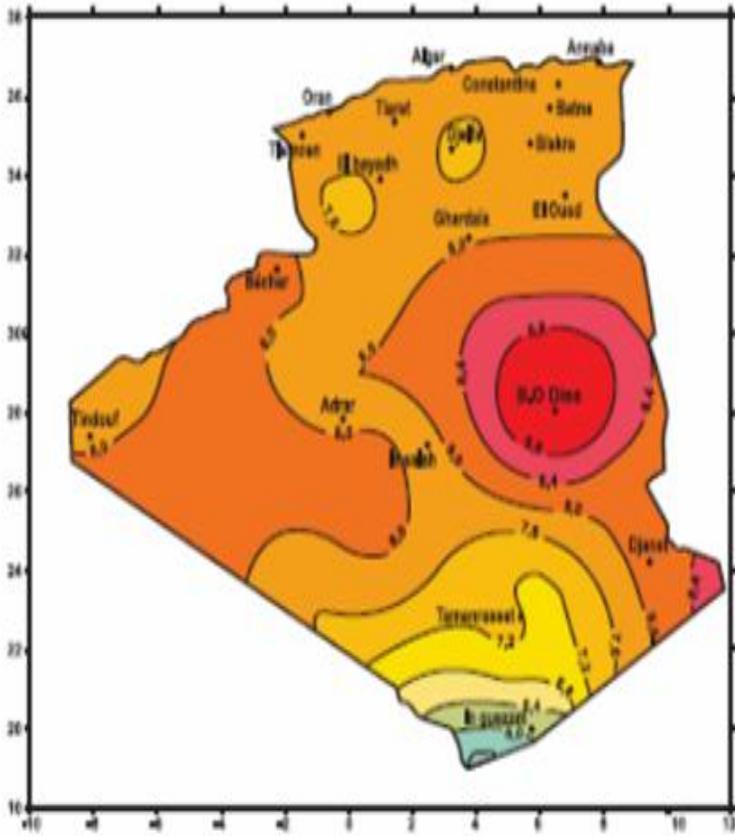
II .9 Potentiel solaire en Algérie [11] :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaire les plus élevés au monde.

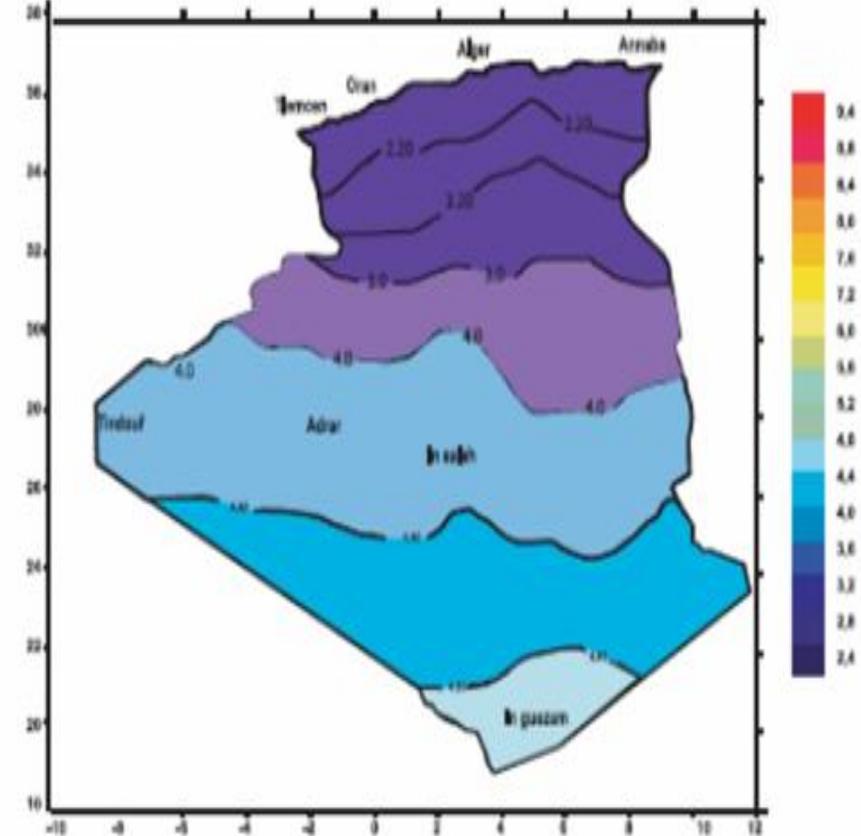
La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Nord et $2650\text{ kwh}/\text{m}^2/\text{an}$ au Sud du pays. Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh.

Tableau II-1 : représentative du potentiel solaire en Algérie

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($\text{Kwh}/\text{m}^2/\text{an}$)	1700	1900	2650



Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de juillet



Irradiation globale journalière reçue sur plan horizontale au mois de Décembre

Figure II-7: Atlas solaire Algérien

Chapitre III

Rappel sur la théorie des chauffe-eau solaires

III.1 Rappel sur la thermique

III.1.1 Notions sur la conduction thermique

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

❖ Loi de Fourier

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu des régions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière se traduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations des dispositifs seront négligées. Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (figure III-1). Les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T_2 (source chaude) et T_1 (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source froide. Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme.

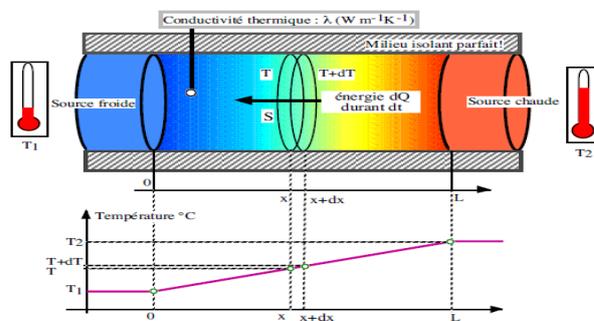


Figure III-1 : Propagation de la température dans un milieu cylindrique

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire dQ qui traverse un élément x et une surface S d'épaisseur dx durant le temps dt :

$$dQ = - \lambda S \cdot \frac{dT}{dx} dt \quad (14)$$

- dQ : énergie élémentaire en Joule
- λ : Conductivité thermique du matériau en $W.m^{-1}.K^{-1}$
- S : section en m^2
- dt : temps élémentaire en s
- $\frac{dT}{dx}$: gradient de température en x en $K.m^{-1}$

La relation précédente de l'énergie élémentaire permet de définir :

Le **flux de chaleur Φ** en watt qui circule sur une distance x :

$$\Phi(w) = \frac{dQ}{dt} = - \lambda S \cdot \frac{dT}{dx} \quad (15)$$

Ainsi que la **densité de chaleur φ** en W/m^2 :

$$\varphi = \frac{\Phi}{s} = - \lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

Remarque : le signe ($-$) des relations précédentes indique que le flux de chaleur circule dans le sens opposé au gradient de température (dT/dx est positif sur la figure III-1) [12].

III.1.2 La convection :

La convection thermique est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide, liquide ou gazeux. Dans un fluide, il est pratiquement impossible d'assister à la conduction pure car le moindre gradient de température entraîne des courants de convection, c'est-à-dire un transport de masse. On distingue deux types de convection, la convection naturelle (ou encore convection libre) et la convection forcée (ventilation).

La convection naturelle apparaît spontanément. Elle se produit dans un fluide au sein duquel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produit au niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement est dû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'une force d'Archimède.

Autre exemple : mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par une plaque électrique.

La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par une intervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur (cas des radiateurs de voiture, des montages électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, etc.).

Quel que soit le mode de convection, le transfert d'énergie entre la surface d'un corps solide à la température T et le fluide environnant se fait par conduction thermique puisque la vitesse du fluide est nulle à la surface du corps solide. On peut alors définir le flux de chaleur échangé par convection :

$$\Phi(w) = h \cdot S \cdot (T_s - T_a) \text{ avec : } h(w \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}) = \frac{\lambda_f}{\xi} \quad (17)$$

Avec ξ : L'épaisseur de la couche. Elle dépend du type d'écoulement du fluide au voisinage de la paroi.

Cette équation est appelée loi de Newton où h représente le coefficient de transfert convectif. Ce coefficient ne dépend pas en général de la nature de la paroi mais uniquement des propriétés du fluide (viscosité, coefficient de dilatation thermique, densité) et de la nature de l'écoulement (laminaire ou turbulent). Quand la vitesse d'écoulement du fluide augmente, on passe du régime laminaire au régime turbulent. Les filets fluides sont alors animés de mouvements tourbillonnaires de caractère aléatoire [13].

III.1.3 Notion sur le rayonnement :

Tout corps chauffé à une certaine température - quelque soit leur état : solide, liquide ou gazeux - émettent un rayonnement de nature électromagnétique. Cette émission d'énergie s'effectue au détriment de l'énergie interne du corps émetteur. Le rayonnement se propage de manière rectiligne à la vitesse de la lumière. Il est constitué de radiations de différentes longueurs d'onde comme l'a démontré l'expérience de W. Herschell [14].

III.1.4 Répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide :

Le rayonnement incident sur une surface a une irradiation H (W/m^2) (figure III-2) :

$$H = \alpha H + \rho H + \tau H \quad \text{avec: } \rho + \alpha + \tau = 1$$

- **Absorptivité moyenne:** $\alpha = H_{\text{abs}}/H$
- **Réfectivité moyenne:** $\rho = H_{\text{ref}}/H$
- **Transmissivité moyenne:** $\tau = H_{\text{tr}}/H$

On définit ainsi l'énergie incidente sur tout le spectre des longueurs d'onde. On obtient les pouvoirs réfléchissant ρ , absorbant α et transitant (filtrant) τ qui sont en fonction de la nature du corps, de son épaisseur, de sa température T , de la longueur d'onde λ , du rayonnement incident et de l'angle d'incidence.

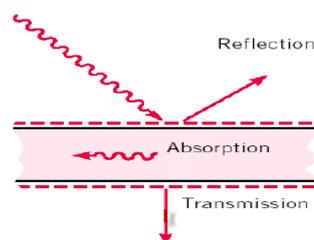


Figure III-2 : schématisation de la répartition d'un flux incident de rayonnement sur un solide

Cas particuliers :

- Corps noir:

C'est un corps qui absorbe toutes les radiations qu'il reçoit indépendamment de son épaisseur, de sa température, de l'angle d'incidence et de la longueur d'onde du rayonnement incident. Il est défini par : $\alpha = 1 \Rightarrow \rho = \tau = 0$

Une surface enduite de noir de fumée est approximativement un corps noir.

Propriétés du corps noir :

- Tous les corps noirs rayonnent de la même manière. Le corps noir rayonne plus que le corps non noir à la même température

- pour un surface réfléchissante: $\rho = 1 \Rightarrow \alpha = \tau = 0$

- pour un surface opaque: $\tau = 0 \Rightarrow \alpha + \rho = 1$

III.2 La production d'eau chaude sanitaire par l'énergie solaire:

III.2.1 Les chauffe-eau solaires conventionnels :

L'énergie solaire est une source d'énergie propre et abondante qui peut nous aider à combler une bonne partie de nos besoins en énergie. L'énergie solaire peut servir au chauffage, notamment au chauffage de l'eau. Les installations solaires servant au chauffage de l'eau sont appelées « chauffe-eau solaires domestiques » [15].

Les chauffe-eau solaires les plus répandus sont constitués de trois composants :

- Un capteur solaire plan ;
- Une cuve de stockage d'eau chaude ;

- Un circuit hydraulique qui peut être une simple canalisation dans le cas d'un système à thermosiphon ou bien doté d'une pompe de circulation dans le cas d'un système actif.

Le rayonnement solaire incident sur le capteur solaire est convertit en chaleur dont une partie est transférée vers la cuve de stockage moyennant un fluide caloporteur qui circule entre le capteur et la cuve de stockage. Dans le cas le plus simple, ce fluide n'est autre que l'eau à chauffer. Le capteur solaire est installé de telle sorte que sa surface de captation soit orienté plein sud avec une inclinaison fixe durant toute l'année. Pour une meilleure captation du rayonnement solaire, généralement cette inclinaison est égale à la latitude du lieu d'installation.

La principale fonction du capteur solaire est la conversion du rayonnement solaire incident sur son absorbeur à une chaleur qui sera transférée au fluide qui circule dans les canalisations fixées sur l'absorbeur tel qu'il est montré sur la figure III-3.

Les performances de ce genre de chauffe-eau solaire dépendent de l'efficacité du capteur solaire utilisé. Dans le monde, plusieurs types ont été développés moyennant une technologie sophistiquée pour la réalisation de l'absorbeur avec soudure des canalisations et dépôt de films sélectifs et l'utilisation de couverture transparente solaire. Le stockage de l'eau chaude est introduit afin de palier aux fluctuations du rayonnement solaire qui est intermittent.

En Algérie, une tentative d'industrialisation de ce genre de chauffe-eau solaire a été initiée dans les années 80 par le CDER. Une petite série de dispositifs a été effectivement réalisée par l'UDES et distribuée dans le territoire national pour exploitation et tests sous diverses conditions climatiques. Ce chauffe-eau est présenté sur la photo de la figure III-4.

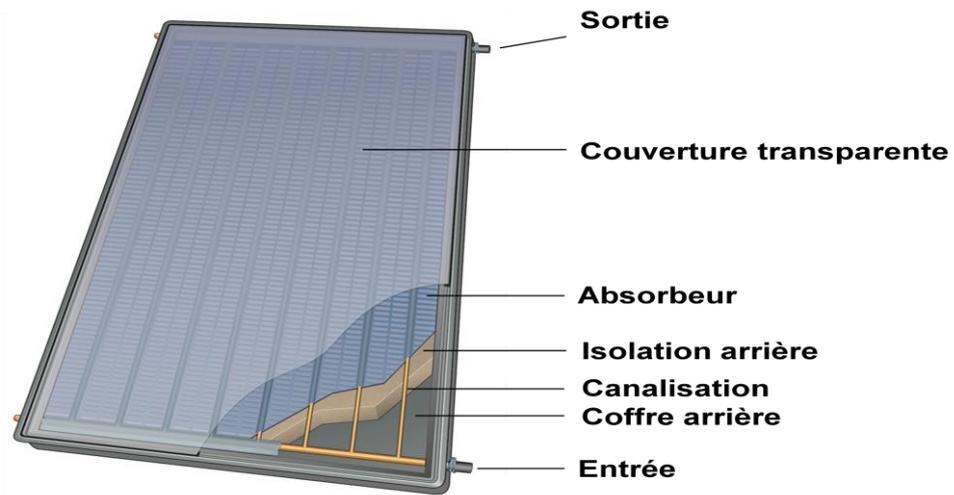


Figure III-3 : Composition d'un capteur solaire plan de type tubes à ailettes



Figure III-4 : Photo montrant le chauffe-eau solaire développé par le CDER et fabriqué par l'UDES, [18]

Ce dispositif a fait l'objet de plusieurs tests expérimentaux sur la plateforme des essais de la station d'expérimentation des équipements solaires en milieu saharien (ex URER/MS) à Adrar pour évaluer ces performances et jauger ses capacités à subvenir aux besoins des familles sahariennes en matière d'eau chaude sanitaire [19]. Ces chauffe-eau solaires 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 même si leurs performances atteignent des niveaux très appréciables. En fait, ce type de système est développé pour les régions à faible intensité de rayonnement solaire avec des températures ambiantes hivernales très basses. C'est le cas notamment de l'Europe et des USA.

Une simplification consiste à la réalisation de systèmes rustiques où les fonctions captation et stockage sont assurées par le même capteur. Il s'agit du chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur fonctionnant en des climats désertiques et répondant aux besoins des agglomérations Sahariennes en matière d'eau chaude sanitaire tout en réalisant un meilleur compromis qualité-prix.

III.2.2 Les chauffe-eau solaires de type capteur-stockeur :

Le principe de fonctionnement est très simple. Comme montré sur la figure III-5, un réservoir d'eau est placé dans un bac thermiquement isolé vers l'extérieur. Il reçoit le rayonnement sur sa face avant qui est recouverte d'un vitrage pour créer l'effet de serre et minimiser les pertes calorifiques par convection. Ce réservoir absorbe une partie du rayonnement solaire incident sur sa surface et la transmet, par conduction, à l'eau stockée. Après une exposition au soleil durant toute la journée et quand l'isolation thermique est suffisante et que les pertes convectives par la couverture transparente sont limitées (double vitrage), ce genre de dispositif permet de garder l'eau stockée assez chaude pour une exploitation durant le soir ou bien le lendemain au matin. De part cette description sommaire du chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur on remarque que ce type de dispositif est simple et ne nécessite pas de gros moyens pour sa réalisation même dans les régions pauvres et isolées.

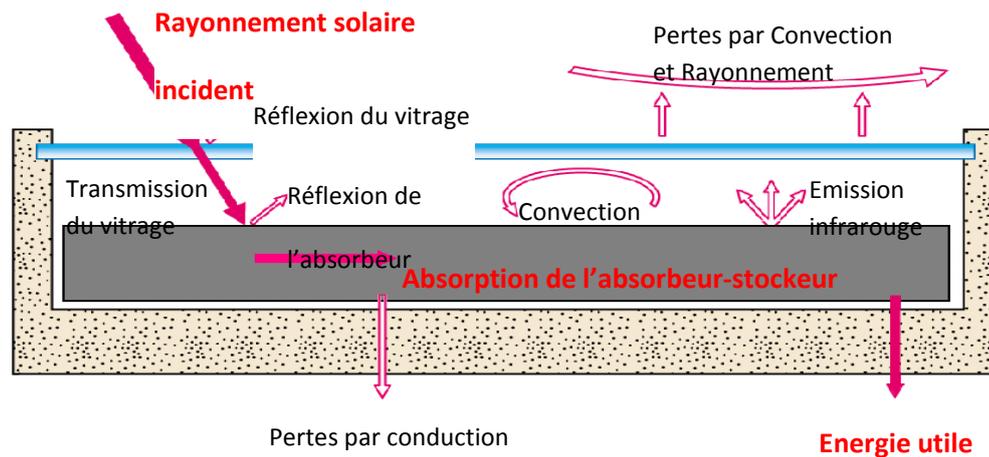


Figure III-5 : Schémas descriptif montrant le principe de fonctionnement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur

Par rapport aux chauffe-eau solaires indirects, où la cuve de stockage représente une grande partie du prix de revient du système ; le capteur-stockeur présente les avantages suivants :

- Un prix de revient peu élevé ;
- Une technologie rustique ;
- Compacte, relativement léger et son installation est facile ;
- Une robustesse adaptée aux conditions climatiques hostiles du désert.

III.2.2.1 Compositions du chauffe-eau solaire capteur-stockeur :

III.2.2.1.1 L'élément capteur-stockeur :

C'est le composant principal du chauffe-eau solaire capteur-stockeur. Il s'agit d'un réservoir de stockage d'eau (ballon d'eau) de forme parallélépipédique ou cylindrique selon le modèle. Il capte le rayonnement solaire par sa surface exposée qui est peinte en noir pour améliorer son absorptivité, puis transforme le rayonnement absorbé en chaleur transférée par conduction et convection vers l'eau qu'il contient. La forme de l'élément capteur –stockeur influe sur les performances du système par son effet sur la stratification de l'eau contenue dans son volume et par son effet sur la captation du rayonnement solaire. Le matériau utilisé (acier, plastique,...) influe

également sur les performances du système en raison des propriétés thermophysiques. La position et la forme des entrées et sortie d'eau son aussi importantes pour un meilleur fonctionnement du système. En effet, un orifice permettant l'entrée d'un fort débit d'eau tourbillonnaire perturbe la stratification de l'eau et réduit, par conséquent, les performances du système.

III.2.2.1.2 Le caisson et l'isolation :

Le caisson contient l'élément capteur-stockeur ; Il s'agit d'un boîtier ouvert par une face et isolé sur ses quatre côtés et sur son fond. Par son isolation thermique, le caisson limite les déperditions de chaleur vers le milieu ambiant. Pour la fabrication du caisson, on utilise en général les matériaux localement disponibles en tenant compte des conditions d'exploitation à savoir : l'humidité, la pluviométrie ainsi les moyen d'installation et de fixation.

Lors de la mise en place de l'élément capteur-stockeur à l'intérieur du caisson il y a lieu d'éviter la formation de pont thermique surtout au niveau des entrées et sorties d'eau.

III.2.2.1.3 La couverture transparente :

L'installation d'une couverture transparente en verre ou en plastique sur la face avant du caisson permet d'augmenter le gain énergétique de l'élément capteur-stockeur en créant l'effet de serre et en limitant les déperditions calorifiques par convection vers le milieu ambiant en créant un espace dans lequel l'air sera confiné, figure III-6. Le vitrage ne doit pas être très fin pour éviter sa fragilité et ne doit pas être très épais pour limiter son inertie thermique.

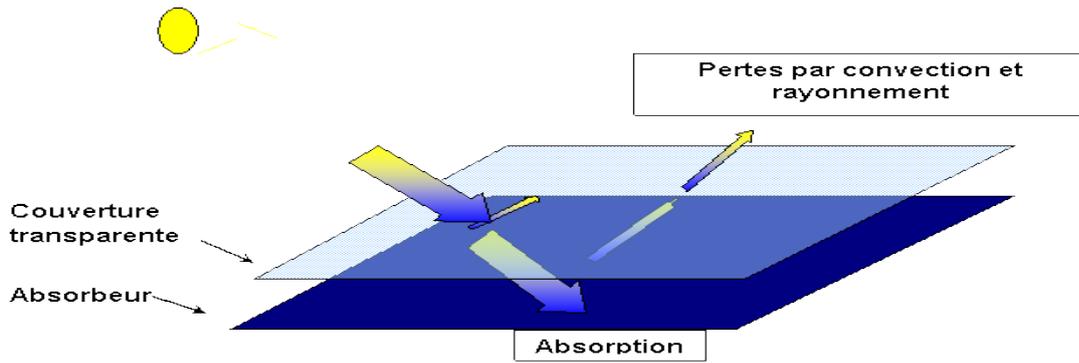


Figure III-6 : Eclairage solaire incident sur l'absorbeur après transmission du vitrage

III.3 Présentation de quelques modèles :

La bibliographie consultée a montré que plusieurs modèles de chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur ont été développés dans le monde. Les premiers systèmes sont très simples ont une forme rectangulaire [20], avec un rendement assez faible. De gros efforts ont été développés pour améliorer les performances du capteur-stockeur et de nouvelles formes ont vu le jour. Dans ce qui suit, nous citons quelque unes des plus répondues du capteur-stockeur parce que la liste est très longue et on ne peut pas, dans ce mémoire, les reprendre tous.

Le modèle triangulaire [20], avec la configuration montrée en figure III-7 a été proposé et étudié en apportant une modification interne par l'installation d'une paroi isolante (figure III-8) permettant la circulation interne de l'eau tout en préservant l'eau chaude vers la partie arrière du capteur-stockeur, [21].

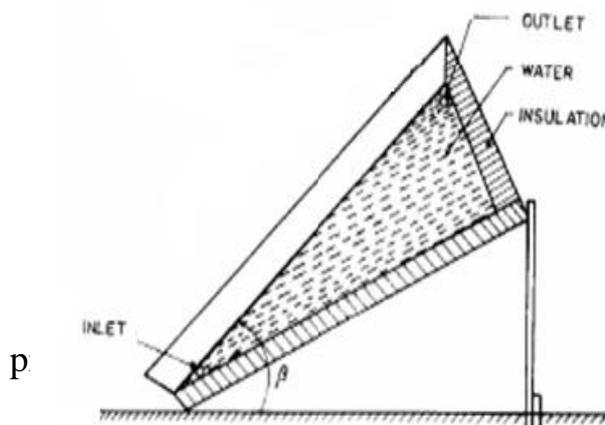


Figure III-7 : Schéma du capteur-stockeur triangulaire, [20].

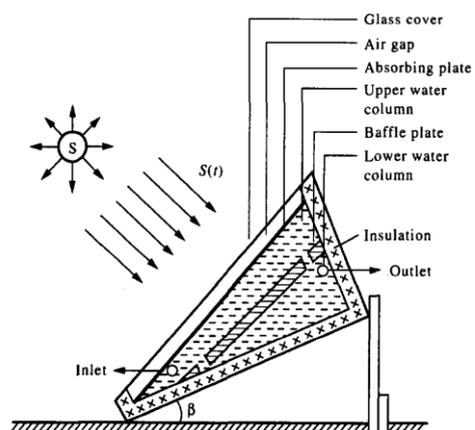


Figure III-8 : Schéma du chauffe-eau solaire capteur-stockeur triangulaire muni d'une paroi interne, [21].

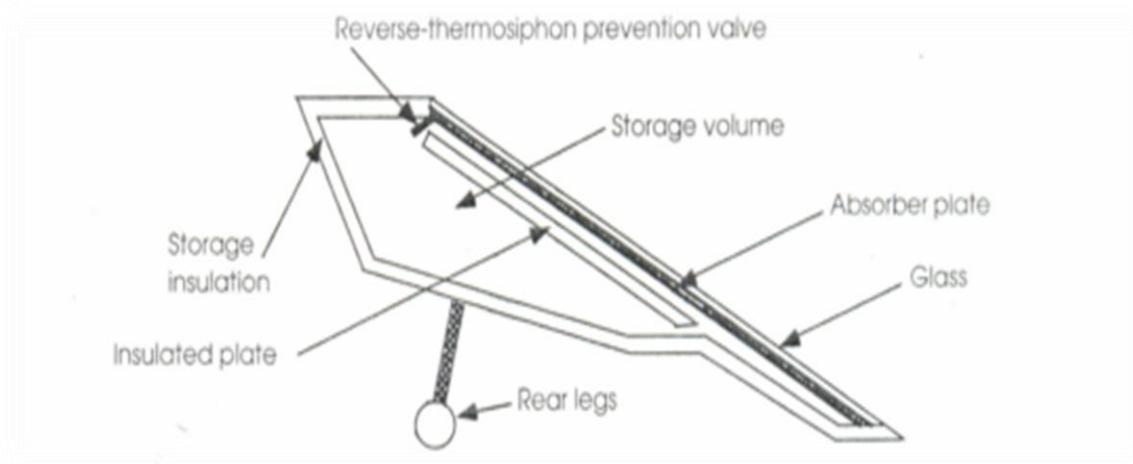


Figure III-9 : Schéma descriptif du capteur-stockeur proposé par Faiman, [22]

L'élément capteur-stockeur est constitué de deux jaquettes : La première qui est plus mince joue le rôle du capteur et celle de dernière est élargie sur sa partie supérieure joue le rôle de la cuve de stockage. La circulation d'eau entre les deux jaquettes se fait naturellement mais le système est doté d'un dispositif qui empêche cette circulation au cours de la nuit pour minimiser les pertes calorifiques vers le milieu ambiant. Un tel chauffe-eau est présenté en figure III-10.



Figure III-10 : Photo montrant le prototype du capteur-stockeur amélioré par Faiman, [20].

Dans la gamme des chauffe-eau solaire à élément capteur-stockeur de type cylindrique on trouve les plus simples à réflecteurs plan et ceux de hautes performances doté de réflecteurs en forme concentrateur parabolique composé (CPC) à exposition directe comme montré sur le schéma présenté aux figures III-11 et 12.

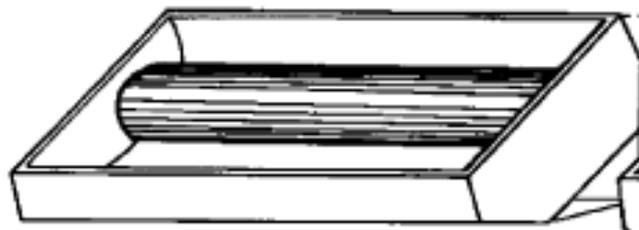


Figure III-11 : Schémas représentant un chauffe-eau solaire capteur-stockeur à réservoir cylindrique horizontal [23].

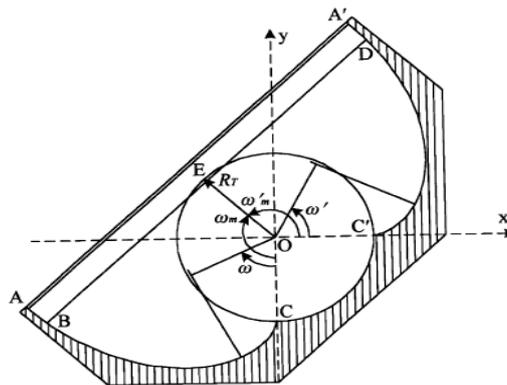


Figure III-12 : Présentation en coupe d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur à réservoir cylindrique doté d'un réflecteur en CPC [23].

Un tel dispositif est présenté sur la photo de la figure III-12. Il s'agit d'un prototype de chauffe-eau solaire capteur-stockeur à réservoir cylindrique et un réflecteur cylindro-parabolique réalisé en Tunisie [24].



Figure III-13 : Vue du capteur-stockeur à réflecteur cylindro-parabolique réalisé en Tunisie [24].

Les chauffe-eau solaires capteur-stockeurs utilisant des réflecteurs en CPC peuvent être également à exposition indirecte comme montré sur la figure III-14 [20]. Dans ce cas la surface absorbante du réservoir parallélépipédique se trouve inversée et le système aura moins de pertes thermiques vers le milieu ambiant.

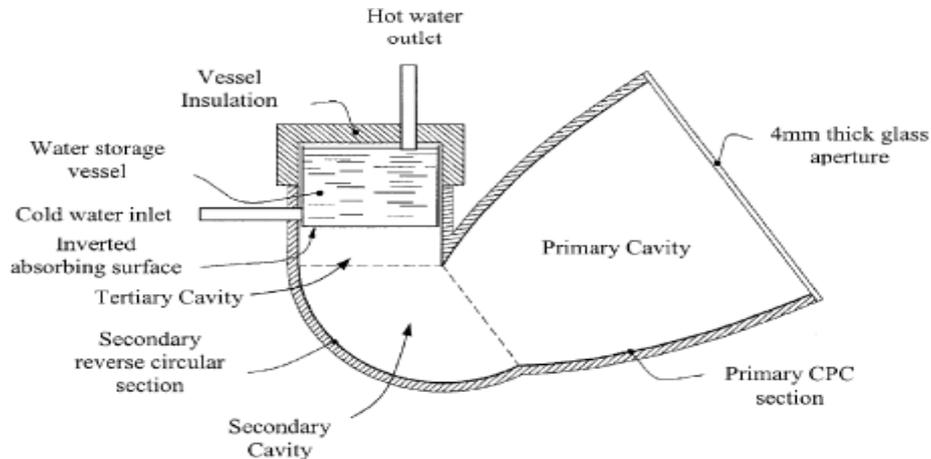


Figure III-14 : Schémas d'un capteur-stockeur à CPC en exposition indirecte, [20].

III.4 Conclusion :

Dans cette chapitre nous avons exposé une petite rappelle sur les notions thermique ; également nous avons parlé sur les chauffe-eau solaire conventionnels, et enfin nous avons concentré sur les chauffe eau solaire de type capteur-stockeur avec la présentation de quelque modèles.

Chapitre IV

Réalisation du prototype et instrumentation

IV.1 Réalisation du prototype

IV.1.1 Introduction :

Comme il est évident que l'on ne peut utiliser un équipement sans connaître les principales caractéristiques et compte tenu de l'indisponibilité de moyens en matière de simulation rigoureuse qui peut prendre en charge le cas du système étudié ; l'étude expérimentale devient indispensable pour la détermination des performances thermique du prototype.

Pour la caractérisation des chauffe-eau solaires conventionnels fonctionnant en thermosiphon, constitués de ballon de stockage et de capteur plans. Plusieurs standards et normes sont disponibles. Ils permettent de déterminer les paramètres nécessaires pour toute évaluation ou comparaison.

Par contre, pour le cas des chauffe-eau solaires de type capteur-stockeur on ne dispose pas de procédures normalisées suffisantes pour caractériser leurs performances ; Ces dernières dépendent de la quantité d'eau puisée et du profil de puisage ainsi que des conditions d'exploitation du système.

Pour notre cas, on exploite une procédure [27] qui permet de déterminer certains paramètres moyens sur une longue période, telle que la journée.

IV.1.2 Description du prototype réalisé à l'URER/MS

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, [25]. Ce prototype est présenté sur la photo de la figure IV-1.



Figure IV-1: Photo du prototype de chauffe-eau solaire capteur-stockeur réalisé à l'URER/MS [25]

Comme montré sur le schéma descriptif de la figure IV-2, l'élément capteur-stockeur est de forme parallélépipédique construit en tôle galvanisée de 1.5 mm d'épaisseur et renforcé à l'intérieur par des cornières métalliques et deux ailettes comme montré sur la figure IV-3. Son poids total à vide est de 36 kg et sa capacité géométrique est de 76.5 litres (0.85m par 0.9m par 0.1) et sa capacité réelle mesurée après au gonflement dû à la pression du réseau est de 81 litres. Sa face avant, peinte en noire, à une surface de 0.76m². L'entrée de l'eau froide ainsi que la sortie d'eau chaude sont constituées de tubes galvanisés qui se prolongent en forme de «clarinette» sur toute la largeur de l'absorbeur (figure IV-6). Cette disposition permet d'éviter le brassage d'eau et donc la perte de stratification qui est instaurée et favorisée par l'installation de deux ailettes disposées le long de la cavité de l'absorbeur. L'isolation thermique de l'élément capteur-stockeur est assurée par une couche de laine de verre de 5 cm d'épaisseur sur les surfaces latérales ainsi que sur la surface arrière.

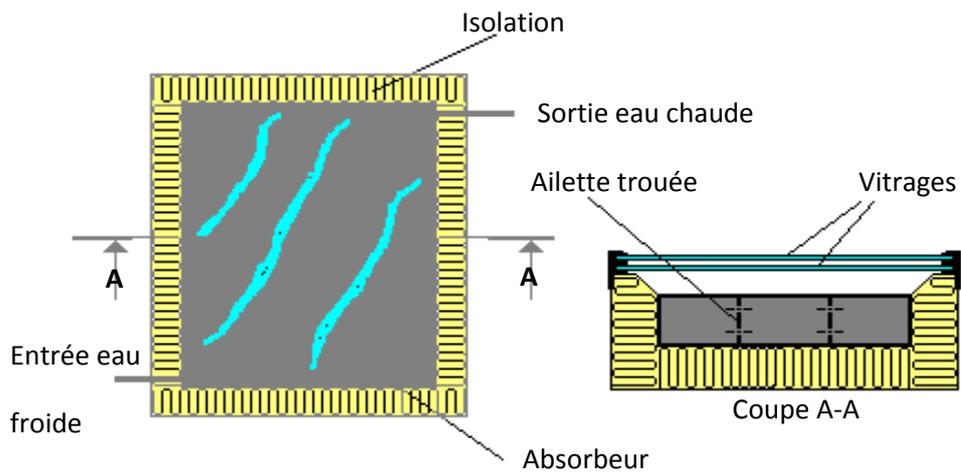


Figure IV-2: Schémas montrant le design et les différents composants du prototype du chauffe-eau solaire capteur stockeur objet de notre étude expérimentale



Figure IV-3: Photo des ailettes trouées installées à l'intérieur du capteur-stockeur

Les dessins de définitions des différents éléments de ce dispositif sont présentés sur les figures IV-4 à IV-7.

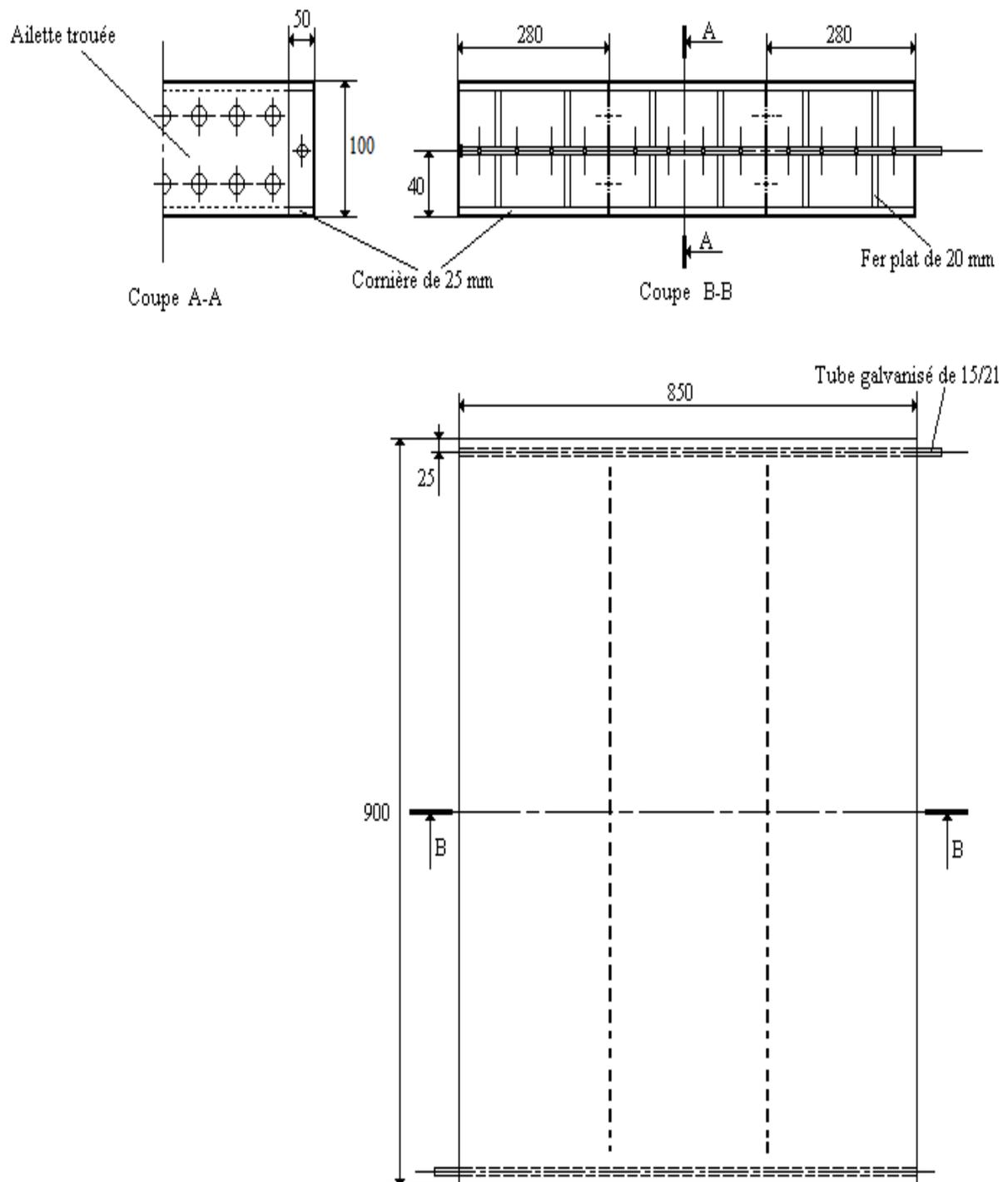
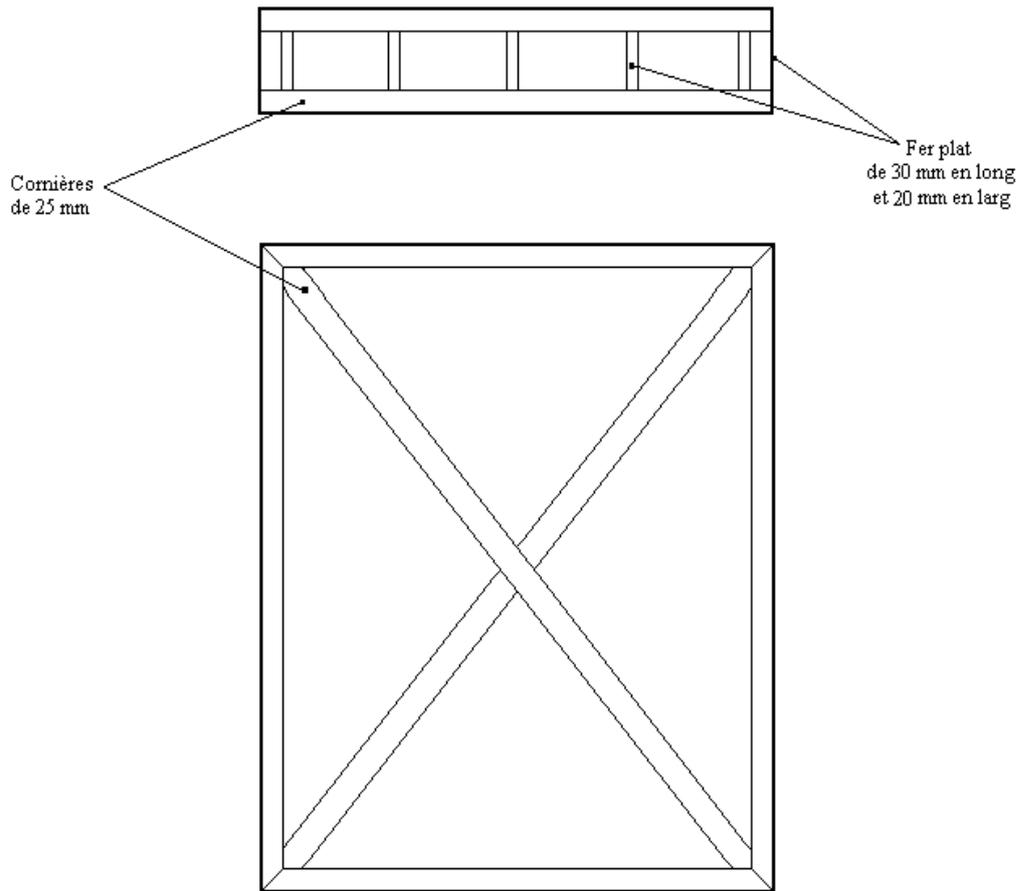


Figure IV-4: Schéma global représentant l'absorbeur du capteur stockeur



Plan de la structure de renforcement du capteur stockeur
(en cornière de 25 mm)

Figure IV-5 : Schéma global de l'ossature interne de l'absorbeur

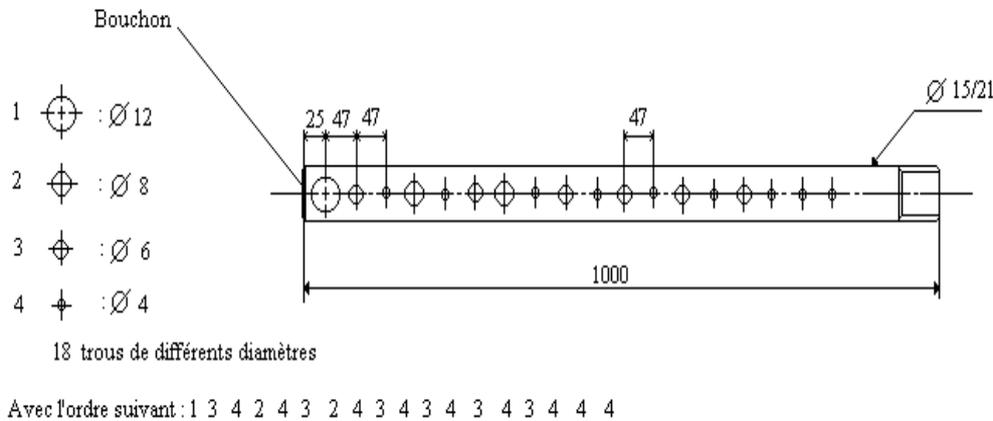
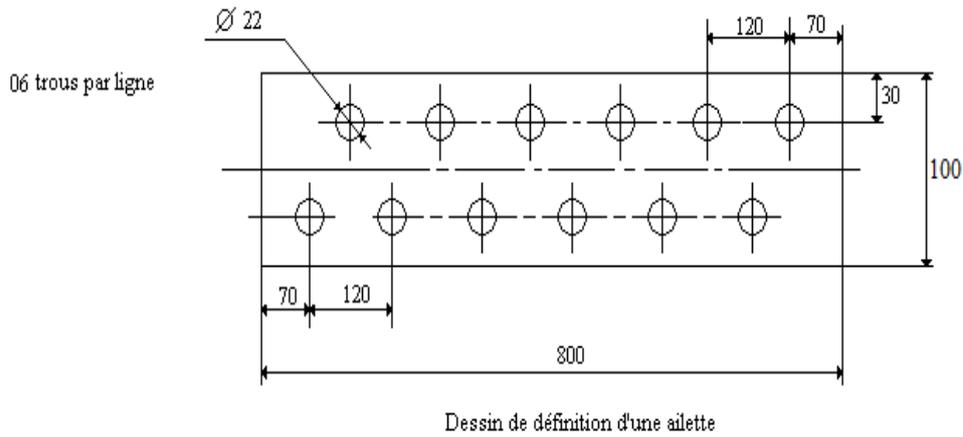


Figure IV-6 : Schéma global de l'ailette trouée et des tubes en clarinette pour l'entrée et la sortie de l'eau du capteur-stockeur

La couverture transparente est constituée de deux vitres ordinaires de 4 mm d'épaisseur avec un espace entre les vitres de 1.5 cm. Comme conseillé dans la littérature [26], l'espace entre l'absorbeur stockeur et le vitrage est de 5 cm. Cela minimise l'effet de bord tout en assurant de faibles pertes par convection.

Le bac (caisson) est réalisé en tôle noire de 1 mm d'épaisseur. Sur ses bords supérieurs sont fixées des cornières (Tôle pliée) qui supportent le jeu du double vitrage.

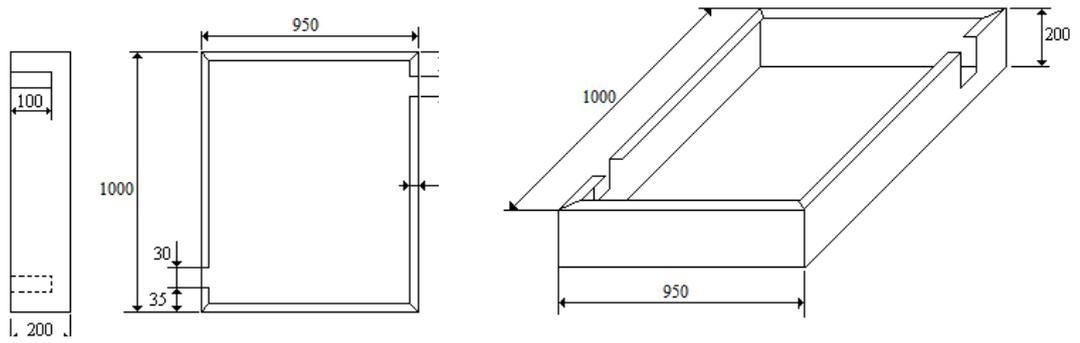


Figure IV-7: Schéma descriptif du caisson (bac)

Les caractéristiques techniques du chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur objet de notre étude expérimentale sont résumés dans le tableau 1.

Tableau IV-1 : Les caractéristiques du chauffe-eau solaire capteur-stockeur objet de notre étude

Désignation	Unité	Nature et dimensions
<u>Le bac :</u>		
Matériau		Tôle noire
Epaisseur	mm	1
Dimensions	mm	1000*950*200
<u>La couverture transparente :</u>		
Nature		Verre ordinaire
Nombre		02
Epaisseur	mm	4
Dimensions	mm	980*940
Emissivité		0.85
<u>L'Elément capteur-stockeur :</u>		
Matériau		Tôle galvanisée
Epaisseur	mm	1.5
Dimensions	mm	900*850*100
Absorptivité		0.94
Emissivité		0.8
Capacité réelle (suite au gonflage dû à la pression)	litre	81
Poids à vide	Kg	36
<u>L'isolation thermique :</u>		
Nature		Laine de verre
Epaisseur arrière	mm	50
Epaisseur latérale	mm	50
Conductivité	W/m/k	0.04
<u>La lame d'air :</u>		
Entre vitrage	mm	15
Entre absorbeur et vitrage	mm	50

IV.1.3 Evaluation du prix de revient du capteur stockeur :

Tel que montré sur le tableau 2, le montant total (C) des différents matériaux utilisés pour la réalisation de ce système est évalué à **9263.5 DA**. A ce montant, il faut ajouter le coût de main d'œuvre calculé pour deux (02) personnes qualifiées durant approximativement trois (03) jours de travail.

Tableau IV-2 : Montant total « C » des composants du système

Désignation	Quantité	P.U (DA)	Total (DA)
Tôle noire 1 mm	1	1280	1280
Tôle galvanisée 1.5 mm	1	2400	2400
Cornière de 35 mm	8/6	750	1000
Cornière de 20 mm	4/6	400	267
Tube galvanisée 15/21	2/6	850	283
Laine de verre en m ²	1.5	400	600
Vitrage ordinaire 4 mm	2	1050	2100
Joint vitrage en m	7.2	120	864
Mastique silicone	1.5	180	270
Contre plaqué	1/10	700	70
Papier Aluminium	½	100	50
Peinture noire	1/20	250	12.5
Peinture verte	1/10	250	25
Teinte noire	1/10	120	12
Vis pour tôle 4 mm	20	1.5	30
Le Montant total C (DA)			9263.5

Les frais de main d'œuvre journalière sont fixés à 700 DA par ouvrier qualifié. C'est à dire que le coût de main d'œuvre total est :

$$C_m = 700 \times 2 \times 3 = 4200DA$$

La consommation d'énergie électrique pour réaliser les différents travaux (soudure, découpage etc.....) peut être estimée à :

$$C_e = 300DA/Unité$$

Le montant des produits consommés pour la réalisation (baguettes de soudure et autres...) est estimé à :

$$C_p = 100DA/Unité$$

Si le bénéfice escompté ainsi que l'amortissement des machines et outillages utilisés pour la réalisation d'une unité est estimé à 20% du montant total (C) alors le prix de revient du système (avec toutes les charges de réalisation) sera estimé à :

$$P = C + C_m + C_p + C_e + 0.2 \times C$$

Pour notre cas : $p = 9263.5 + 4200 + 100 + 300 + 0.2 \times 9263.5$

$$P = 15716.2 \text{ DA}$$

Il est évident que lors d'une industrialisation, le prix de revient de ce système sera nettement plus faible.

IV.2 Instrumentation

IV.2.1 Préparation et installation des thermocouples

Lors des essais expérimentaux, on utilise des thermocouples pour la mesure des différentes températures. Les thermocouples sont adaptés pour ce genre d'utilisation car ils sont bon marché, robustes et pratiques. Un thermocouple est formé par la soudure au chalumeau de deux différents fils métalliques. Suivant l'effet Seebeck, une tension thermoélectrique apparaît au niveau de la jonction en fonction de la température de cette dernière. Lorsque ces deux fils sont connectés aux bornes de l'acquisition de données (Fluke Hydra data Logger 2625A) on forme alors un thermocouple à deux jonctions (T_1 : jonction chaude et T_2 : jonction froide) comme montré en figure IV-8.

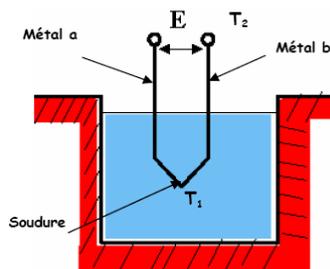


Figure IV-8: Schéma représentatif d'un thermocouple relié aux bornes d'une acquisition de données.

Par effet Seebeck, ce thermocouple génère une tension qui est proportionnelle à la différence de température des deux jonctions. Si on veut mesurer la température T_1 , alors on doit compenser l'effet de la jonction froide T_2 ce qui est fait automatiquement par notre système d'acquisition de données grâce à un circuit électronique interne. Notre acquisition de données se charge également de la conversion électronique de la tension thermoélectrique délivrée par la jonction chaude à une température directement lue en degrés Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Aux laboratoires, on peut trouver différents type de thermocouples. Les plus couramment utilisés sont :

Type K : Chromel / Alumel

Type J : Fer/Constantan

Type T : Cuivre/Constantan

Pour notre banc d'essai, on utilise des thermocouples de type K. Mais avant de les utiliser, il faut vérifier leurs soudures par simple étalonnage.

L'étalonnage d'un thermocouple consiste à relever sa réponse à l'aide de notre acquisition de données quand sa soudure est placée dans un milieu dont la température est connue. Cette opération est effectuée au minimum en deux points fixes correspondants aux températures de changement d'état de l'eau. C'est-à-dire le point 0°C et le point 100°C.

Pour les besoins de notre étude expérimentale, il nous faut trois (03) thermocouples dont les résultats des mesures d'étalonnage sont donnés dans le tableau IV-3 suivant :

Tableau IV-3 : étalonnage des thermocouples aux températures de changement d'état de l'eau

N° du thermocouple	Température mesurée au point 100°C	Température mesurée au point 0°C
1	99.5	0.0
2	99.5	0.1
3	99.7	0.0

On remarque que les écarts enregistrés (maximum 0.5°C) sont inférieurs aux valeurs limites tolérées pour le cas des thermocouples de type K, à savoir

$\pm 1.5^{\circ}\text{C}$. Nous concluons alors que nos thermocouples sont bons pour l'utilisation dans notre banc d'essai expérimental.

Le thermocouple mesurant la température ambiante a été installé dans un abri approprié. Les thermocouples mesurant la température de l'eau à l'entrée et à la sortie du capteur-stockeur ont été introduits dans la canalisation d'eau par le biais de deux petits orifices colmatés par de la colle Araldite.

IV.2.2 Mesure de l'éclairement solaire :

Pour la mesure de l'éclairement solaire on utilise un pyranomètre de type Kipp et Zonen de classe 1. Il sera directement relié à l'acquisition de données car il délivre une tension continue qui sera convertie moyennant son coefficient de conversion égale à $4.66 \mu\text{v}/\text{wm}^{-2}$.

IV.2.3 Description du banc d'essai expérimental :

Comme montré en figure IV-9, le prototype du chauffe-eau solaire de type capteur-stockeur objet de la présente étude est installé sur la plate-forme des essais expérimentaux de l'URER/MS. Le schéma descriptif du banc d'essai est montré en figure IV-10.



Figure IV-9: Photo montrant le banc d'essai expérimental du chauffe-eau capteur-stockeur installé sur la plate-forme des essais de l'URER/MS

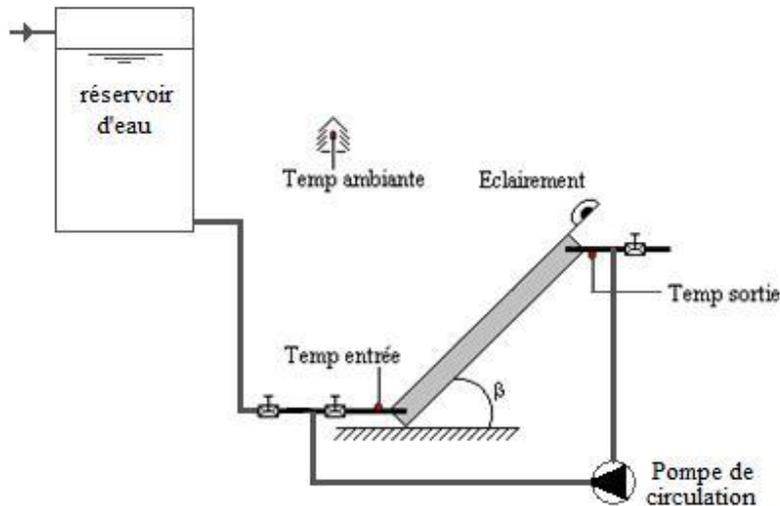


Figure IV-10: Schéma descriptif du montage expérimental du système étudié

Le capteur est en calage hivernal, c'est-à-dire incliné de 50° par rapport à l'horizontal : la latitude du lieu augmentée de 23° pour favoriser une meilleure captation du rayonnement solaire lors des journées hivernales [25]. Trois (03) thermocouples du type K ont été installés pour mesurer les températures : De l'eau chaude à la sortie (figure IV-11), de l'eau du réseau d'alimentation à l'entrée et de l'ambiance (figure IV-12) du système. Le rayonnement solaire incident sur le plan d'ouverture du capteur est mesuré à l'aide d'un pyranomètre du type Kipp et Zonen (figure IV-13). Ces différents transducteurs sont reliés à une acquisition de données du type Fluke 2625A (figure IV-14) dont le pas d'enregistrement a été fixé à 25 secondes.



Figure IV-11: Photo montrant la mise en place du thermocouple mesurant la température de l'eau à l'entrée du système.



Figure IV-12: Photo montrant l'abri météo utilisé pour la mesure de la température ambiante



Figure IV-13: Le pyranomètre fixé sur le plan de la surface d'ouverture du capteur-stockeur



Figure IV-14: L'acquisition de données utilisée pour la lecture et le stockage des paramètres mesurés

IV.2.4 Mode opératoire :

L'étude expérimentale effectuée sur le prototype a pour objectif la détermination du rendement moyen journalier. Le rendement moyen journalier est obtenu par la relation suivante [27]:

$$\eta_j = \frac{Q_{st}}{A.H_{in}} \quad (18)$$

Q_{st} : Est l'énergie emmagasinée par l'eau stockée dans le système. Elle est donnée par :

$$Q_{st} = \rho C_p . V (T_{e,f} - T_{e,i}) \quad (19)$$

Où ρC_p est la chaleur spécifique de l'eau stockée, V le volume d'eau stockée dans le système, $T_{e,f}$ est la température moyenne de l'eau à la fin de la durée de captation du rayonnement solaire (le coucher du soleil) et $T_{e,i}$ est la température moyenne de l'eau au début du test (le lever du soleil).

Pour obtenir les températures moyennes $T_{e,f}$ et $T_{e,i}$, la température de l'eau stockée dans le système est homogénéisée par recirculation à débit important. Ceci est obtenu moyennant une pompe de circulation installée au niveau du circuit hydraulique du prototype et qui est actionnée au début et à la fin du test (figure IV-15). La température de l'eau est supposée uniforme quand la différence de température entre la sortie et l'entrée de l'eau dans le système ne varie pas plus de 1°C pour une période de 5 minutes.



Figure IV-15: La pompe de circulation installée au niveau du circuit hydraulique pour homogénéiser la température de l'eau à l'intérieur du capteur-stockeur

A : Est la surface de captation du système.

H_{in} : Est l'énergie solaire incidente sur le plan d'ouverture du système :

$$H_{in} = \int_{t_i}^{t_f} E(t).dt \quad (20)$$

Avec E l'éclairement solaire incident sur le plan d'ouverture du capteur-stockeur.

Le rendement journalier du prototype est déterminé en fonction du paramètre $\Delta T_j / I_j$ [27] :

$$\Delta T_j = \frac{T_{e,i} + T_{e,f}}{2} - T_a \quad (21)$$

Où

T_a : La température ambiante moyenne durant la période du test Δt

$T_{e,i}$ et $T_{e,f}$: les températures de mélange moyen initial (au matin) et final (au soir).

I_j : L'éclairement solaire moyen sur la période du test :

$$I_j = \frac{H_{in}}{\Delta t} \quad (22)$$

De cette façon, le rendement journalier moyen sera exprimé par une relation linéaire de la forme :

$$\eta_j = B + C \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right) \quad (23)$$

Le coefficient B représente le rendement journalier du système fonctionnant à la température ambiante. Le coefficient C représente les pertes thermiques du système durant la période de captation du rayonnement solaire.

Le rendement journalier moyen peut être également exprimé par une relation non linéaire telle que suggéré par Tripanagnostopoulos et al [23] :

$$\eta_j = B + C \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right) + D \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right)^2 \quad (24)$$

IV.3 Déroulement des essais :

Les différents tests effectués se sont déroulés durant la période allant du mois de mai 2011 au mois de juin 2011. La prise de température initiale de l'eau se trouvant à l'intérieur du capteur-stockeur est prélevée après mélange chaque matin à 7h 30 alors que la température finale est prise à 18h 30. Avant chaque prise de température, la pompe de circulation est actionnée durant une période de 5 à 10 minutes jusqu'à homogénéisation de la température de l'eau stockée dans le capteur-stockeur. La vérification est effectuée par lecture directe des températures entrée/sortie sur l'acquisition de données. En fin de journée (après chaque test) l'acquisition de données est déchargée sur un micro-ordinateur où l'on enregistre les données numériques pour faire les différents traitements.

IV.4 Conclusion :

Dans ce chapitre nous exposons les différents éléments de notre capteur stockeur, qui réalisé dans l'unité d'URER/MS ; ensuite nous évaluons le prix de revient de ce système avec le coût des mains d'œuvre comme personnes qualifiées durant approximativement trois (03) jours de travail. Et en fin nous présentons les instruments préparés et utilisé dans l'expérimentation avec le mode opératoire choisi.

Chapitre V

Résultats et discussions

V.1 Introduction

Les conditions des tests sont présentés sur les figures au dessous où sont reportées les variations de l'éclairement solaire ainsi que la température ambiante sous les quelles les tests ont été effectués dans les deux cas de calage hivernal et annuel. Des remarques concernant le vent et l'état du ciel durant chaque jour de test sont également fournis sous forme d'informations complémentaires pour chaque graphe, et nous évaluons la quantité d'eau chaude du système.

V.2 Le capteur en calage hivernal, c'est-à-dire incliné de 50° par rapport à l'horizontal :

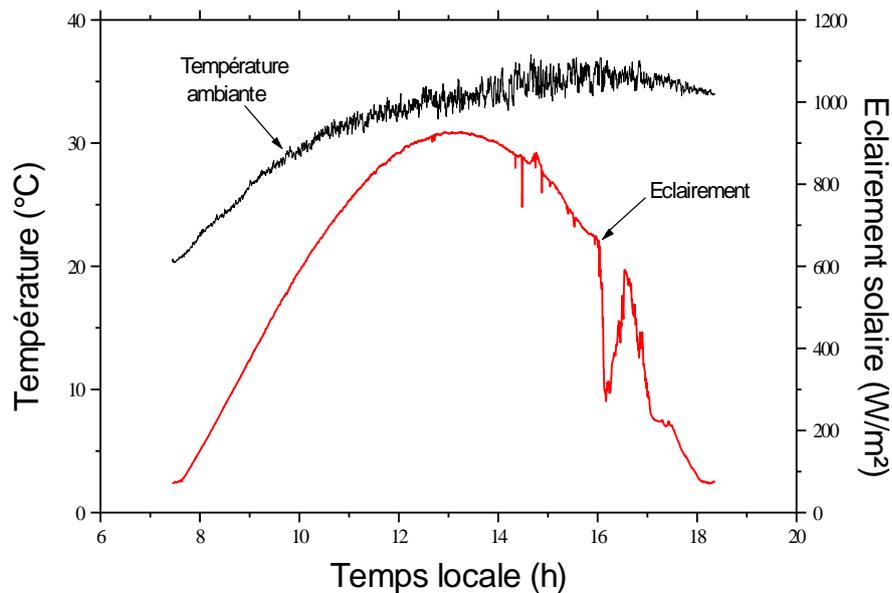


Figure V-1: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesurée sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 05/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 47%.

Durant la journée du 05/05/2011, le ciel était dégagé et la température ambiante moyenne lors du test est de 31.77°C. Un vent moyen durant la matinée et on a noté un léger passage nuageux lors de l'après midi (à partir de 15h30).

Ce passage nuageux discontinu a réduit l'éclairement solaire comme montré sur la figure. Le rendement journalier moyen du chauffe-eau est appréciable. En effet, la température de l'eau mélangée au début de la journée était de 31.31°C et la température de l'eau mélangée à la fin de la journée était de 55.63°C.

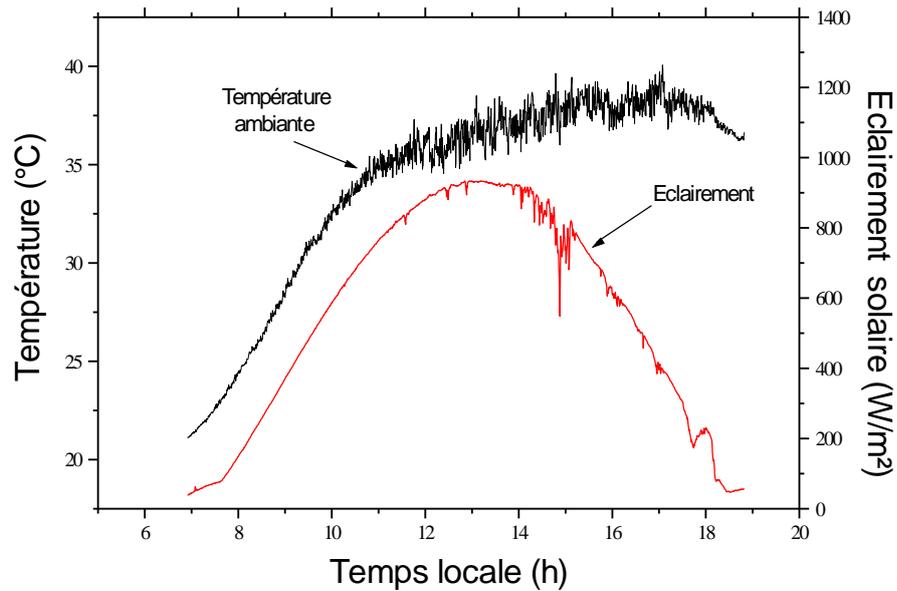


Figure V-2: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 06/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 37%.

La journée du 06/05/2011 est caractérisée par un ciel clair avec quelques nuages légers et discontinus observés en après midi. La température ambiante moyenne lors du test est de 34.07°C et le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen qui est de 37% est un peu plus faible par rapport à celui de la journée précédente. Ceci est principalement dû au fait qu'au début du test, la quantité d'eau puisée est faible de telle sorte que la température de l'eau mélangée au début du test était de 42.21°C. Le rendement du système sera alors plus faible car pour un système thermique solaire, le rendement est inversement

proportionnel à sa température. Plus le système est chaud, plus les pertes sont élevées et le gain est réduit.

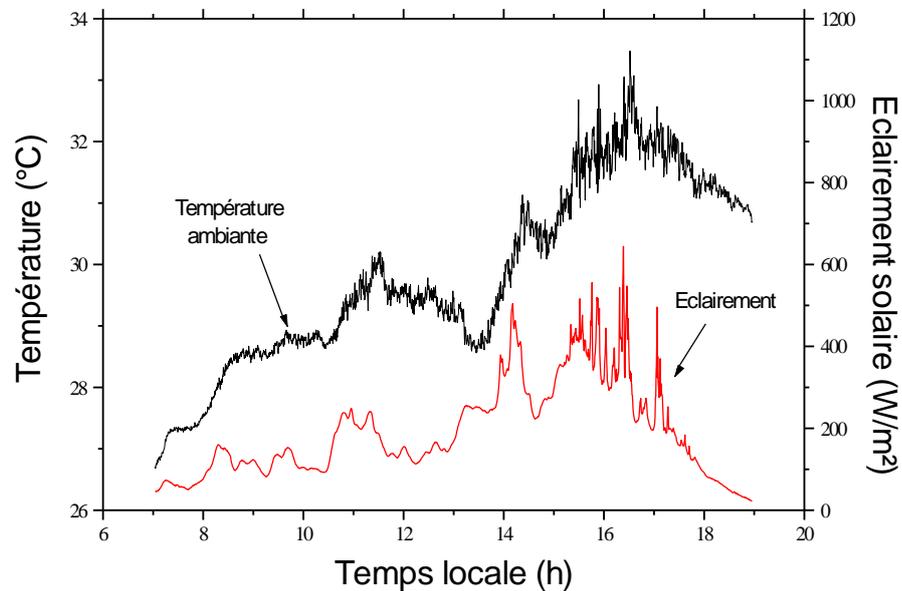


Figure V-3: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 07/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 16%.

Durant la journée du 07/05/2011 beaucoup de nuages ont été observés et la composante directe du rayonnement solaire était pratiquement absente. La température ambiante moyenne lors du test est de 29.82°C c'est-à-dire un jour peu froid par rapport aux autres jours, le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen du système est très faible « 16% ». Ceci est principalement dû au faible éclairement solaire enregistré durant toute la journée.

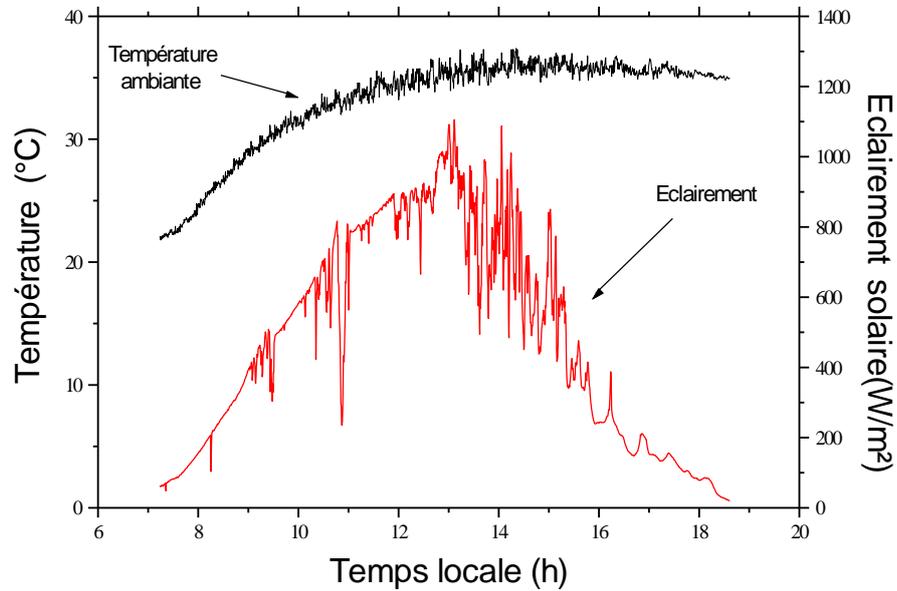


Figure V-4: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 08/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 45%.

La journée du 08/05/2011 se caractérise par un ciel peu clair tel qu'on observe quelques nuages discontinus et à partir de 14 h 30 le ciel devient plutôt couvert. La température ambiante moyenne est de 33.07°C et le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen du chauffe-eau durant cette journée est plutôt élevé (45%) parce que la température initiale de l'eau mélangée au matin est assez faible (35.71 °C).

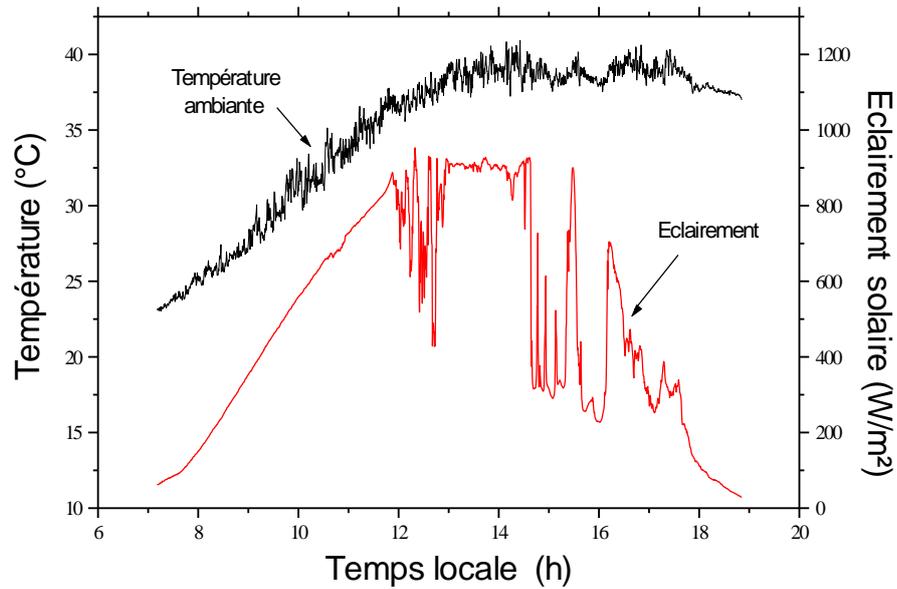


Figure V-5: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 09/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 39%.

La journée du 09/05/2011 se caractérise par la présence de brume durant toute la journée. En effet la température ambiante est assez élevée (34.89°C) et c'est la composante diffuse qui prédomine dans l'éclairement solaire global. Le vent reste moyen et Le rendement journalier moyen du chauffe-eau est moyen 39%.

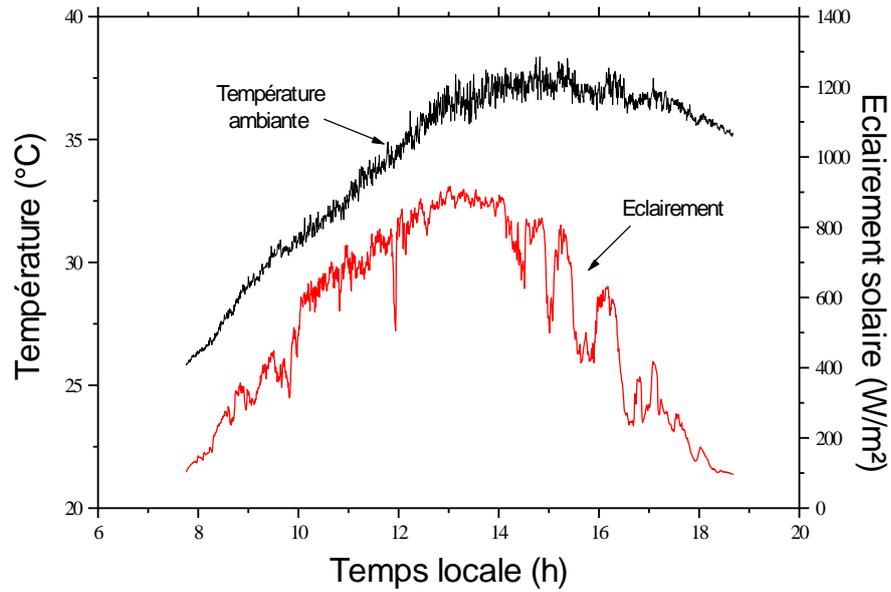


Figure V-6: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 10/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 42%.

La journée du 10/05/2011 est pratiquement semblable à la précédente mais avec en plus un léger vent de sable. La température ambiante moyenne est de 34.18°C. Le rendement journalier moyen (42%) est un peu plus grand que celui de la journée précédente car le test a démarré avec une température de mélange égale à 36.6 °C contre 41°C pour la journée du 09/05/2011.

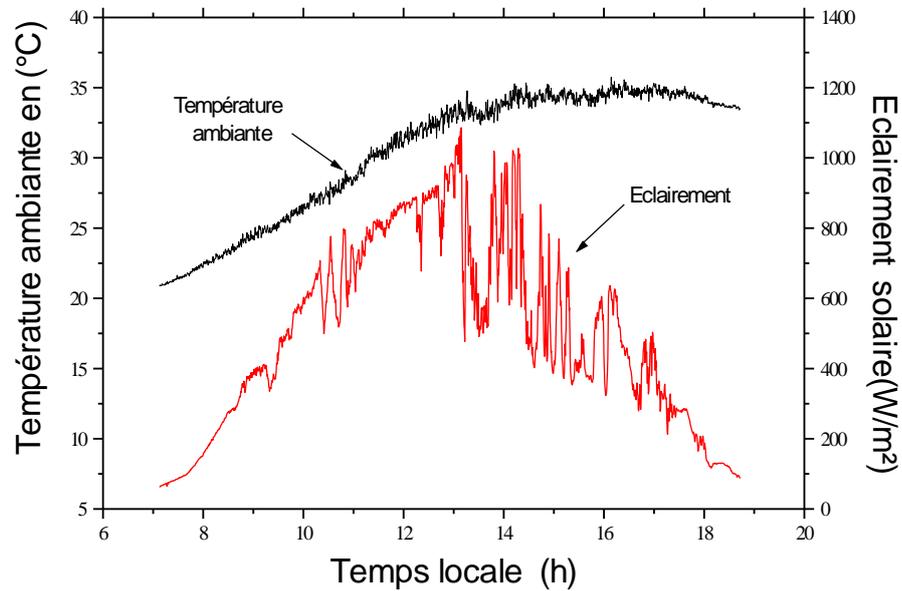


Figure V-7: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 11/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 46%.

La journée du 11/05/2011 est semblable aux deux précédentes mais avec une température ambiante égale à 30.45°C. Le rendement journalier moyen est assez élevé (46%). En effet, avant le début du test le chauffe-eau a été refroidi moyennant un long puisage d'eau ce qui a permis d'avoir une température initiale de l'eau mélangée égale à 26.7°C.

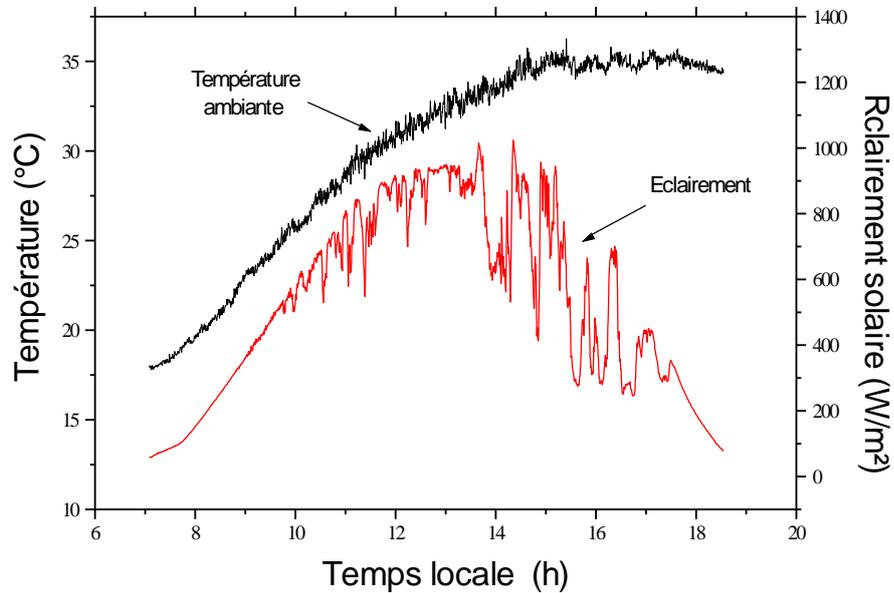


Figure V-8: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 12/05/2011. Le rendement journalier moyen est 49%.

Lors de la journée du 12/05/2011, le ciel était pratiquement dégagé sauf un très léger passage enregistré aux alentours de 13h. La température ambiante moyenne est 29.85°C c'est-à-dire un jour peu froid par rapport aux autres jours et le vent reste moyen. Durant ce test, on note un rendement journalier moyen très élevé (49%) du fait que l'irradiation globale est importante et que la température initiale du test est assez faible (28°C).

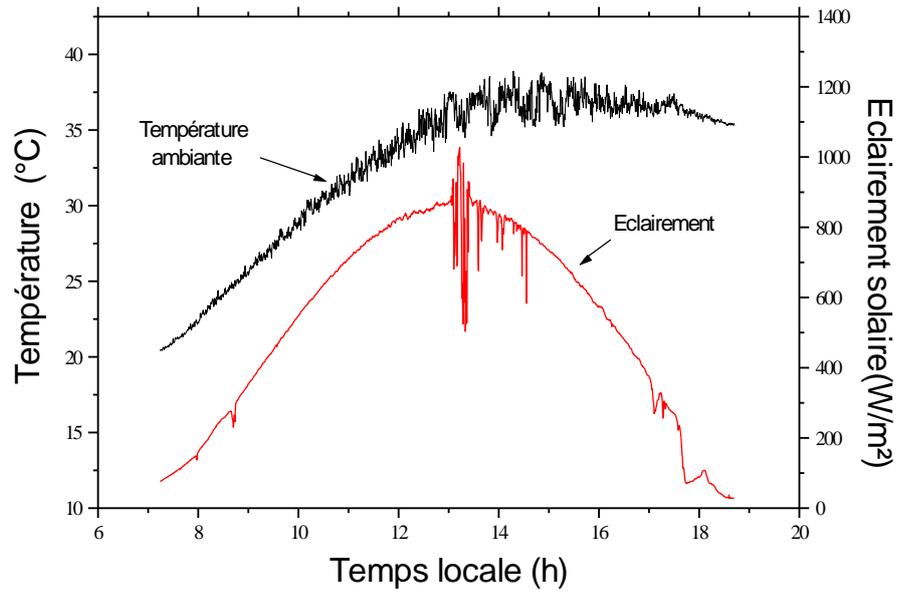


Figure V-9: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 13/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 38%.

La journée du 13/05/2011 se caractérise par une après midi dont le ciel est pratiquement voilé. La température ambiante moyenne est de 32.68°C et la vitesse reste assez forte durant l'après midi, ce qui engendre un léger vent de sable. Le rendement journalier moyen du chauffe-eau est de 38% avec une température initiale de test de l'ordre de 39°C.

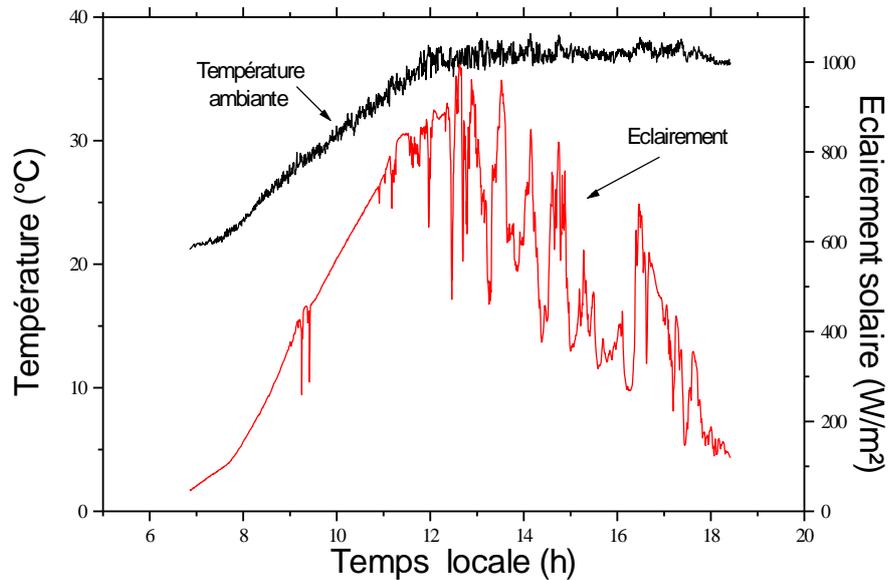


Figure V-10: Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 14/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 35%.

Durant la journée du 14/05/2011 le ciel été parfaitement dégagé et aucun passage nuageux n'a été enregistré. La température ambiante moyenne est de 33.23°C et le vent reste moyen. Le rendement journalier moyen est assez faible (35%) malgré les conditions favorisant une irradiation solaire importante parce que la température de l'eau mélangée au démarrage du test est de 45.4°C.

Les résultats de cette première campagne de tests sont regroupés dans le tableau qui suit :

Tableau V-1 : Calcul du rendement moyen journalier pour le prototype chauffe-eau solaire étudié en calage hivernal

Date	H_{in} (Wh/m ²)	$T_{e,i}$ (°C)	$T_{e,f}$ (°C)	Δt (h)	T_a (°C)	Q_{st} (Kj)	ΔT_j (°C)	I_j (W/m ²)	$A \cdot H_{in}$ (Kj)	η_j	$\Delta T_j / I_j$ (°Cm ² /W)
5/05/2011	6374.02	31.31	55.63	10.91	31.77	8238.20	11.17	584.23	17439.31	0.47	0.019
6/05/2011	6611.81	42.21	62.38	11.91	34.07	6832.42	18.22	555.14	18089.91	0.37	0.032
7/05/2011	2274.95	44.92	47.86	11.91	29.82	995.90	16.57	191.01	6224.26	0.16	0.086
8/05/2011	5471.02	35.71	56.02	11.38	33.07	6879.85	12.79	480.75	14968.71	0.45	0.026
9/05/2011	5768.5	41.0	59.5	11.66	34.89	6266.72	15.36	494.72	15782.61	0.39	0.031
10/05/2011	5817.66	36.6	56.5	10.92	34.20	6740.96	12.35	532.75	15917.12	0.42	0.023
11/05/2011	5797.57	26.7	48.5	11.60	30.45	7384.57	7.17	499.79	15862.15	0.46	0.014
12/05/2011	6111.24	28	52.29	11.46	29.85	8228.04	10.29	533.26	16720.35	0.49	0.019
13/05/2011	6050.78	39.5	58.5	11.46	32.68	6436.09	16.32	527.99	16554.93	0.38	0.030
14/05/2011	5619.11	45.5	61.6	11.56	33.23	5487.62	20.27	486.08	15373.88	0.35	0.041
15/05/2011	6253.45	46.6	65.6	11.55	35.48	6436.09	20.62	541.42	17109.43	0.37	0.038

V.3 Evolution du rendement journalier et les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié par le premier calage :

La représentation graphique de ces résultats est donnée sur les figures précédentes. La figure V-11 est relative au lissage de premier degré conformément à l'équation (6) et la figure V-12 est relative au lissage de second degré conformément à l'équation (7).

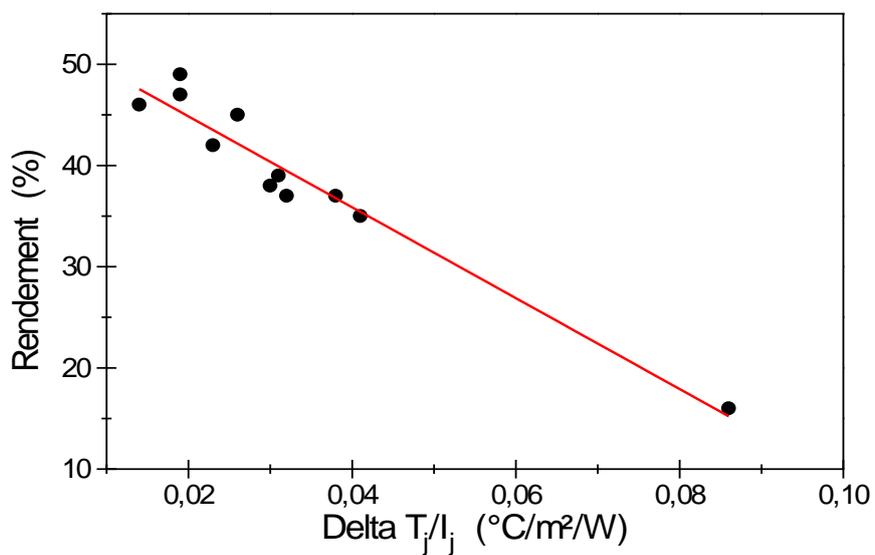


Figure V-11 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j/I_j$ avec un lissage linéaire de premier degré.

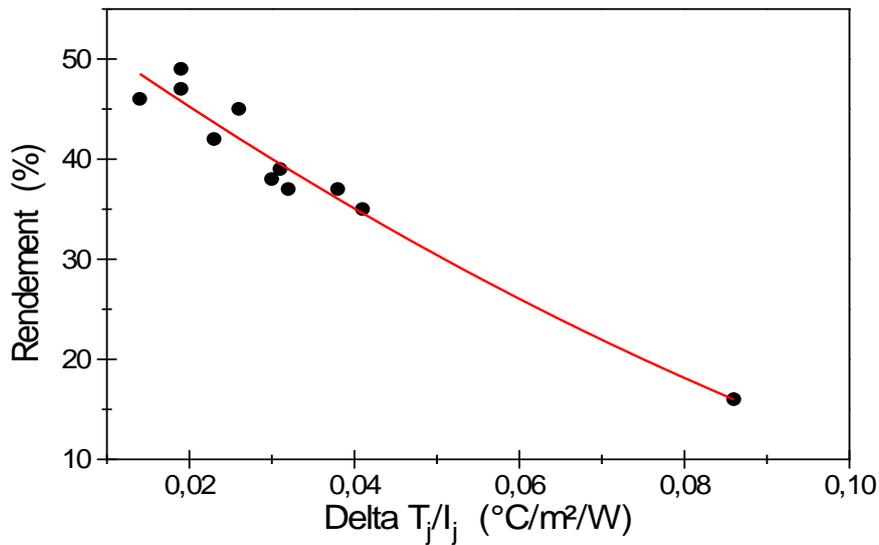


Figure V-12 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j/I_j$ avec un lissage non-linéaire de second degré.

Les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié en calage hivernale testé en période d'été sont données comme suit :

Lissage du premier degré avec une déviation standard de 2.17 :

$$\eta_j = 0.53 - 4.49 \frac{\Delta T_j}{I_j} \quad (25)$$

Lissage du second degré avec une déviation standard de 2.20 :

$$\eta_j = 0.56 - 5.94 \frac{\Delta T_j}{I_j} + 14.21 \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right)^2 \quad (26)$$

L'analyse des différents résultats obtenus par cette première série de tests montre que pendant la durée de captation du rayonnement solaire et au voisinage de la température ambiante le chauffe-eau solaire a un bon rendement qui est aux alentours de 50%. Cette performance s'explique par les plus faibles pertes optiques et thermiques à travers le vitrage du système.

Dans le but d'une comparaison, on présente dans le tableau qui suit les résultats de tests expérimentaux de quelques prototypes plus sophistiqués trouvés dans la littérature.

Tableau V-2: Rendement journalier moyen de quelques chauffe-eau solaires auto-stockeur

Référence	Rendement η_j (%)
[24] : Teyeb .A et al	34.02, 34.58 et 36.86 (trois jours de test)
[27] : Tripanagnostopoulos	$0.68 - 4.29 \frac{\Delta T_j}{I_j} - 30.91 \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right)^2$

En tenant compte des moyens de réalisation de notre système, de sa simplicité et de son prix de revient qui est assez faible et par comparaison avec les performances d'autres chauffe-eau solaires de type capteur stockeur plus sophistiqués trouvés dans la littérature, nous pouvons conclure que notre prototype reste compétitif avec un rapport qualité/prix très appréciable.

V.4 Evaluation de la quantité d'eau chaude du système :

Afin d'évaluer les capacités de notre prototype de chauffe-eau solaire capteur-stockeur à subvenir aux besoins en matière d'eau chaude à une certaine température désirée ; C'est-à-dire évaluer la capacité du système à fournir une quantité d'eau chaude à une certaine température après une journée de captation ou bien après une nuit de déperdition nocturne. On programme alors certain test de puisage continu d'eau en fin de journée à 18 h 00 dans un premier temps puis au matin à 7 h 00.

Pour cela, on rajoute au montage expérimental un débitmètre à bille pour la mesure du débit de puisage d'eau. Le montage du débitmètre est montré dans la figure V-13



Figure V-13 : Le montage du débitmètre à la sortie de système à cause de la courte période de mon stage ; ces tests ont été limités à deux pour le puisage du soir (18 et 19 mai) et à deux pour le puisage du matin (21 et 22 mai). Sur la figure V-14, on présente l'évolution (durant le temps du puisage continu) de la température de l'eau soutirée en fonction de la quantité d'eau puisée le soir de la journée du 18/05/2011.

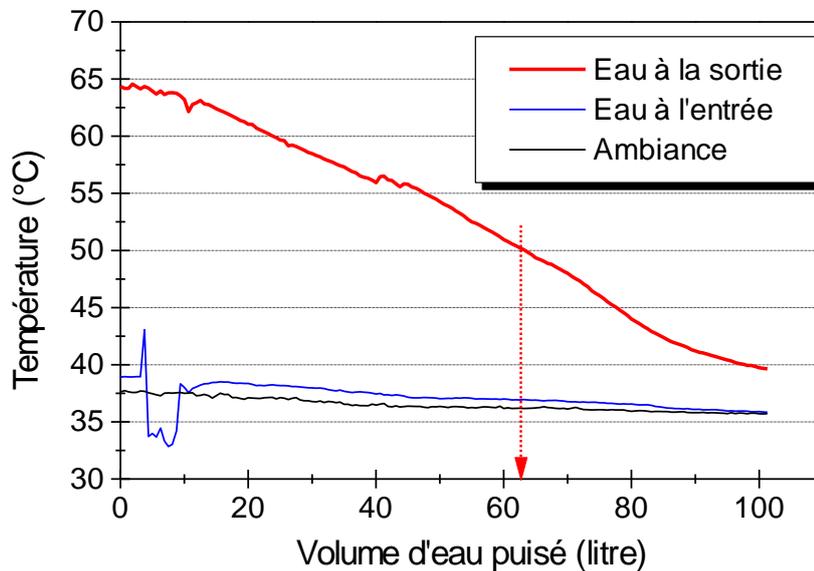


Figure V-14 : Evolution de la température de l'eau chaude à la sortie du chauffe-eau capteur-stockeur en fonction de la quantité d'eau puisée à 18h 00 le 18 mai 2011 avec un débit de 1.5 l/min.

On constate que le système arrive à fournir 63 litres d'eau chaude dont la température est supérieure à 50°C avec une température ambiante moyenne égale à 36.51°C pendant la journée de captation. On remarque également que l'hors du démarrage du puisage une difficulté de maintien du débit de puisage constant. Ceci est principalement dû à la pression interne du chauffe-eau qui est assez élevée juste après ouverture du robinet de puisage.

Sur la figure V-15, on présente l'évolution (durant le temps du puisage continu) de la température de l'eau soutirée en fonction de la quantité d'eau puisée au matin de la journée du 22/05/2011.

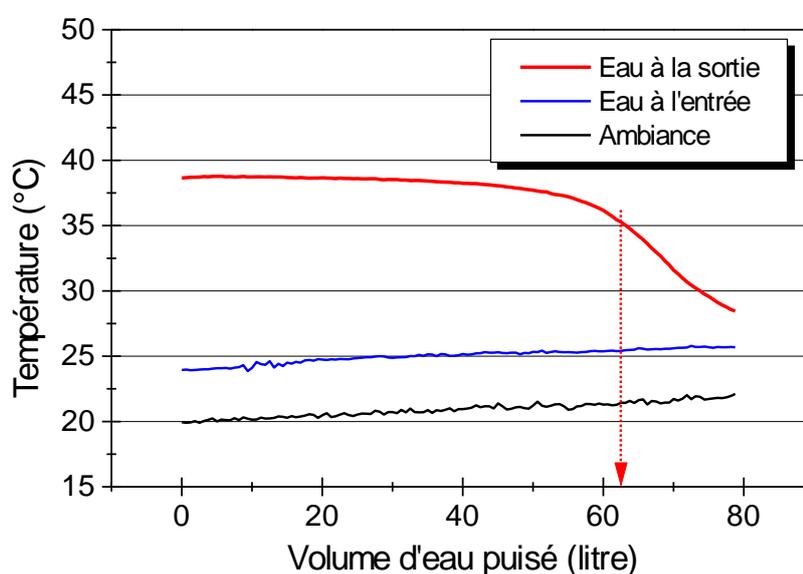


Figure V-15 : Evolution de la température de l'eau chaude à la sortie du chauffe-eau capteur-stockeur en fonction de la quantité d'eau puisée à 07h 00 du matin le 22 mai 2011 avec un débit de 1.5 l/min.

On remarque que le système arrive à fournir 63 litres d'eau chaude dont la température est supérieure à 35°C après une nuit de repos et de déperditions thermiques vers une ambiance assez froide.

Ces derniers tests démontrent la capacité de ce prototype de chauffe-eau solaire capteur-stockeur à fournir de l'eau chaude. Les niveaux de températures obtenues sont très importants. Sa capacité de rétention de la chaleur après toute une nuit est relativement faible mais il reste apte à fournir de l'eau chaude avec une quantité et un niveau de température très important.

V.3 Le capteur en calage annuel, c'est-à-dire incliné de 28° par rapport à l'horizontale :

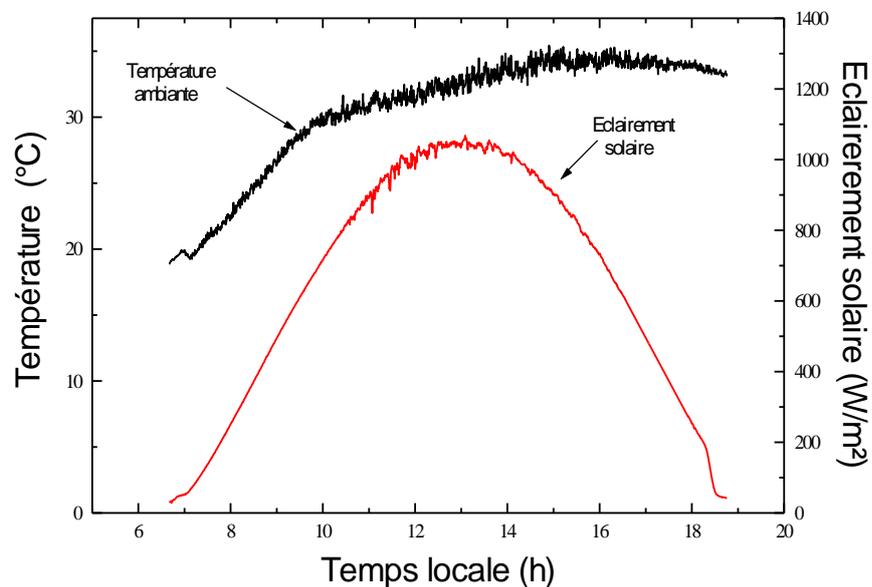


Figure V-16 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 25/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 46%.

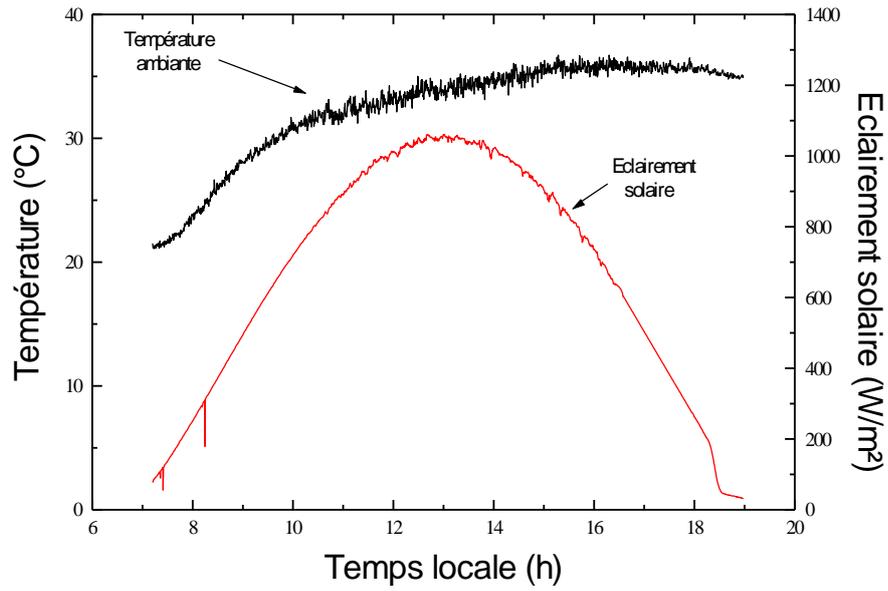


Figure V-17 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 26/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 57%.

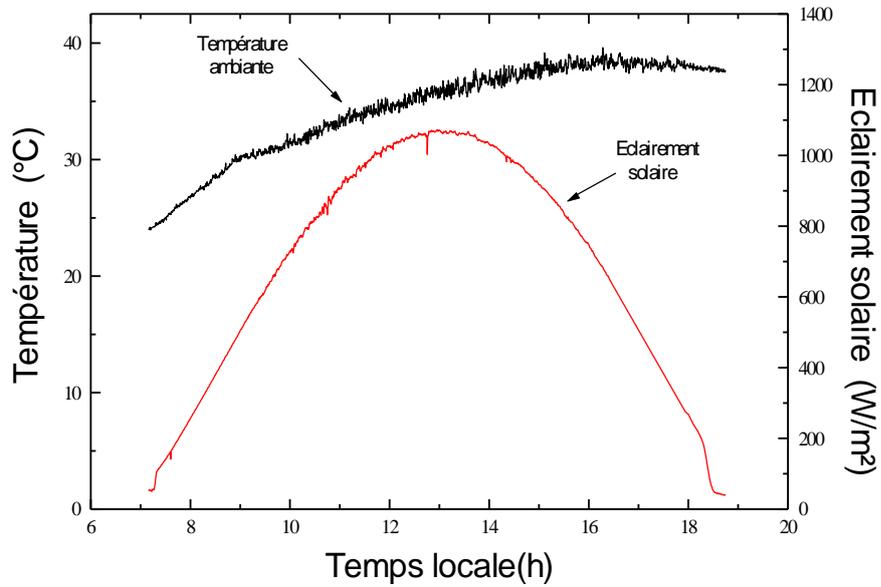


Figure V-18 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 27/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 59%.

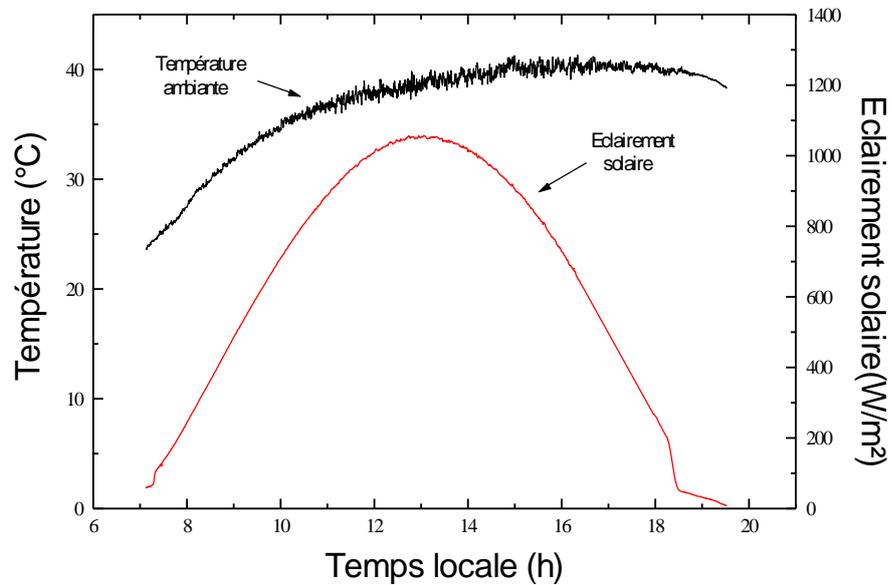


Figure V-19 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 28/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 50%.

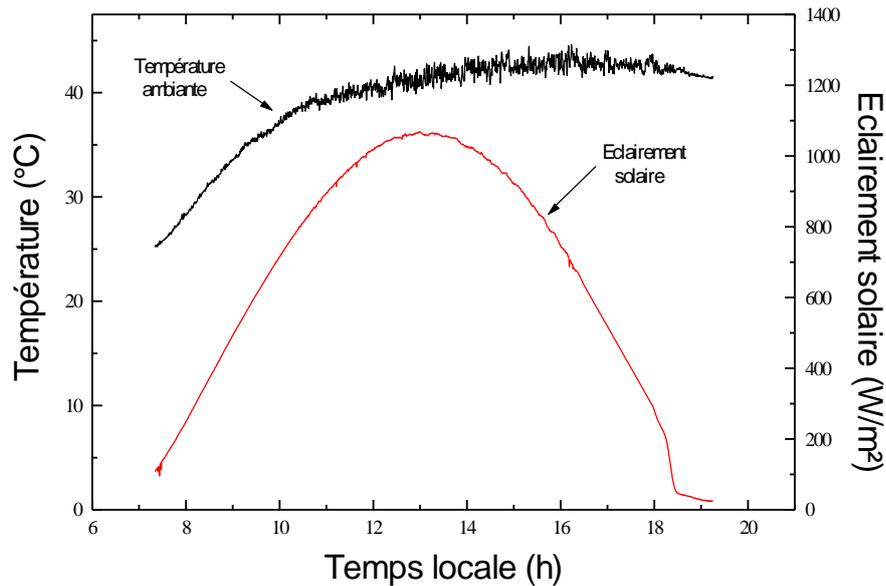


Figure V-20 : Evolution de la température ambiante et de l'éclairement solaire global mesuré sur le plan d'ouverture du capteur lors de la journée du 29/05/2011. Le rendement journalier moyen est de 49%.

D'après l'expérience étudiée pendant les journées 25-26-27-28-29/05/2011, nous remarquons que le ciel est clair à partir de lever jusqu'à le coucher de soleil sauf quelque différent négligeable. L'analyse des résultats obtenus par la deuxième série de tests montre l'élévation du rendement qui est aux alentours ou bien dépassé la valeur de 50%. Nous remarquons également que les températures de mélange d'eau chaude à la fin des tests est de l'ordre de 75 °C. Elle est nettement plus grande par rapport à celle enregistrée lors des tests du chauffe-eau en calage hivernale. Cette performance s'explique par l'amélioration de position de captation (50° vers 28°) c'est-à-dire une augmentation de quantité de chaleur absorbée par le capteur

Les résultats de cette partie campagne de tests sont regroupés dans le tableau suivant :

Tableau V-3 : Calcul du rendement moyen journalier pour le prototype chauffe-eau solaire étudié en calage annuel

Date	H_{in} (Wh/m ²)	T_{e,i} (°C)	T_{e,f} (°C)	Δt (h)	T_a (°C)	Q_{st} (Kj)	ΔT_j (°C)	I_j (W/m ²)	A*_iH_n (Kj)	η_j	ΔT_j/I_j (°Cm ² /W)
25/05/2011	7854.30	46.05	73.82	12.09	30.50	9406.86	29.43	649.65	21489.36	0.43	0.045
26/05/2011	7865.46	30.85	65	11.23	32.43	11568.09	15.49	700.39	21519.89	0.53	0.022
27/05/2011	7957.49	30.3	66.2	11.74	34.37	12160.83	13.88	693.76	21771.69	0.55	0.020
28/05/2011	7835.57	35.58	65.88	12.06	37.19	10263.88	13.54	649.71	21438.11	0.48	0.021
29/05/2011	7939.85	47.1	77.1	11.87	39.34	10162.26	22.76	668.9	21723.42	0.46	0.034

V.5 Evolution du rendement journalier et les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié par le deuxième calage :

La représentation graphique de ces résultats est donnée sur les figures précédentes. La figure V-21 est relative au lissage de premier degré et la figure V-22 est relative au lissage de second degré.

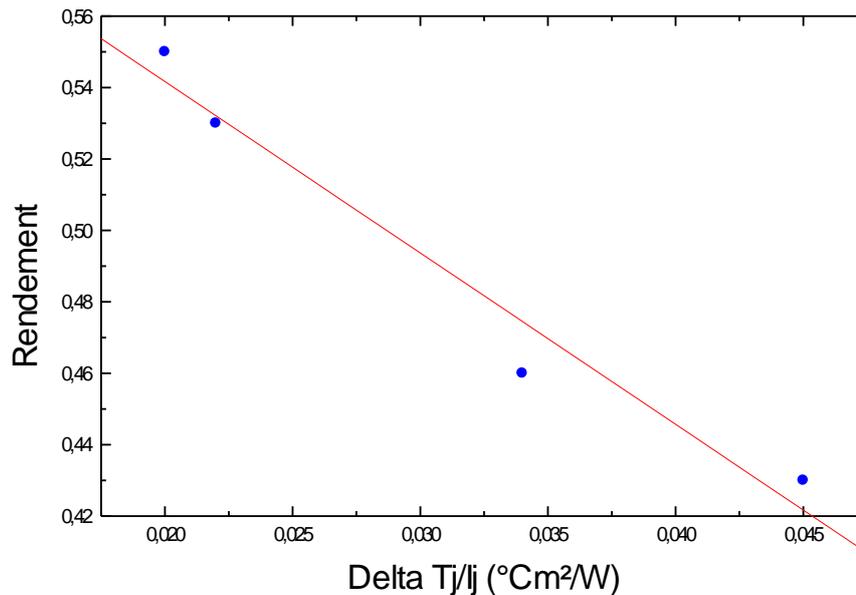


Figure V-21 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j / I_j$ avec un lissage linéaire de premier degré.

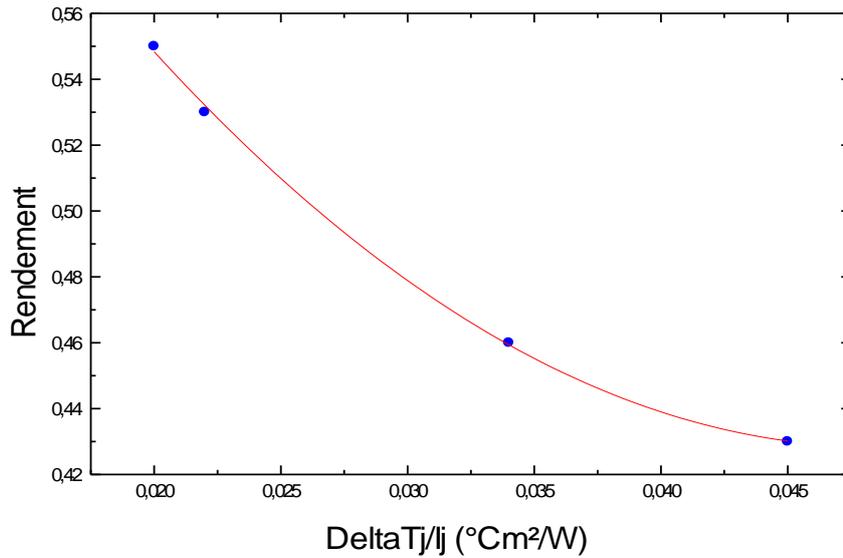


Figure V-22 : Evolution du rendement journalier η_j en fonction de $\Delta T_j / I_j$
Avec un lissage non-linéaire de deuxième degré.

Les équations de caractérisation du chauffe-eau étudié en calage annuel testé en période d'été sont données comme suit :

Lissage du premier degré avec une déviation standard de 0.01 :

$$\eta_j = 0.63 - 4.79 \frac{\Delta T_j}{I_j} \quad (27)$$

Lissage du second degré avec une déviation standard de 0.002:

$$\eta_j = 0.77 - 14.35 \frac{\Delta T_j}{I_j} + 148.06 \left(\frac{\Delta T_j}{I_j} \right)^2 \quad (28)$$

V.6 Comparaison des rendements entre les deux calages :

Tableau V- 4 : Tableau comparatif des rendements moyens journaliers entre les deux calages hivernaux et annuels.

η_j	1 ^{ère} calage	0.47	0.37	0.16	0.45	0.39	0.42	0.46	0.49	0.38	0.35	0.37
	2 ^{ème} calage	0.43	0.53	0.55	0.48	0.46						

Interprétation :

Nous remarquons une augmentation des valeurs de rendement on calage annuelle (2^{ème} calage) par rapport le première, sa valeur est compris entre [0.43 0.55] et le premier [0.35 0.49]. Cette différence peut expliquer par l'amélioration du surface de captation du rayonnement solaire, le mois de mai il est proche la saison d'été et dans ce dernier avec le deuxième calage l'éclairement solaire et plus perpendiculaire par rapport l'autre calage. Donc les performances (transitivité de vitrage et l'absorptivité du capteur) seront augmente et finalement influx positivement sur les résultats.

V.7 Conclusion:

D'après les tests expérimentaux sur notre système, et les différents résultats obtenus ; nous retrouvons que plus l'éclairement solaire est perpendiculaire sur la surface de captation plus la quantité de chaleur absorbé est considérable, parce que la transitivité de vitrage ainsi que l'absorptivité de la plaque absorbante sont inversement proportionnelles à l'angle d'incidence du rayonnement solaire. L'inclinaison estivale, de l'ordre de 5° (la latitude d'Adrar -23°), n'est pas indiquée car on risque alors d'obtenir des températures beaucoup plus élevées qui peuvent endommager le système s'il n'est pas quotidiennement exploité. Cette inclinaison n'est pas également indiquée parce qu'elle favorise le dépôt de sable sur la couverture transparente et réduit ainsi sa transitivité.

Il est donc très important de bien choisir l'inclinaison du capteur-stockeur en fonction des saisons pour mieux tirer profit du système. De façon générale, nous recommandons les inclinaisons suivantes :

- ✓ En période d'hiver : La latitude du lieu considéré augmenté de 23° (27.53 [latitude d'Adrar par exemple] + 23°).
- ✓ En période estivale : La latitude du lieu considéré.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion Générale

L'étude expérimentale de la performance thermique de ce prototype de chauffe-eau solaires Capteur-Stockeur, réalisé par des moyens simples et des matériaux disponibles localement à Adrar, a montré que la contribution d'un tel système à l'économie d'énergie est fort intéressante et que sa rentabilité est loin d'être négligeable. Il réduit également la consommation de bois et de matériaux divers d'hydrocarbure provoquant l'émission de gaz à effet de serre.

On pense que c'est dans les régions sahariennes, où l'éclairement solaire est important et les besoins en matière d'eau chaude en période hivernale sont modérés que ce système est le plus indiqué.

Il est facilement à réaliser ce type de chauffe-eau avec les potentiels disponibles sur le marché algérien, même s'il n'a pas besoin de gros travaux de réparation. Bien qu'il se caractérise par un prix élevé 16 000DA, mais il est indiqué par son indépendance de l'énergie fossile et il peut être utilisé dans des endroits isolés comme les montagnes et les déserts loin du champ électrique.

La quantité d'eau chaude obtenue (63 litres) à partir de ce prototype où la température est environ 50°C. Il peut répondre ainsi aux différents besoins d'une petite famille.

Le choix d'inclinaison du capteur-stockeur en fonction des saisons de façon générale recommandée comme suit :

- En période d'hiver : latitude du lieu considéré + 23°.
- En période estivale : La latitude du lieu considéré.

Référence :

- [1] **Robert Celaire** «Les chauffe-eau solaires Capteur-Stockeurs», Gret, GERES, SYNOPSIS France Janvier 1987.
- [2] **Pierre Bessemoulin et Jean Oliviéri** le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette - La Météorologie 8esérie - n°31 - septembre 2000
- [3] **R, Bernard, G Merguy, M.Schwartz**, Le rayonnement solaire : conversion Thermique et application .Technique et documentation ,deuxième édition -1980.
- [4] **Tabet Ismail** - étude d'un distillateur solaire a cascade thèse -magister en physique option : énergies renouvelables- 2010
- [5] **Albert Fourny et Marianne Wojcik**, Texte de la conférence présentée le 10 mai 2000, au CRDP de Nancy : Conférence de Monsieur Hervé Le Treut, directeur de recherche au Laboratoire de Météorologie Dynamique (Unité mixte de recherche : CNRS, École Normale Supérieure, École polytechnique, Université Paris VI)
- [6] **BERRICHON Jean-Damien** Installation et mise en service d'un instrument de mesure du rayonnement solaire diffus. Stage réalisé au Laboratoire d'Energétique, d'Electronique et Procédés (LE2P), EA4079. Université de la Réunion
- [7] <http://www.outilssolaires.com/glossaire/prin-1geometrie.htm>
- [8] **rapport** : le gisement solaire [Quali'PV]. Formation Générateur PV raccordé (élec) 2008
- [9] **Benjamin Dessus et François Pharabod** – l'énergie solaire - presses universitaires de France
- [10] **Ch. Perrin de brichambaut, Ch.Vauge**. Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique. Edit Technique et Documentation, Paris, France 1981.
- [11] **Sonalgaz** - Potentialités et perspectives pour les Energies renouvelables en Algérie -Séminaire Algéro-Allemandsur le partenariat dans le domaine de l'Energiesolaire Hôtel EL DJAZAIR le 25 janvier 2011
- [12] **PHILIPPE ROUX** « cours de thermique » 2006
- [13] énergies renouvelables « introduction aux chauffe-eau solaires » Ressources naturelles « Canada »
- [14] **YVES JANNOT** «thermique solaire » janvier 2007 et octobre 2003
- [15] **le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette/La Météorologie 8e série - n° 31 - septembre 2000**
- [16] **Sarah Marniesse et Ewa Filipiak** « Lutte contre l'effet de serre *Enjeux & Débats* » Agence Française de Développement

- [17] **Robert Celaire** «Les chauffe-eau solaires Capteur-Stockeurs», Gret, GERES, SYNOPSIS France Janvier 1987.
- [18] **Harmim Arezki** «Contribution à l'estimation des performances exergetiques de différents systèmes solaires en milieu Saharien» Thèse de Magister CDER 1994.
- [19] **Harmim A. et Boukar M.** «Evaluation expérimentale des performances à long terme du chauffe-eau solaire en milieu saharien » 3^{eme} séminaire international de la physique énergétique. Bechar, Algérie, du 12 au 14 Novembre 1996.
- [20] **Iordanou, Grigorios** «Flat-plate solar collectors for water heating with improved heat transfer for application in climatic conditions of the Mediterranean region» Doctoral Thesis. Durham University. 2009. (<http://ethses.dur.ac.uk>).
- [21] **Kaushik S. C. et al.** « Transient analysis of a triangular built-in-storage solar water heater under winter conditions » Heat Recovery Systems & CHP Vol.14, N°4. 1994.
- [22] **David Faiman and al.** «Reducing the heat loss at night from solar water heaters of the integrated collector-storage variety » Solar Energy Vol.71, N°2, 2001.
- [23] **Tripanagnostopoulos Y. and M. Souliotis** «ICS solar systems with horizontal (E-W) and vertical (N-S) cylindrical water storage tank » Renewable Energy Vol. 29, 2004.
- [24] **Tayeb A. et al.** «Etude des performances d'un capteur stockeur cylindro-parabolique » Revue des Energies Renouvelables Vol. 9/3, 2006.
- [25] **Harmim A. et al.** « Développement d'un chauffe-eau solaire capteur-stockeur installé en milieu saharien » Rapport interne, URER/MS, Décembre 2003.
- [26] **Nahar N. M. and Jagdish P. Gupta** « Studies on gap spacing between absorber and cover glazing in flat plate solar collectors », International journal of energy research Vol. 13, 1989.
- [27] **Tripanagnostopoulos Y. , Souliotis M. and Nousia Th.** « CPC type integrated collector storage systems » Solar Energy Vol. 72, N°4, 2002.