



**UNIVERSITE ASSANE SECK DE ZIGUINCHOR**

UFR : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Département de physique

Mémoire de master

Mention : Physiques et Applications

Spécialité : Physique des Matériaux



---

## **DIMENSIONNEMENT ET ETUDE DE PERFORMANCE D'UN CHAUFFE-EAU SOLAIRE À CAPTEUR PLAN VITRE POUR UN USAGE DOMESTIQUE**

---

Présenté par :

**Madame Madeleine DRAME SAGNA**

Sous la direction de

**Dr. Modou TINE et Dr. Marthe T. DIATTA**

Présenté et soutenu publiquement le 07/12/2020 devant le jury composé de :

Président	Diouma KOBOR	Professeur Titulaire	UASZ/UFRST
Rapporteur	Joseph S. DIATTA	Maître-Assistant	UASZ/UFRST
Examineur	Lat Grand NDIAYE	Maître-Conférences	UASZ/UFRST
Co-Encadrant	Marthe T. DIATTA	Docteur en physique des matériaux	CSFP-BTP
Encadrant	Modou TINE	Assistant	UASZ/UFRST

Année académique

2019 - 2020

# Dédicaces

---

Je dédie ce présent travail

À mon père Cheikh DRAME

À la mémoire de ma mère, Seynabou M'BAYE

À ma tante Adjil Yama M'BAYE

À mon mari chéri Mohamed M. D. SAGNA

À mes chers frères et sœurs

À mes tuteurs de Diamniadio

À tous mes amis

Pour leur témoigner toute ma reconnaissance.

## **Remerciements**

---

Je remercie tout d'abord ALLAH le Tout-Puissant, de m'avoir donné la force et la patience, la santé et la volonté de réaliser ce modeste travail de mémoire.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Je témoigne une immense reconnaissance au **Dr. Modou TINE**, mon encadrant au Département Physique de l'Université Assane Seck de Ziguinchor de m'avoir assistée et orientée tout au long de l'élaboration de ce rapport de mémoire.

Je tiens à remercier vivement mon maître de stage et Co-encadrant, **Dr. Madame Marthe Tatiana DIATTA DIEME**, responsable de la filière Unité de Maitrise Energétique (UME) du CSFP-BTP de Diamniadio, pour son accueil, le temps passé ensemble et le partage de son expertise au quotidien.

J'exprime toute ma gratitude au **Pr. Diouma KOBOR, Dr. Joseph S. DIATTA et Dr. Lat Grand NDIAYE** qui m'ont fait l'honneur d'être les membres du jury de ce travail de mémoire de master 2. Vos remarques et vos suggestions me seront d'un grand intérêt.

Mes vifs remerciements à tous les enseignants de l'Unité de Formation et de Recherche (UFR) des Sciences et Technologies de l'Université Assane Seck de Ziguinchor, en particulier ceux des départements de physique, de chimie, de mathématique et d'informatique.

Un grand merci à mes collègues pour les sympathiques moments que nous avons passés ensemble, je les remercie de leur confiance et de leur disponibilité.

Merci à mon mari, ma famille paternelle et maternelle, ma belle-famille, pour leur soutien durant mes études.

Enfin, je remercie toute personne ayant contribué à l'élaboration de ce travail de mémoire de master 2.

## **Résumé :**

---

Le but principal de ce travail est de dimensionner les composants d'un chauffe-eau solaire (CES) thermique à capteur plan vitré et d'étudier sa performance pour un usage domestique.

Tout d'abord, ce travail fait un rappel de quelques généralités sur les chauffe-eaux solaires. L'accent est mis sur les phénomènes physiques mis en jeu lors du chauffage de l'eau sanitaire. De même une étude bibliographique des différents composants et différents types de chauffe-eau solaire ainsi que leurs modes de fonctionnement ont été présentées.

Ensuite, un dimensionnement et une étude expérimentale des kits de CES à thermosiphon monobloc et à circulation forcée ont été réalisés. Pour ce faire, des prises de température du fluide caloporteur ont été effectuées à l'entrée et à la sortie des capteurs solaires ainsi que celle de l'eau du ballon de stockage.

Enfin, les résultats expérimentaux obtenus ont permis de tracer plusieurs courbes et d'étudier la performance des chauffe-eaux solaires. Ces résultats nous ont permis de conclure que ces deux kits de chauffe-eau solaire sont performants car respectent les exigences de fonctionnalités. Sachant que la durée de vie d'un chauffe-eau solaire est de 20 ans en moyenne, le dimensionnement effectué sur les deux kits nous ont permis d'obtenir les résultats suivants. Pour un kit de chauffe-eau solaire à circulation forcée ayant un ballon de stockage de 250 litres avec deux capteurs solaires de surface totale  $4 \text{ m}^2$  montés en séries. Le rendement du système solaire est de 76 % avec un taux de réduction d'émission de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ) de 933,59 kg par an, soit un taux d'amortissement de 9 ans. Par contre, pour le kit du chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc dont le volume du ballon de stockage est de 300 litres avec deux capteurs de surface totale  $4 \text{ m}^2$  montés en parallèles. Le rendement du système solaire est de 88 % avec un taux de réduction d'émission de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2$ ) de 1190,8 kg par an et un taux d'amortissement de 6 ans.

Une étude comparative nous a permis de conclure que l'installation d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc serait plus rentable dans notre pays, du fait que nous sommes situés dans une région tempérée. Cependant, il n'est pas adapté à tout type d'habitation. Dans ce cas, nous pouvons faire recourt au système à circulation forcée.

**Mots-clefs :** Energie solaire, capteur plan vitré, chauffe-eau solaire, thermosiphon, échange thermique.

## **Summary:**

---

The main goal of this work is to dimension the components of a solar thermal water heater (SWH) with a flat plate glass collector and to study its performance for domestic use.

First, this work is a reminder of some generalities about solar water heaters. Emphasis is put on the physical phenomena involved in the heating of domestic water. In the same way, a bibliographical study of the various components and types of solar water heaters as well as their modes of operation has been presented.

Then, a dimensioning and an experimental study of the CES kits with monobloc thermosiphon and forced circulation were carried out. For this purpose, temperature measurements of the heat transfer fluid were carried out at the inlet and outlet of the collectors as well as those of the water in the storage tank.

Finally, the experimental results obtained made it possible to draw several curves and to study the performance of the solar water heaters. These results allowed us to conclude that these two solar water heater kits are efficient because they meet the functional requirements. Knowing that the life span of a solar water heater is 20 years on average, the dimensioning carried out on the two kits allowed us to obtain the following results. For the forced circulation solar water heater with a 250 liter storage tank with two solar collectors with a total surface area of 4 m<sup>2</sup> connected in series. The efficiency of the solar system is 76 % with a greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) emission reduction rate of 933.59 kg per year, this represents a payback period of 9 years. On the other hand, for the solar water heater kit with monobloc thermosiphon, the storage tank volume is 300 liters with two collectors with a total surface area of 4 m<sup>2</sup> mounted in parallel. The efficiency of the solar system is 88 % with a greenhouse gas (CO<sub>2</sub>) emission reduction rate of 1190.8 kg per year and an amortization rate of 6 years.

A comparative study allowed us to conclude that the installation of a monobloc thermosiphon solar water heater would be more profitable in our country, due to the fact that we are located in a temperate region. However, it is not suitable for all types of housing. In this case, we can use the forced circulation system.

Keywords: Solar energy, flat glass collector, solar water heater, thermosiphon, heat exchange.

# **Table des matières**

---

Dédicaces.....	i
Remerciements.....	ii
Résumé : .....	iii
Summary:.....	iv
Liste des figures .....	viii
Liste des tableaux.....	x
Nomenclature .....	xi
Liste des abréviations.....	xii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
Chapitre I : Généralités sur les chauffe-eaux solaires.....	2
Introduction .....	2
I.1 Le rayonnement solaire .....	2
I.2 Phénomènes physiques mis en jeu lors du chauffage .....	3
I. 2.1 La conduction thermique .....	3
I.2.2 La convection thermique.....	3
I.2.3 Le rayonnement .....	4
I.2.4 L'effet de serre.....	4
I.2.5 L'effet thermosiphon.....	5
I.3 Les composants d'un chauffe-eau solaire .....	6
I.3.1 Le capteur solaire plan vitré.....	6
I.3.1.1 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré .....	6
I.3.1.2 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan vitré .....	9

I.3.1.3	Inclinaison et orientation des capteurs solaires .....	9
I.3.2	Le Ballon de stockage .....	10
I.3.2.1	Ballon de stockage avec échangeur : système à deux fluides.....	10
I.3.2.2	Ballon de stockage sans échangeur : système à un fluide.....	11
I.3.3	Les autres composants d'un chauffe-eau solaire.....	11
I.4	Mode de fonctionnement des chauffe-eaux solaires .....	13
I.5	Types de chauffe-eaux solaires.....	13
I.5.1	Les chauffe-eaux solaires à thermosiphon (à circulation naturel).....	13
I.5.2	Les chauffe-eaux solaires à circulation forcée.....	14
I.5.3	Comparaison entre les deux types de chauffe-eau solaire .....	14
I.6	Etude des pertes .....	15
I.7	Avantages et inconvénients d'un chauffe-eau solaire .....	16
	Conclusion .....	16
	Chapitre II : Matériels et Méthodes .....	17
	Introduction .....	17
II.1	Dispositifs expérimentaux .....	17
II.1.1	Description du chauffe-eau à circulation forcée .....	17
II.1.1.1	Raccordement de la tuyauterie d'un système à circulation forcée.....	20
II.1.1.2	Remplissage du circuit primaire avec de l'eau glycolée .....	20
II.1.2	Description du système à thermosiphon monobloc .....	21
II.1.3	Les instruments de mesures utilisés.....	23
II.1.3.1	Les différentes sondes de température.....	23
II.1.3.2	Mesure du débit du fluide caloporteur et de l'eau chaude.....	23
II.1.4	Acquisitions des données.....	24
II.2	Dimensionnement des principaux composants d'un chauffe-eau solaire.....	24

II.2.1 Dimensionnement du ballon de stockage .....	25
II.2.2 Dimensionnement des capteurs solaires .....	26
II.2.3 Dimensionnement du vase d'expansion .....	28
II.3 Ombre et ensoleillement du site .....	28
Conclusion .....	28
Chapitre III : Résultats et discussions .....	29
Introduction .....	29
III.1 Chauffe-eau solaire à circulation forcée .....	29
III.2 Chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc .....	34
CONCLUSION GENEALE .....	41
BIBLIOGRAPHIE .....	42

# Liste des figures

---

## Chapitre I :

Figure (I.1) : Rayonnements solaires reçus à la surface de la terre [3].....	3
Figure (I.2) : Schéma illustrant les trois modes de transfert thermique dans un capteur plan vitré [5] .....	4
Figure (I.3) : Effet de serre sur le globe [11].....	5
Figure (I.4) : Effet de serre dans un capteur solaire [11].....	5
Figure (I.5) : Différentes technologies de capteurs solaires thermiques [5].....	6
Figure (I.6) : Différents composants d'un capteur solaire plan vitré [3].....	6
Figure (I.7) : Ballon avec échangeur [9].....	10
Figure (I.8) : Ballon sans échangeur [5] .....	11
Figure (I.9) : Chauffe-eaux solaires à thermosiphon [5] .....	14
Figure (I.10) : Chauffe-eau solaire à circulation forcée [5].....	14
Figure (I.11) : Bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré [15].....	15

## Chapitre II :

Figure (II.1) : Banc d'essai du chauffe-eau à circulation forcée.....	18
Figure (II.2) : Capteurs solaires thermiques et tuyauterie .....	18
Figure (II.3) : Méthode manuelle pour assurer l'étanchéité des tubes inox annelés.....	20
Figure (II.4) : Raccordement des tuyaux (après étanchéité) du circuit solaire. ....	20
Figure (II.5) : Remplissage du circuit primaire par de l'eau glycolée .....	21
Figure (II.6) : Chauffe-eau à thermosiphon monobloc .....	22
Figure (II.7) : (a) Sonde intégrée au ballon ; (b) Sonde intégrée au capteur ; (c) Thermo-hygromètre HRA ; (d) Solarimètre SAM20 .....	23
Figure (II.8) : Méthode simple de mesure du débit de l'eau chaude sanitaire [10]. ....	24
Figure (II.9) : (a) régulateur et (b) thermocouples .....	24

### **Chapitre III :**

Figure (III.1) : Variation des températures et de l'irradiation solaire en fonction des heures .	30
Figure (III.2) : Variation de la température de l'eau du ballon de stockage et celle ambiante en fonction des heures.....	32
Figure (III.3) : Variation de l'irradiation solaire du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. ....	33
Figure (III.4) : Variation de la température de l'eau du ballon de stockage du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. ....	34
Figure (III.5) : Variation des températures et de l'irradiation solaire en fonction des heures .	36
Figure (III.6) : Variation de la température de l'eau du ballon et celle ambiante en fonction du temps .....	38
Figure (III.7) : Variation de l'irradiation solaire du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. ....	39
Figure (III.8) : Variation de la température de l'eau du ballon de stockage du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. ....	40

# Liste des tableaux

---

## Chapitre I :

Tableau (I.1) : Matériaux de couverture transparente [6].....	7
Tableau (I.2) : Conductivité thermique des matériaux d'absorbeurs [7].....	8
Tableau (I.3) : Quelques isolants utilisés dans les capteurs thermiques [3].....	9
Tableau (I. 4) : Les autres composants d'un chauffe-eau solaire.....	11
Tableau (I.5) : Tableau comparatif de CES de deux familles [10]. ....	15

## Chapitre II :

Tableau (II.1) : Caractéristiques techniques du chauffe-eau à circulation forcée de 250 litres avec deux capteurs solaires thermiques. ....	19
Tableau (II. 2) : Caractéristiques techniques du chauffe-eau à thermosiphon monobloc direct de 300 litres avec deux capteurs solaires thermiques. ....	22
Tableau (II.3) : Demande journalière en eau chaude à 50°C [7] .....	25

# Nomenclature

Symboles	
$B_{ECS}$	Besoins journaliers en eau chaude sanitaire (L)
$C_p$	Capacité thermique de l'eau (1,16 KWh/m <sup>3</sup> .K)
$n_{cap}$	Nombre de capteur (-)
$P$	Puissance (W)
$p$	Nombre de personnes (-)
$Q_{ECS}$	Quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau du ballon (KWh)
$Q_{cap}$	Quantité d'énergie produite par le capteur (KWh/m <sup>2</sup> .jour)
$I_s$	Irradiation solaire (W/m <sup>2</sup> )
$S_{cap}$	Surface d'un capteur (m <sup>2</sup> )
$T$	Température (K)
$\Delta T$	Différence de température (K)
$V$	Volume du ballon de stockage (L)
Symboles grecs	
$\beta$	Facteur optique (%)
$\tau$	Taux de transmission du vitrage (%)
$\alpha$	Coefficient d'absorption (-)
$\varepsilon$	Coefficient d'émission (-)
$\kappa$	Coefficient de transmission thermique (W/m <sup>2</sup> . K )
$\eta$	Rendement (%)
Indice	
$b$	Ballon de stockage
$cap$	Capteur
$e$	Entrée capteurs
$ext$	Extérieur
$m$	Moyenne des capteurs
$min$	Minimum
$max$	Maximum
$s$	Sortie capteurs

## Liste des abréviations

---

Abréviations	
CES	Chauffe-Eau Solaire
CESI	Chauffe-Eau Solaire Individuel
ECS	Eau Chaude Sanitaire
EF	Eau Froide
EC	Eau Chaude
PMMA	Polyméthacrylate de méthyle
UME	Unité de Maitrise Energétique

## INTRODUCTION GENERALE

L'utilisation des énergies fossiles (polluantes) favorise le réchauffement climatique et ces dernières finiront un jour par s'épuiser. Par conséquent, l'exploitation de nouvelles énergies propres est devenue nécessaire pour subvenir aux besoins énergétiques actuels de l'humanité : les énergies renouvelables. Parmi ces énergies, l'énergie solaire est utilisée depuis longtemps pour répondre aux besoins thermiques notamment la production d'eau chaude sanitaire (ECS). Le Sénégal possède une irradiation moyenne de  $5,7 \text{ kWh/m}^2/\text{j}$  pour une durée d'ensoleillement moyenne de 3000 heures par an [1]. Malgré cette forte irradiation, le solaire thermique ne connaît pas encore un véritable essor dans le pays car la plupart de ces technologies ont été importées [1]. L'objectif visé est de mettre en valeur l'exploitation de l'énergie solaire, d'où l'intérêt d'étudier la performance des chauffe-eaux solaires afin de favoriser leurs installations. Par ailleurs, un chauffe-eau solaire est un système de chauffage destiné généralement à fournir de l'eau chaude sanitaire pour un usage domestique. C'est un système non polluant, écologique, économique et peut couvrir jusqu'à 70 % de la demande en eau chaude sanitaire grâce aux capteurs solaires.

Ce travail consiste à dimensionner et à vérifier la performance d'un kit de chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc et à circulation forcée. Cette étude se fera en prélevant les températures d'entrée et de sortie du fluide caloporteur dans les capteurs solaires, de l'eau du ballon de stockage, de l'ambiante ainsi que celle de l'irradiation solaire en fonction de la durée d'ensoleillement.

Le présent travail inclut trois chapitres :

- Le premier chapitre aborde les généralités sur les chauffe-eaux solaires : le rayonnement solaire, les phénomènes physiques mis en jeu lors du chauffage, les différents types de chauffe-eaux solaires, leurs modes de fonctionnement et leurs différents composants.
- Ensuite, le deuxième chapitre est consacré à l'étude expérimentale en utilisant différents appareils de mesures appropriés et au dimensionnement des composants.
- Pour finir, le troisième chapitre expose les résultats obtenus lors des mesures des températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des capteurs solaires, de l'ambiante, de l'irradiation solaire ainsi que celle de l'eau du ballon de stockage en fonction du temps.

# Chapitre I : Généralités sur les chauffe-eaux solaires

## Introduction

Le chauffe-eau solaire (CES) est un dispositif qui produit de l'eau chaude en utilisant comme source d'énergie les rayons du soleil. Il peut couvrir jusqu'à 70 % des besoins en énergie d'une famille pour la production d'eau chaude sanitaire (cuisine, salle de bain,...). Le matériel est fiable et a une durée de vie d'au moins 20 ans. Ce système se compose d'un capteur solaire thermique, généralement placé sur les toitures. Ces capteurs solaires absorbent l'énergie solaire pour chauffer l'eau présente dans le ballon de stockage. Son fonctionnement repose sur le principe de l'effet de serre.

Ce présent chapitre contient un bref rappel sur les modes de transfert thermique, des généralités sur les chauffe-eau-solaires, les différents types de chauffe-eau solaire et leurs principaux composants, et la dernière partie est consacrée à l'étude des pertes thermiques sur les capteurs plans vitrés.

## I.1 Le rayonnement solaire

Le soleil est l'étoile la plus proche de la Terre, dont elle est distant approximativement de 150 millions de kilomètres [2]. L'intensité de la radiation issue de la surface solaire à 6000°C est estimée entre 70 000 à 80 000 kW/m<sup>2</sup>. Une puissance de 1360 W/m<sup>2</sup> (constante solaire) est reçue par la terre en dehors de l'atmosphère. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre à la suite des phénomènes de réflexion, de diffusion multiple et d'absorption par les particules de poussières et des molécules de gaz. Une faible partie du rayonnement solaire (800 à 1 000 W/m<sup>2</sup>) parvient jusqu'à la surface de la terre sous différentes formes, le reste étant réfléchi ou absorbé par l'atmosphère [3]. Ainsi, quatre types de rayonnements ont été définis :

- **Le rayonnement solaire direct** est le rayonnement reçu directement du soleil sans avoir été dispersé par l'atmosphère.
- **Le rayonnement solaire diffus** lorsque les rayons du soleil sont dispersés dans toutes les directions par différents obstacles et particules de l'atmosphère.
- **Rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo** est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à la surface du sol.

- **Rayonnement solaire global** représente la somme de tous les rayonnements reçus (direct + diffus + réfléchi) définis précédemment. La figure (I.1) montre les différents types de rayonnement.

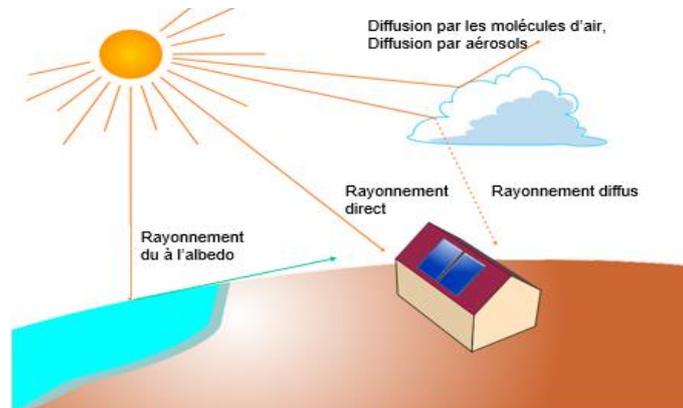


Figure (I.1) : Rayonnements solaires reçus à la surface de la terre [3]

## I.2 Phénomènes physiques mis en jeu lors du chauffage

Lors du chauffage, se produit un transfert de chaleur du milieu le plus chaud vers le milieu le plus froid. Ce transfert n'intervient que lorsque deux corps sont à des températures différentes. Cependant, il existe trois modes de transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement. En plus de ces modes de transfert thermique, il intervient d'autres types de phénomènes physiques tels que l'effet de serre et l'effet thermosiphon.

### I.2.1 La conduction thermique

C'est un mode de transfert thermique provoqué par une différence de température entre deux milieux en contact et se réalise sans déplacement global de la matière [4].

Dans le capteur solaire plan, les échanges par conduction existent principalement entre :

- les faces supérieures et inférieures de la vitre ;
- Les faces supérieures et inférieures de l'isolant.

### I.2.2 La convection thermique

La convection thermique est un transfert de chaleur entre un solide et un fluide. Elle se réalise avec déplacement de la matière. Il existe deux types de convection [4] :

- **La convection naturelle ou libre** : le mouvement du fluide est créé par des différences de densités. Ces dernières sont dues à des différences de température existant dans le fluide. Les particules chaudes de masse volumique les plus faibles montent et laissent leur place aux particules les plus froides.

- **La convection forcée** : le fluide est mis en mouvement par un élément du milieu extérieur.

Dans un capteur plan, l'échange par convection s'effectue entre :

- la vitre et le milieu extérieur par convection libre ou forcée par le vent ;
- la vitre et la plaque de l'absorbeur par convection libre ;
- le tube et le fluide par convection libre ;
- le fluide et l'isolation par convection libre ;
- L'isolation et le milieu extérieur par convection libre ou forcée par le vent.

### I.2.3 Le rayonnement

Contrairement aux autres types de transfert, le rayonnement est un mode de transfert de chaleur qui s'effectue entre deux corps séparés par le vide ou par un milieu matériel ou non matériel via des ondes électromagnétiques. À température ambiante, la matière environnante absorbe la plupart des rayonnements, qui sont, à leur tour, convertis en chaleur [4].

Dans un capteur solaire plan, le transfert par rayonnement s'effectue entre :

- la vitre et l'absorbeur ;
- la vitre et le ciel ;
- L'isolant et le sol.

La figure (I.2) montre les trois modes de transfert thermique qui peuvent exister dans un capteur plan vitré.

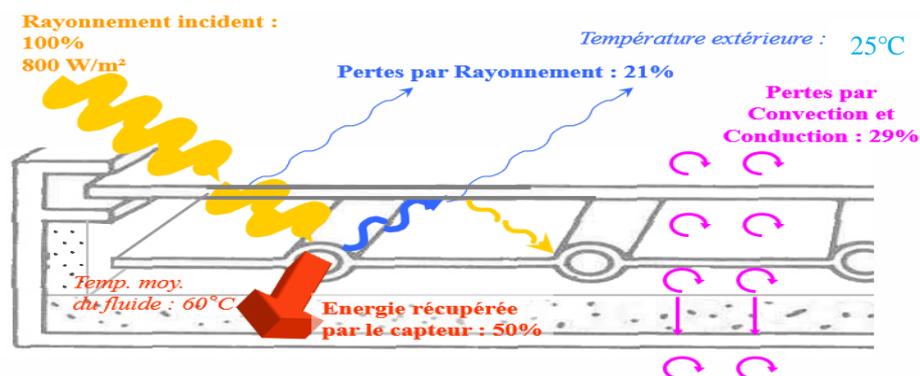


Figure (I.2) : Schéma illustrant les trois modes de transfert thermique dans un capteur plan vitré [5]

### I.2.4 L'effet de serre

L'effet de serre est un phénomène naturel de réchauffement de la Terre. Il est provoqué par la présence de gaz à effet de serre (principalement la vapeur d'eau, le dioxyde de carbone et le méthane) dans l'atmosphère. Lorsque l'énergie solaire atteint la surface de la terre, elle est en

partie réfléchi sous forme de rayonnement infrarouge vers le ciel. Une partie des rayons infrarouges réfléchis sont retenus par les gaz à effet de serre (gaz pratiquement transparent au rayonnement visible et opaque au rayonnement infrarouge) dans l'atmosphère et l'énergie est donc réémise sous forme de chaleur. Cette chaleur est alors piégée dans l'atmosphère entraînant une augmentation de la température (Figure (I.3)).



Figure (I.3) : Effet de serre sur le globe [6]

Le fonctionnement de ce phénomène est comparable à ce qui se passe dans les capteurs solaires à plan vitré, utilisé pour le chauffage d'eau sanitaire. La partie transparente du capteur laisse passer les rayons du soleil. Le verre ralentit la sortie de la chaleur en l'emprisonnant comme l'illustre la figure (I.4).

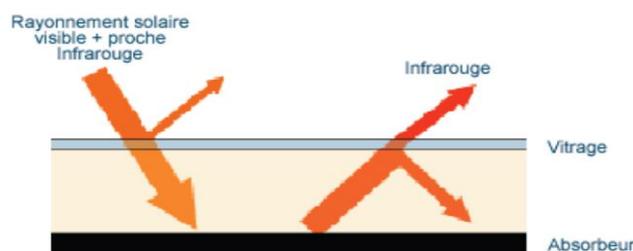


Figure (I.4) : Effet de serre dans un capteur solaire [6]

### I.2.5 L'effet thermosiphon

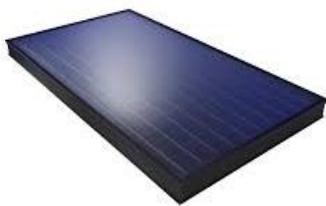
C'est la circulation naturelle d'un fluide dans une installation solaire thermique du fait de la variation de sa masse volumique en fonction de la température. Plus précisément, lorsque la température du fluide augmente, sa masse volumique diminue. Par exemple, dans le cadre des chauffe-eaux solaires à thermosiphon, le liquide caloporteur réchauffé dans le capteur devient plus léger et monte naturellement vers le ballon de stockage placé au-dessus. Puis, le fluide froid au bas du ballon entre à son tour dans le capteur pour être réchauffé. Ce phénomène se répète tant qu'il y a ensoleillement.

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

Le CES est principalement composé de deux éléments : capteurs solaires et ballon de stockage. Les autres composants sont : les tuyaux, un vase d'expansion, les robinets de vidange, des clapets anti-retour, une pompe (selon le model), un régulateur, les purgeurs...

#### I.3.1 Le capteur solaire plan vitré

Il existe plusieurs types de capteurs solaires (figure (I.5)) parmi lesquels : le capteur plan vitré, le capteur plan non vitré et le capteur à tube sous vide. Notre étude porte sur les capteurs plans vitrés.



(a) Capteur solaire plan vitré



(b) Capteur solaire non vitré à proximité d'une piscine.



(c) Capteur à tube sous vide

Figure (I.5) : Différentes technologies de capteurs solaires thermiques [5]

##### I.3.1.1 Les principaux éléments constituant un capteur plan vitré

Un capteur plan vitré est composé essentiellement d'un coffre, d'une isolation, d'un absorbeur et d'une couverture transparente (figure (I.6)). C'est le type de capteur le plus utilisé dans la production d'ECS. Bien que moins performants que certains de leurs homologues "tubes sous vide", ils sont moins chers et présentent généralement une garantie plus longue (10 ans environ).

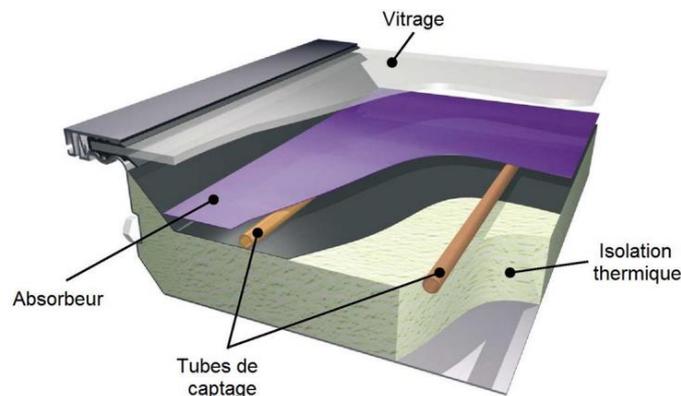


Figure (I.6) : Différents composants d'un capteur solaire plan vitré [3]

**La couverture transparente (le vitrage) :** C'est une surface faite d'un matériau transparent au rayonnement visible mais opaque au rayonnement infrarouge, permettant ainsi de réaliser un effet de serre. Il permet aussi de protéger l'intérieur du capteur contre les effets de l'environnement. Par contre, il y aura toujours une partie du rayonnement solaire qui sera réfléchi à la surface du vitrage. Pour vaincre cette réflectivité naturelle, il est important de tenir compte de la qualité de la surface du verre et de l'angle d'incidence de la lumière.

Plus l'angle sous lequel la lumière atteint le vitrage (par rapport à la normale au vitrage) est important, plus la quantité de lumière réfléchi sera importante. Un vitrage efficace doit posséder les propriétés suivantes :

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

Le tableau (I.1) illustre les différents matériaux de couverture transparente.

Tableau (I.1) : Matériaux de couverture transparente [7]

Couverture	Epaisseur (mm)	Poids d'un m <sup>2</sup> (kg)	Coefficient de transmission
Verre avec couche antireflet	3,2	8	0,95**
Verre trempé, sans fer	3,2	8	0,91
Verre trempé standard	4	10	0,84
Verre standard *	4	10	0,84
Polyméthacrylate de méthyle (PMMA), plaque ondulée	16	5,0	0,77
PMMA, double plaque ondulée	16	5,6	0,72

\* Danger de casse à haute température et \*\* Surcoût faible et digne d'intérêt.

**L'absorbeur :** L'absorbeur est l'élément central du capteur solaire thermique. Il est constitué d'une plaque à laquelle sont intégrés des tubes à travers lesquels circule le fluide caloporteur. La surface absorbante absorbe le maximum de rayonnement solaire et transmet la chaleur produite à un fluide caloporteur avec un minimum de pertes. Dans la plupart du temps, les absorbeurs sont recouverts par un traitement de surface pour être fortement absorbant. Les coefficients d'émission ( $\epsilon$ ) et d'absorption ( $\alpha$ ) sont les deux paramètres déterminant les caractéristiques d'un absorbeur. Ces coefficients varient selon le type de revêtement [8] :

- Couche sélective :  $0 \leq \varepsilon < 0,2$  ;  $\alpha > 0,9$
- Couche semi-sélective :  $0,2 \leq \varepsilon < 0,5$  ;  $\alpha > 0,9$
- Couche non sélective :  $0,5 \leq \varepsilon < 1,0$  ;  $\alpha > 0,9$

Les matériaux les plus utilisés sont le cuivre, l'aluminium et l'acier en raison de leur bonne conductivité thermique, leur bonne tenue mécanique et de leur résistance à la corrosion (voir tableau (I.2)).

Tableau (I.2) : Conductivité thermique des matériaux d'absorbeurs [8]

Matériau d'absorbeur	Conductivité (W/m.K)
Acier	50
Aluminium	210
Cuivre	380

**Le fluide caloporteur :** Le fluide caloporteur est utilisé dans le circuit reliant le ballon aux capteurs. Il évacue la chaleur stockée par la plaque absorbante vers le ballon de stockage. On utilise généralement comme fluide de l'eau glycolée, même s'il n'est pas rare de trouver des systèmes fonctionnant à l'eau pure. L'eau glycolée est une eau de réseau à laquelle on a ajouté un pourcentage de glycol afin que cette eau ne puisse pas geler rapidement, même si elle est stagnante.

**Les isolants thermiques :** Les isolants thermiques jouent un rôle très important dans les applications thermiques de l'énergie solaire. Non seulement ils évitent les déperditions thermiques des parties latérales et celle arrière du capteur par conduction, mais aussi participent à la tenue mécanique du capteur. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent assurer l'isolation des capteurs, mais il faut veiller à la tenue de la température, car une coupure de circulation du fluide caloporteur peut faire monter la température intérieure du capteur à plus de 150 °C. Les isolants thermiques sont caractérisés par leur coefficient de conductivité ; plus il est faible, meilleur est l'isolant. Le tableau (I.3) montre les matériaux souvent utilisés.

Tableau (I.3) : Quelques isolants utilisés dans les capteurs thermiques [3]

Matériau isolant	Température max admissible (°C)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Conductivité (W/m.K) à 20°C
Laine de roche	> 200	60-200	0,040
Laine de verre	> 200	30-100	0,040
Laine de verre HD	> 200	130-150	0,048
Mousse polyuréthane	< 130	30-80	0,030
Polystyrène	< 80	30-50	0,034

**Le cadre ou coffre :** Le coffre enferme l'absorbeur et l'isolation thermique du capteur, les protégeant ainsi contre l'humidité et les détériorations mécaniques. Les matériaux couramment utilisés sont le bois et le métal (tôle d'acier ou d'aluminium) en raison de leur bonne résistance à la corrosion.

### I.3.1.2 Principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan vitré

Une partie du rayonnement solaire qui arrive sur la vitre la traverse pour atteindre la plaque absorbante. Cette dernière s'échauffe et transfère sa chaleur au fluide caloporteur qui circule dans les tubes. Plus le fluide met du temps à traverser le capteur, plus il absorbe l'énergie solaire. Un capteur plan efficace peut chauffer le fluide jusqu'à 90°C, presque le point d'ébullition de l'eau [9]. Comme tout corps qui s'échauffe, l'absorbeur émet un rayonnement (essentiellement dans l'infrarouge) qui est réfléchi par la vitre, c'est le principe de « l'effet de serre ». En effet, la grande partie de l'énergie absorbée doit être transmise au fluide, il faut donc minimiser les pertes avec l'environnement, d'où le rôle de l'isolant.

### I.3.1.3 Inclinaison et orientation des capteurs solaires

Pour optimiser la production d'énergie d'une installation solaire, il est très important de tenir compte de l'inclinaison et de l'orientation des capteurs solaires.

- **L'inclinaison des capteurs** permet d'optimiser l'irradiation du rayonnement global reçu par les capteurs pour avoir un meilleur rendement. Une inclinaison égale à la latitude du lieu par rapport à l'horizontale serait plus rentable.
- **L'orientation des capteurs** permet de capter au mieux les rayons du soleil et produire un maximum d'énergie. En générale, les capteurs doivent être orientés vers l'équateur. C'est-à-dire, orienter vers le Nord dans l'hémisphère Sud et vers le Sud dans l'hémisphère Nord [8].

L'orientation Sud et une inclinaison comprise entre  $12^{\circ}5$  et  $16^{\circ}5$  environ par rapport à l'horizontale assurent les meilleurs rendements pour une installation solaire à nos latitudes (Sénégal).

### I.3.2 Le Ballon de stockage

Le ballon de stockage est une cuve métallique bien isolée qui constitue la réserve d'eau chaude sanitaire. L'eau chaude (EC), ayant une densité plus faible que l'eau froide (EF), a tendance à occuper l'espace supérieur du ballon lors de l'échauffement du réservoir. Lors du puisage, la quantité d'eau chaude puisée sera remplacée dans le réservoir par de l'eau froide de la conduite.

Un bon réservoir doit avoir les critères suivants :

- résister à la pression du liquide qui ne dépasse pas souvent les 2 bars ;
- être en mesure de répondre aux besoins quotidiens de la famille en termes de quantité mais aussi en termes de température d'utilisation ;
- avoir une bonne qualité d'isolation, c'est-à-dire de conductivité thermique inférieure à  $0,065 \text{ W/m.K}$  pour minimiser les pertes ;
- Eviter dans la mesure du possible les légionelloses : c'est des germes bactériens qui ont tendance à proliférer dans les eaux stagnantes de température comprise entre  $25^{\circ}\text{C}$  et  $45^{\circ}\text{C}$ , et sont détruits à des températures supérieures à  $60^{\circ}\text{C}$ .

Il existe deux grandes classes de technologie de ballon de stockage : ballon de stockage avec échangeur et Ballon de stockage sans échangeur.

#### I.3.2.1 Ballon de stockage avec échangeur : système à deux fluides

Le fluide caloporteur (fluide 1) est chargé de transporter la chaleur depuis les capteurs vers le ballon de stockage en passant par l'échangeur situé dans la partie basse du réservoir. Cet échangeur (en serpentin) permet au liquide caloporteur de fournir ses calories à l'eau (fluide 2) du ballon de stockage sans contact. Une fois réchauffée, l'eau chaude remonte et se stocke dans la partie haute du ballon où elle sera prête à être utilisée (figure (I.7)).

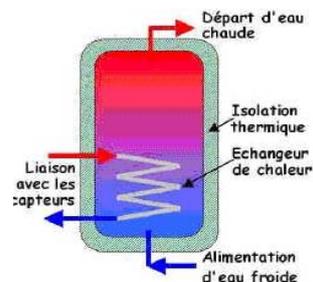


Figure (I.7) : Ballon avec échangeur [10]

### I.3.2.2 Ballon de stockage sans échangeur : système à un fluide

L'eau chauffée dans les capteurs va directement se stocker dans la partie haute du ballon et cède sa place à l'eau froide située dans la partie basse de celui-ci. L'inconvénient réside dans le fait que le liquide qui circule dans les capteurs est continuellement renouvelé, favorisant ainsi l'entartrage de l'absorbeur (figure (I.8)).

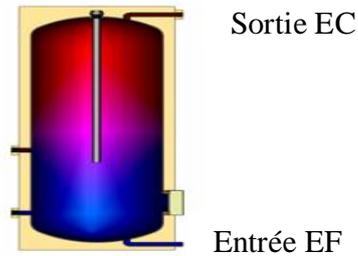


Figure (I.8) : Ballon sans échangeur [5]

### I.3.3 Les autres composants d'un chauffe-eau solaire

Les autres composants d'un CES permettent de transporter le fluide depuis le capteur vers le lieu de stockage ou d'utilisation. Parmi ces composants, nous distinguons :

Tableau (I. 4) : Les autres composants d'un chauffe-eau solaire

Textes	Matériels	Référence
<b>Les tuyaux</b> sont destinés à la distribution de l'eau, qu'elle soit froide ou chaude. Cependant, les tuyaux utilisés doivent être capables de : supporter des températures supérieures à 100°C ; résister à la pression, à la corrosion atmosphérique et aqueuse.		[11]
<b>Le circulateur ou la pompe</b> permet le déplacement du liquide caloporteur entre les capteurs solaires et l'échangeur du ballon de stockage.		[3]
<b>Le régulateur solaire</b> régule le processus d'échange de chaleur entre le capteur et le ballon de stockage.		[12]
<b>La sonde de température</b> permet de prendre les valeurs des températures d'un fluide en des points ciblés.		[13]

<p><b>La soupape de sécurité</b> est chargée d'évacuer d'éventuelles surpressions pour protéger les composants du circuit en cas de dilation du fluide caloporteur.</p>		<p>[13]</p>
<p><b>Le vase d'expansion</b> permet de maintenir la pression du circuit primaire constante quelle que soit la température du fluide dans ce circuit.</p>		<p>[14]</p>
<p><b>Le débitmètre</b> permet de régler la vitesse de la pompe pour assurer un débit adéquat dans les capteurs solaires. Il permet aussi un contrôle du débit de l'installation en fonctionnement.</p>		<p>[8]</p>
<p><b>Le manomètre</b> indique, en bars, la pression dans le circuit primaire, qui ne doit pas dépasser souvent les 2 bars.</p>		<p>[3]</p>
<p><b>La vanne d'arrêt</b> permet d'isoler une partie du système en cas de maintenance.</p>		<p>[3]</p>
<p><b>Le clapet anti-retour</b> empêche tout retour de l'eau chaude dans le circuit d'alimentation en eau froide lorsque la pompe est arrêtée.</p>		<p>[3]</p>
<p><b>Le thermomètre</b> mesure et affiche les températures de la partie froide et de la partie chaude de l'installation.</p>		<p>[3]</p>
<p><b>Le purgeur</b> permet d'évacuer l'excès de gaz dans le circuit. Il est soit automatique, soit manuel.</p>		<p>[8]</p>
<p><b>Le mitigeur thermostatique</b> mélange l'eau froide du réseau et l'eau chaude du ballon en fonction du besoin du consommateur.</p>		<p>[8]</p>

## I.4 Mode de fonctionnement des chauffe-eaux solaires

Le mode de fonctionnement d'un CES est défini comme suit :

- les capteurs solaires absorbent l'énergie solaire et la transforment en chaleur ;
- ils transmettent cette chaleur au tube du circuit hydraulique rempli d'eau ou de liquide caloporteur ;
- le liquide est chauffé, puis véhiculé à l'aide d'une pompe ou naturellement selon le modèle jusqu'au ballon de stockage ;
- le liquide chaud entre ensuite dans l'échangeur thermique du circuit solaire qui serpente à l'intérieur du ballon, et transmet ses calories à l'eau contenue dans le réservoir ;
- Une fois refroidi, le liquide caloporteur repart vers les capteurs, pour se réchauffer à nouveau. Lorsque de l'eau chaude est puisée dans le réservoir, elle est immédiatement remplacée par la même quantité d'eau froide du réseau d'eau du logement.

## I.5 Types de chauffe-eaux solaires

Selon la nature de circulation du fluide, deux familles de systèmes de CES ont été distinguées.

### I.5.1 Les chauffe-eaux solaires à thermosiphon (à circulation naturel)

Pour ces installations, le capteur et le ballon de stockage sont placés à l'extérieur. Sous l'effet d'un rayonnement solaire, l'eau contenue dans le capteur s'échauffe et sa densité diminue. Selon le principe de gravitation, elle s'élève naturellement dans le circuit et elle est remplacée par de l'eau plus froide (plus lourde) en provenance du ballon : c'est le principe du thermosiphon. Pour que le fluide circule naturellement depuis les capteurs vers le ballon de stockage, il faut que le ballon soit obligatoirement placé plus haut que les capteurs.

Ces types de CES ne comportent pas de pompe, pas de régulateur, ni de raccordement à un réseau électrique et les risques de panne et de dysfonctionnement sont très réduits. Ainsi, deux sous familles ont été distinguées comme le montre la figure (I.22) :

- Le CES à **thermosiphon monobloc** : les capteurs solaires et le ballon de stockage sont reliés sur un même châssis rigide.
- Le CES à **thermosiphon élément séparé** : les capteurs solaires et le ballon de stockage sont séparés.

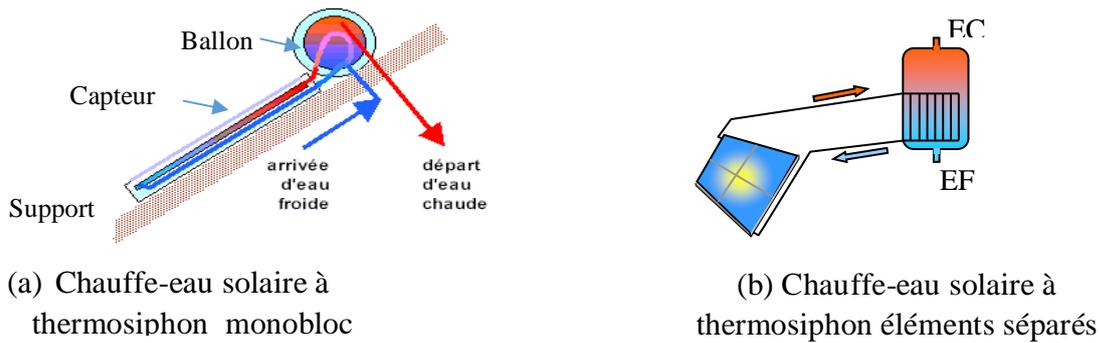


Figure (I.9) : Chauffe-eaux solaires à thermosiphon [5]

### I.5.2 Les chauffe-eaux solaires à circulation forcée

Cette catégorie regroupe les chauffe-eaux qui font appel à un circulateur pour transférer le fluide chauffé dans le collecteur depuis le capteur solaire vers le ballon de stockage. Il faut noter que le liquide qui circule dans les capteurs est un antigel impropre à la consommation et ne doit être en aucun cas mélangé à l'eau du ballon. Les températures de l'eau du ballon ( $T_b$ ) et celle du capteur ( $T_c$ ) sont prises en compte par un régulateur qui commande la pompe de circulation du fluide caloporteur. En absence d'ensoleillement, le ballon est connecté au réseau électrique via un appoint. L'appoint peut être une résistance électrique ou bien un échangeur alimenté par une chaudière. La mise en service et l'arrêt de la pompe sont assurés par un régulateur qui mesure constamment les températures de l'eau du ballon et celles du fluide dans les capteurs.

Contrairement au chauffe-eau fonctionnant par thermosiphon, la disposition relative du ballon par rapport au capteur est totalement libre. Il est plus complexe, mais offre la plus grande souplesse d'installation et facilite une intégration harmonieuse au bâtiment (Figure (I.23)).

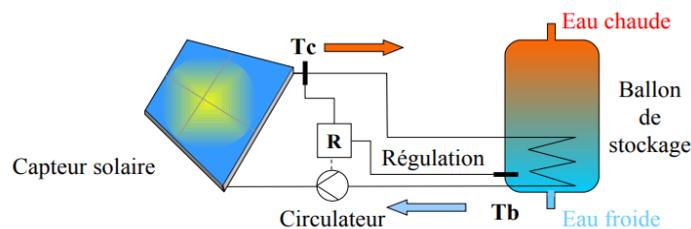


Figure (I.10) : Chauffe-eau solaire à circulation forcée [5]

### I.5.3 Comparaison entre les deux types de chauffe-eau solaire

Le tableau (I.4) résume la différence qui existe entre les deux familles de CES développés dans les paragraphes qui précèdent.

Tableau (I.5) : Tableau comparatif de CES de deux familles [11].

Eléments	CES à thermosiphon	CES à circulation forcée
Installation du CES	Plus simple (pas de circulateur, ni de régulateur), mais l'intégration architecturale est plus difficile	Plus difficile : nécessite plus de main d'œuvre
Durée de vie	Dure 20 ans en moyenne	Dure 20 ans en moyenne
Flexibilité d'installation	Moins flexible à cause de la position du ballon.	Plus flexible, car le ballon peut se positionner en dessous du capteur.
Utilisation	Souvent à titre individuel (CESI)	Employé généralement pour les utilisateurs collectifs ou industriel et peut être doté de plusieurs capteurs.
Maintenance	Plus facile	Moins facile à cause de panne des éléments fragiles (régulateur et pompe).
Performance	Plus de pertes thermiques en faible ensoleillement	Moins de pertes thermiques dans les zones à faible ensoleillement.

### I.6 Etude des pertes

Malheureusement, toute l'irradiation solaire reçue sur le capteur n'est pas utilisable. Une partie du rayonnement solaire est réfléchi par la vitre du capteur, une autre partie par l'absorbeur. En s'échauffant, la vitre du capteur et l'absorbeur émettent également un rayonnement infrarouge dont une partie est perdue. En outre, les pertes thermiques par conduction, par convection et par rayonnement s'ajoutent aux pertes optiques (figure (I.24)).

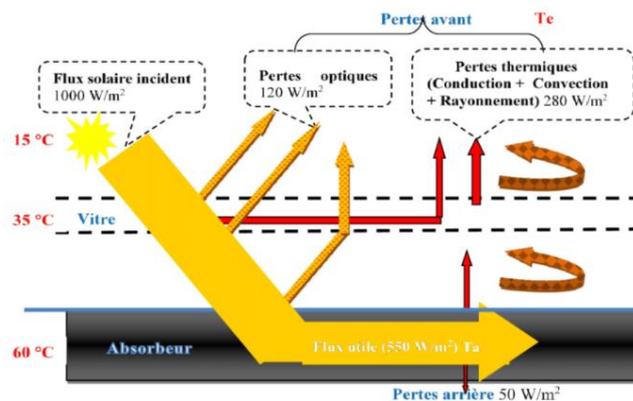


Figure (I.11) : Bilan énergétique d'un capteur solaire plan vitré [15]

## **I.7 Avantages et inconvénients d'un chauffe-eau solaire**

Les avantages d'un chauffe-eau solaire sont nombreux, en voici les principaux :

- il est écologique, ne consomme presque aucune énergie fossile et ne dégage aucun gaz à effet de serre ;
- il utilise une énergie disponible, illimitée, renouvelable et gratuite : le soleil ;
- Il a une longue durée de vie : une vingtaine d'année environ, ce qui en fait un investissement fiable et durable.

Les inconvénients sont entre autres :

- la nécessité d'un système d'appoint pour couvrir les besoins en ECS à l'absence d'ensoleillement ou lorsque l'ensoleillement est faible ;
- Un coût assez élevé : le CES est le système au coût le plus élevé, comparé aux autres (électrique, à gaz,...). Cependant, il y'a un retour d'investissement après quelques années.

### **Conclusion**

Les chauffe-eaux solaires sont composés essentiellement d'un capteur solaire et d'un ballon de stockage. Ils sont souvent destinés pour la production de l'eau chaude sanitaire. Selon la capacité d'utilisation, nous trouvons les chauffe eau solaires à circulation naturelle (thermosiphons) destinés à une utilisation individuelle et les chauffe eau solaires à circulation forcée pour une utilisation collective ou industrielle. Leurs performances dépendent essentiellement de la capacité de captation de l'énergie solaire par le capteur et de la transmettre au fluide caloporteur. Pour cela, une étude sur les performances de ces systèmes ainsi sur les paramètres influençant leurs rendements est primordiale pour une meilleure utilisation.

# Chapitre II : Matériels et Méthodes

## Introduction

Les études expérimentales ont été réalisées au Centre Sectoriel de Formation Professionnelle aux métiers du Bâtiment et des Travaux Publics (CSFP-BTP) de Diamniadio. C'est un établissement d'enseignement technique et professionnel, situé à km 41 Diamniadio sur la route de Mbour.

Ce chapitre est consacré à la réalisation de tests de deux types de CES (à thermosiphon monobloc et à circulation forcée) en utilisant différents appareils de mesures appropriés. Afin d'étudier la performance de nos systèmes solaires, les paramètres suivants ont été mesurés :

- la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des capteurs ;
- la température de l'eau du ballon de stockage ;
- la température ambiante et l'irradiation solaire ;
- Le débit volumique du fluide circulant dans le circuit primaire (CES à circulation forcée), ainsi que celui de l'eau chaude à la sortie du ballon de stockage.

## II.1 Dispositifs expérimentaux

### II.1.1 Description du chauffe-eau à circulation forcée

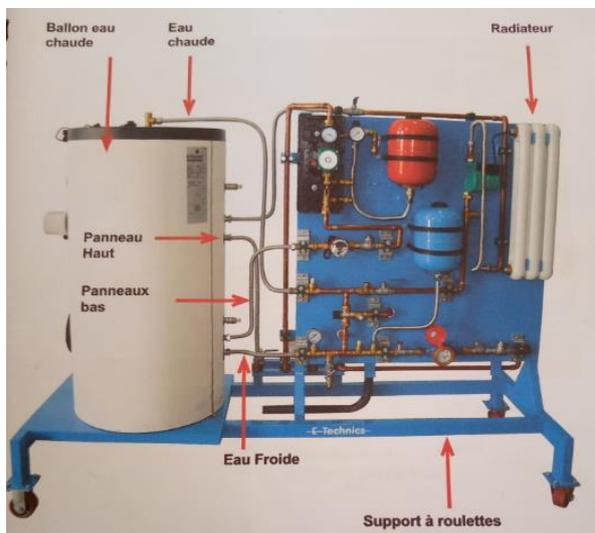
Des relevés de mesure ont été faits sur un kit de système à circulation forcée (tableau (II.1)) réparti comme suit :

- la station hydraulique et un ballon de stockage de 250 litres (isolé avec de la mousse polyuréthane d'épaisseur 75 mm) ont été fixés sur un même support à roulettes pour faciliter leur déplacement. En plus, une résistance électrique de 3 kW est placée au milieu du ballon pour pallier les périodes de faible ensoleillement. Une anode assure la protection du ballon contre la corrosion. La figure (II.1) ci-dessous montre les différents éléments qui le constituent ;
- sur deux autres supports à roulettes sont fixés séparément deux capteurs (absorbeur en serpentin) ayant une surface de 2 m<sup>2</sup> chacun. Ces supports sont inclinés d'un angle égal à la latitude du lieu (Diamniadio : 15°) et orientés en pleine Sud, pour un rendement meilleur (voir figure (II.2)). En plus, sur chaque capteur sont intégrés une sonde de température, un purgeur et sur l'un d'entre eux est fixé un solarimètre. Ces capteurs sont branchés en série lors de la mise en service du système ;

- Des tuyaux en inox annelés de diamètre intérieur 15 mm, extérieur 18 mm et d'une épaisseur de 4 mm sont utilisés pour relier les capteurs au ballon de stockage afin d'assurer le passage du fluide caloporteur (eau glycolée).

Le fonctionnement du système à circulation forcée (système à deux fluides) nécessite deux types de circuit :

- **le circuit solaire ou circuit primaire** : C'est le circuit contenant le liquide caloporteur, il assure le transfert de l'énergie thermique depuis les capteurs vers le ballon de stockage via un échangeur intégré dans le réservoir ;
- **Le circuit secondaire** : C'est le circuit qui transporte l'eau chaude sanitaire aux points de puisage.



(a) Vue avant du banc d'essai



(b) vue arrière du banc d'essai

Figure (II.1) : Banc d'essai du chauffe-eau à circulation forcée



(c) Les capteurs solaires thermiques



(d) Tuyaux en inox annelés

Figure (II.2) : Capteurs solaires thermiques et tuyauterie

Tableau (II.1) : Caractéristiques techniques du chauffe-eau à circulation forcée de 250 litres avec deux capteurs solaires thermiques.

<b>Caractéristiques techniques des deux capteurs</b>	
Surface brute pour chaque capteur	2 m <sup>2</sup>
Couverture transparente	Verre trempé de 3,2 mm d'épaisseur
	Transmission 90 %
Absorbeur	Hautement sélective
	Absorption/émission : 95% / 5%
Fluide caloporteur	Mélange propylène glycol/eau (-10 °C; 30 %)
Isolation	Laine minérale 40 mm
Cadre capteur	Aluminium résistant à l'humidité
Coefficient de transmission thermique	3,92 W/m <sup>2</sup> .K
Pression max de service	10 bars
Angle d'inclinaison sur terrasse	15°
<b>Caractéristiques du ballon de stockage</b>	
Contenance	196 L
Pression maximale ECS	10 bars
Echangeur	8,6 L ; 1,5 m <sup>2</sup> ; 6 bars
Température maximale de fonctionnement	95 °C
Pertes thermique	51 W
Ballon à vide	90 kg
Isolation thermique	Mousse polyuréthane de 75 mm
Résistance d'appoint électrique thermoplongeur	3 KW en acier inoxydable
Protection anti corrosion	Anode magnésium
<b>Raccordement hydraulique ballon de stockage – capteurs solaires</b>	
Nature	Tubes en cuivre, en PVC, en inox annelé.
Isolation	Mousse en caoutchouc ISOFLEX tubes
<b>Prix du chauffe-eau solaire</b>	<b>1 557 900 Franc CFA</b>
<b>Prix de l'installation et de la maintenance</b>	<b>656 000 Franc CFA</b>
<b>Prix de revient du chauffe-eau solaire</b>	<b>2 213 900 Franc CFA</b>

### II.1.1.1 Raccordement de la tuyauterie d'un système à circulation forcée

Au cours de nos travaux pratiques, des tuyaux en inox annelés ont été utilisés pour faire le raccordement du circuit solaire. Pour assurer une bonne étanchéité du circuit, des joints, du téflon ou de la filasse ont été utilisés aux différents points de raccordement, comme le montre les figures (II.3) et (II.4).



Ruban de téflon



Joint de serrage



filasse



Pâte d'étanchéité

Figure (II.3) : Méthode manuelle pour assurer l'étanchéité des tubes inox annelés



Figure (II.4) : Raccordement des tuyaux (après étanchéité) du circuit solaire.

### II.1.1.2 Remplissage du circuit primaire avec de l'eau glycolée

- **avant le remplissage** : d'abord, la pompe d'aspiration (électrique) est raccordée au circuit solaire. Ensuite, la tuyauterie d'aspiration de la pompe est positionnée au fond du récipient contenant le fluide caloporteur. Puis, un tuyau de refoulement est branché dans le tuyau de retour du circuit solaire et est placé dans le récipient contenant le fluide caloporteur. Enfin, les vannes qui relient les capteurs à l'échangeur du ballon restent ouvertes ;
- **pendant le remplissage** : les deux vannes de remplissage sont ouvertes (vannes d'aspiration et de refoulement). La vanne située au-dessus du débitmètre est fermée et

la pompe d'aspiration est mise en service. Le niveau du fluide caloporteur dans le récipient baisse tant que le circuit solaire n'est pas plein. Ensuite, une pression de 2 bars est maintenue ;

- **Après remplissage** : lorsqu'on constate que le niveau du fluide caloporteur dans le récipient se stabilise, cela indique que le réseau est rempli. Il est conseillé de maintenir cette circulation pendant 2 à 3 minutes afin de s'assurer de toute absence d'air dans le circuit solaire. Ensuite, les vannes de remplissage sont fermées en maintenant toujours la pression à 2 bars. La pompe est débranchée et la vanne située au-dessus du débitmètre est ouverte. Enfin, l'étanchéité du circuit solaire est vérifiée à nouveau et le régulateur est mis en service (figure (II.5)).

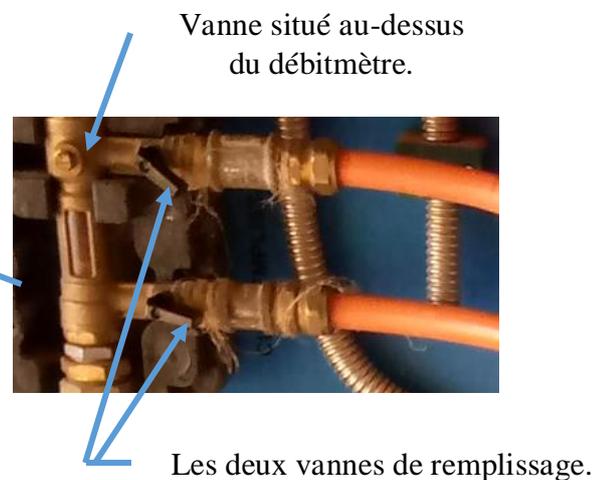


Figure (II.5) : Remplissage du circuit primaire par de l'eau glycolée

### II.1.2 Description du système à thermosiphon monobloc

Notre étude a aussi été faite sur un kit de chauffe-eau à thermosiphon monobloc sans échangeur dans le ballon de stockage. Le système fonctionne avec un seul fluide : l'eau de la SEN'EAU. Deux capteurs et un ballon de 300 litres sont fixés sur un même châssis installé à la terrasse. Le châssis est incliné d'un angle de  $15^\circ$  (latitude à Diamniadio) par rapport à l'horizontale et est orienté vers le Sud. Les capteurs (avec des tubes en harpe) sont branchés en parallèle avec une surface de  $2 \text{ m}^2$  chacun (figure (II.6)).

Le système ne nécessite pas de pompe de circulation puisqu'il utilise la différence de densité du fluide en fonction de la température comme moteur. L'eau chauffée dans les capteurs par rayonnement monte naturellement vers la partie haute du ballon et est remplacée par de l'eau froide du bas du ballon.



(a) Vue d'avant du système thermosiphon



(b) Vue arrière du système thermosiphon

Figure (II.6) : Chauffe-eau à thermosiphon monobloc

Le tableau (II.2) résume les caractéristiques techniques du kit de chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc utilisé lors de nos études expérimentales.

Tableau (II. 2) : Caractéristiques techniques du chauffe-eau à thermosiphon monobloc direct de 300 litres avec deux capteurs solaires thermiques.

<b>Caractéristiques techniques des deux capteurs</b>	
Surface brute pour chaque capteur	$2 \text{ m}^2$
Couverture transparente	Verre trempé de 3,2 mm d'épaisseur
	Transmission 90 %
Absorbeur	Surface d'absorption $1,85 \text{ m}^2$
	Hautement sélective
	Absorption/émission : 95% / 5%
Diamètre des tubes en harpe	18 mm
Fluide caloporteur	Eau naturel : 0 °C ; 4.18 kJ/kg. K
Isolation	Laine minérale 30 mm
Cadre capteur	Aluminium résistant à l'humidité
Coefficient de transmission thermique	$3,92 \text{ W/m}^2. \text{K}$
Rendement	76.2 %
Pression max de service	10 bars
Angle d'inclinaison	15°

<b>Caractéristiques du ballon de stockage</b>	
Contenance	250 L
Isolation thermique	Mousse polyuréthane de 40 mm
Pression ECS	3 bars
Matériaux de la cuve	Acier émaillé
<b>Raccordement hydraulique ballon de stockage – capteurs solaires</b>	
Nature	Tubes en cuivre
Isolation	Mousse en caoutchouc ISOFLEX tubes
<b>Prix du chauffe-eau solaire</b>	<b>1 298 150 Franc CFA</b>
<b>Prix de l'installation et de la maintenance</b>	<b>590 400 Franc CFA</b>
<b>Prix de revient du chauffe-eau solaire</b>	<b>1 888 550 Franc CFA</b>

### II.1.3 Les instruments de mesures utilisés

#### II.1.3.1 Les différentes sondes de température

Les mesures des températures du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs ainsi que celles de l'eau du ballon de stockage sont assurées par des sondes de température (figure (II.7)):

- une sonde est intégrée dans la partie haute du ballon de stockage ;
- une autre sonde est intégrée à l'entrée et à la sortie des capteurs solaires ;
- la mesure de la température ambiante est assurée par un thermo-hygromètre HRA ;
- La mesure de l'irradiation solaire est garantie par un solarimètre SAM20.



Figure (II.7) : (a) Sonde intégrée au ballon ; (b) Sonde intégrée au capteur ; (c) Thermo-hygromètre HRA ; (d) Solarimètre SAM20

#### II.1.3.2 Mesure du débit du fluide caloporteur et de l'eau chaude

La mesure du débit du fluide caloporteur (eau glycolée) dans le circuit primaire est assurée par un débitmètre à flotteur. Le réglage du débit est assuré par une pompe à débit réglable sur trois

positions. Le débit varie selon la vitesse du circulateur. Dans notre cas, la pompe était à la position 3 avec un débit égal à 4 litres par minute.

En outre, le débit de l'eau chaude à la sortie du ballon de stockage est déterminé par une méthode simple, qui consiste à chronométrer le temps nécessaire pour remplir un sceau (figure (II.8)). Il est de 1,5 litre par minute pour le système forcé et de 30 litres par minute pour le système à thermosiphon monobloc.

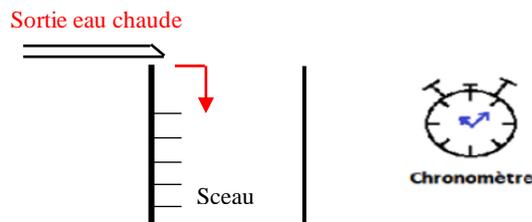


Figure (II.8) : Méthode simple de mesure du débit de l'eau chaude sanitaire [11].

#### II.1.4 Acquisitions des données

Un régulateur fixé sur l'arrière du banc d'essai du système à circulation forcée ( figure (a)) et des thermomètres accrochés sur la partie arrière du chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc (figure (b)) sont utilisés pour l'acquisition des données. Ils permettent la lecture des températures du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs, ainsi que celles de l'eau du ballon de stockage.



(a)



(b)

Figure (II.9) : (a) régulateur et (b) thermocouples

#### II.2 Dimensionnement des principaux composants d'un chauffe-eau solaire

Il convient de dimensionner un CES avec précision pour optimiser la performance de l'installation, assurer son bon fonctionnement et réduire tout risque d'usure prématurée en cas de surchauffe estivale. Pour ce faire, il est primordial d'estimer correctement les besoins en eau chaude sanitaire (ECS). À cela s'ajoutent d'autres facteurs tels que l'orientation et l'inclinaison des capteurs, la situation géographique, qui jouent aussi un rôle important.

Un bon dimensionnement conduit à produire un rendement compris entre 50 et 80% environ des besoins en ECS, entraînant une économie financière, et évitant le rejet de gaz à effet de serre dans l'atmosphère. On peut choisir un kit complet dont les composants sont parfaitement adaptés les uns aux autres au climat de la région et adéquatement dimensionnés à la consommation d'ECS prévue. On peut aussi choisir soi-même les composants de l'installation.

### II.2.1 Dimensionnement du ballon de stockage

Il est déterminé en fonction de la consommation journalière en ECS.

La consommation quotidienne d'eau chaude est liée à l'équipement de l'appartement, au comportement des occupants et à leur nombre. Le tableau (II.2) illustre une demande en eau chaude sanitaire pour différents utilisateurs, à une température de 50°C:

Tableau (II.3) : Demande journalière en eau chaude à 50°C [8]

		Faible besoin (litres)	Besoin moyen (litres)	Besoin élevé (litres)
Habitat	Par personne et par jour	30	50	70
Equipements sportifs	Par douche	20	30	50
Hébergement	Par nuitée	20	40	60

- Volume du ballon de stockage [8]

Lorsque le besoin journalier est déterminé, le volume de stockage peut être défini. Il doit être entre 0,8 et 1,2 fois le volume du besoin journalier des régions à fort ensoleillement et entre 2 et 2,5 fois le besoin journalier pour les régions à plus faible ensoleillement. De cette façon, les pics de consommation peuvent être couverts et les jours nuageux compensés.

Le Sénégal étant dans une zone à fort ensoleillement, le dimensionnement du ballon se fera comme suit :

$$\begin{cases} V_{\min} = \text{ECS} \times P \times 0,8 \\ V_{\max} = \text{ECS} \times P \times 1,2 \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

$V_{\min}$  : Volume minimum du ballon (L) ;

$V_{\max}$  : Volume maximal du ballon (L).

ECS : Consommation d'Eau Chaude Sanitaire par personne (L) ;

P : Nombre de personne dans l'habitat.

NB : Comme les fabricants ne proposent pas des ballons de toutes les tailles, il est important de choisir un volume disponible sur le marché.

- Quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau du ballon [8]

$$Q_{ECS} = (m \times C_p) \times \Delta T \quad (\text{II.2})$$

$Q_{ECS}$  : Quantité d'énergie nécessaire pour chauffer l'eau du ballon (kWh) ;

$m$  : Consommation journalière d'eau chaude sanitaire ( $m^3$ ) ;

$C_p$  : Capacité thermique de l'eau ( $1,16 \text{ kWh}/m^3 \cdot K$ ) ;

$\Delta T$  : Ecart de température eau chaude - eau froide (K).

### II.2.2 Dimensionnement des capteurs solaires

- Quantité d'énergie produite par  $m^2$  de capteur [8]

$$Q_{cap} = I_s \times \eta_{cap} \times \eta_{système} \quad (\text{II.3})$$

$Q_{cap}$  : Quantité d'énergie produite par le capteur ( $W/m^2 \cdot \text{jour}$ ) ;

$\eta_{système}$  : Rendement du système (%) ;

$I_s$  : Irradiation solaire ( $W/m^2 \cdot \text{jour}$ ) ;

$\eta_{cap}$  : Rendement des capteurs (%).

- Surface totale des capteurs  $S_{cap}$  en ( $m^2$ ) [8].

$$S_{cap} = \frac{Q_{ECS}}{Q_{cap}} \quad (\text{II.4})$$

- Nombre de capteurs  $n_{cap}$  [8]

$$n_{cap} = \frac{S_{cap}}{\text{Surface d'un capteur}} \quad (\text{II.5})$$

Lorsque  $\begin{cases} n_{cap} > 9 & \Rightarrow \text{Raccordement en série impossible} \\ n_{cap} \leq 9 & \Rightarrow \text{Raccordement en série possible} \end{cases}$

Remarque : Si les capteurs sont raccordés en série, la répartition du débit reste identique mais la pression diffère. Cela s'explique par la variation de la densité du fluide au cours de la traversée des capteurs. Par contre s'ils sont montés en parallèles, la pression reste identique et le débit diffère, car le fluide n'arrive pas dans les capteurs au même moment.

- Rendement des capteurs  $\eta_{cap}$  en (%) : Norme Française NF P50-501 [16]

$$\eta_{cap} = \beta - \kappa \times (T_m - T_{ext}) \div I_s \quad (\text{II.6})$$

$$\beta = \alpha \times \tau \quad (\text{II.7})$$

$$\text{Pertes thermiques} = \kappa \times (T_m - T_{ext}) \quad (\text{II.8})$$

$$T_m = (T_e + T_s) \div 2 \quad (\text{II.9})$$

$I_s$  : Irradiation solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) ;

$\beta$  : Facteur optique (%) ;

$\kappa$  : Coefficient de transmission thermique ( $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ) ;

$T_m$  : Température moyenne du capteur (K) ;

$T_{ext}$  : La température ambiante (K) ;

$T_e$  : Température entrée capteur (K) ;

$T_s$  : Température sortie capteur (K) ;

$\alpha$  : Taux d'absorption de l'absorbeur (%) ;

$\tau$  : Taux de transmission du vitrage (%).

Le rendement ( $\eta_{cap}$ ) dépend de l'ensoleillement et de l'écart de température entre le milieu ambiant et l'absorbeur. Il est nul quand le fluide caloporteur est arrêté.

- Puissance reçue par l'absorbeur  $P_{\text{absorbeur}}$  en ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) [16]

$$P_{\text{absorbeur}} = \beta \times I_s \quad (\text{II.10})$$

- Puissance utile de l'absorbeur ( $P_{\text{utile}}$ ) par unité de surface de capteur ( $\text{W}/\text{m}^2$ ) : est la puissance restituée à l'eau glycolée [15]

$$P_{\text{utile}} = P_{\text{absorbeur}} - \text{Pertes thermiques} \quad (\text{II.11})$$

$$P_{\text{utile}} = \eta_{cap} \times I_s \quad (\text{II.12})$$

- Puissance utile ( $P_u$ ) totale du capteur en (W) [16]

$$P_u = \text{surface d'ouverture du capteur} \times P_{\text{utile}} \quad (\text{II.13})$$

**Remarque :** On peut aussi calculer la puissance utile récupérée par l'eau glycolée en mesurant son débit, ses températures d'entrée et de sortie, en appliquant la formule :

$$P_{\text{utile}} = Q \times c \times (T_e - T_s) \quad (\text{II.14})$$

$c$  : Chaleur massique de l'eau glycolée (kWh/m<sup>3</sup>.K), sensiblement différente de celle de l'eau.

$Q$  : Débit de l'eau glycolée (m<sup>3</sup>/h).

### II.2.3 Dimensionnement du vase d'expansion

Le vase d'expansion est un récipient métallique comportant une chambre formée par une membrane en élastomère remplie d'un gaz inerte (de l'azote généralement). Le volume du vase d'expansion ( $V_N$ ) en litre peut se calculer comme suit [3] :

$$V_N = S_{\text{cap}} \times 3,5 \quad (\text{II.15})$$

### II.3 Ombre et ensoleillement du site

**Ombre :** L'orientation sud et une inclinaison de 15° environ par rapport à l'horizontale assurent les meilleurs rendements pour une installation solaire à nos latitudes (Diamniadio). Il faut éviter tous les masques solaires qui pourraient faire de l'ombre sur les capteurs solaires. L'endroit où va être installés les capteurs doit être bien étudié, attention notamment aux éléments du toit, aux arbres et à l'environnement urbain. Tous ces éléments peuvent baisser la productivité du capteur. Il faut donc être particulièrement vigilant à l'endroit où nous souhaitons installer les capteurs.

**Ensoleillement du site :** La durée d'ensoleillement, tout comme son intensité dépend de la période de l'année, des conditions météorologiques et naturellement de la situation géographique. Le Sénégal possède l'un des meilleurs potentiels solaires de l'Afrique de l'ouest, avec en moyenne 5,7 kWh/m<sup>2</sup>/jour au sol d'énergie solaire brute (rayonnement direct) dépassant 2 000 kWh/m<sup>2</sup>/an dans la majeure partie du pays [1]. Soit plus de 3 000 heures d'ensoleillement par an. Le climat est marqué par une saison sèche (de Novembre à Mai) et une saison des pluies (de Juin à Octobre). Dakar est l'une des grandes villes du Sénégal avec le plus grand potentiel solaire soit une irradiation solaire de 2270 kWh/m<sup>2</sup>, s'en suit Ziguinchor et Mbour [17]. L'ensoleillement à Ziguinchor est stable tout au long de l'année. La période d'hivernage offre un peu moins de soleil que la saison sèche, dont Août le mois le moins ensoleillé de l'année.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés les dispositifs expérimentaux à savoir : les kits de chauffe-eaux solaires à circulation forcée et à thermosiphon monobloc, ainsi que leurs différentes caractéristiques techniques. Nous avons également dimensionné quelques composants du chauffe-eau solaire en présentant les équations appropriés.

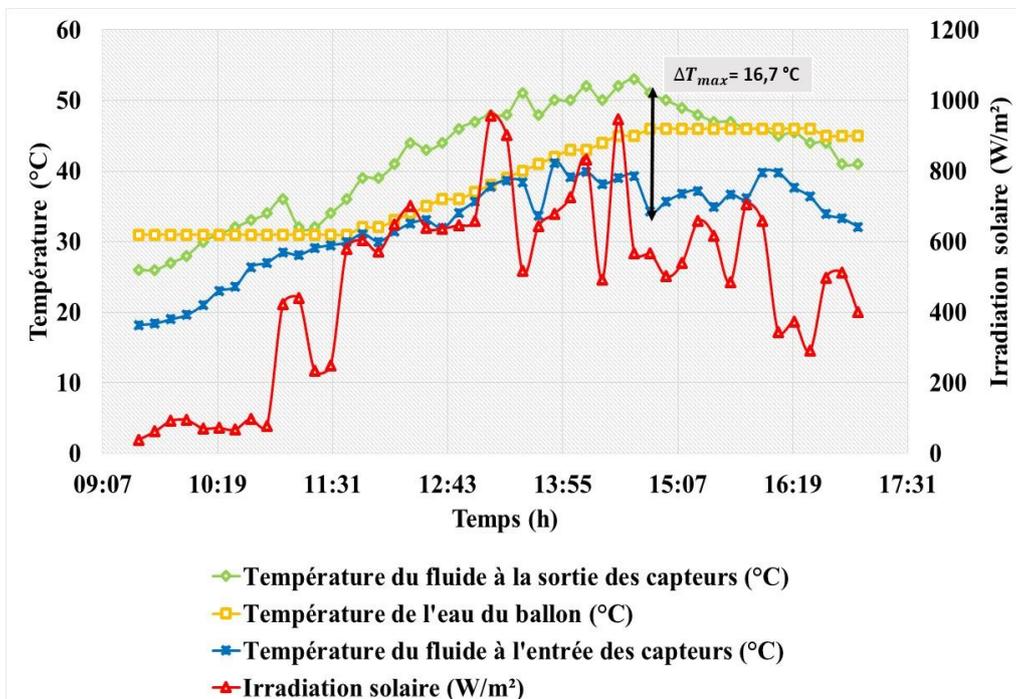
# Chapitre III : Résultats et discussions

## Introduction

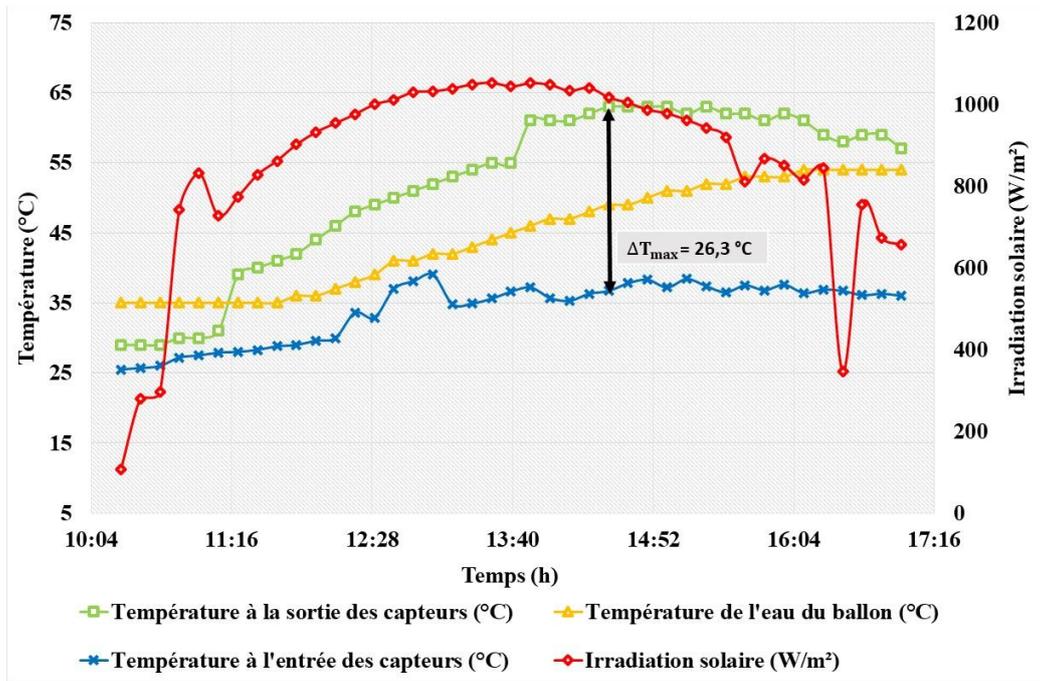
Les études expérimentales consistent à vérifier la performance d'un kit de chauffe-eau solaire (CES) à circulation forcée et à thermosiphon monobloc. Pour ce faire, des mesures de températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des capteurs ainsi que celle de l'eau du ballon de stockage ont été effectuées pendant une durée de 9 heures. Ces températures seront mesurées à l'aide des sondes de température directement intégrées aux capteurs et au ballon de stockage. Un solarimètre et un thermo-hygromètre ont été utilisés pour mesurer respectivement l'irradiation solaire et la température ambiante.

### III.1 Chauffe-eau solaire à circulation forcée

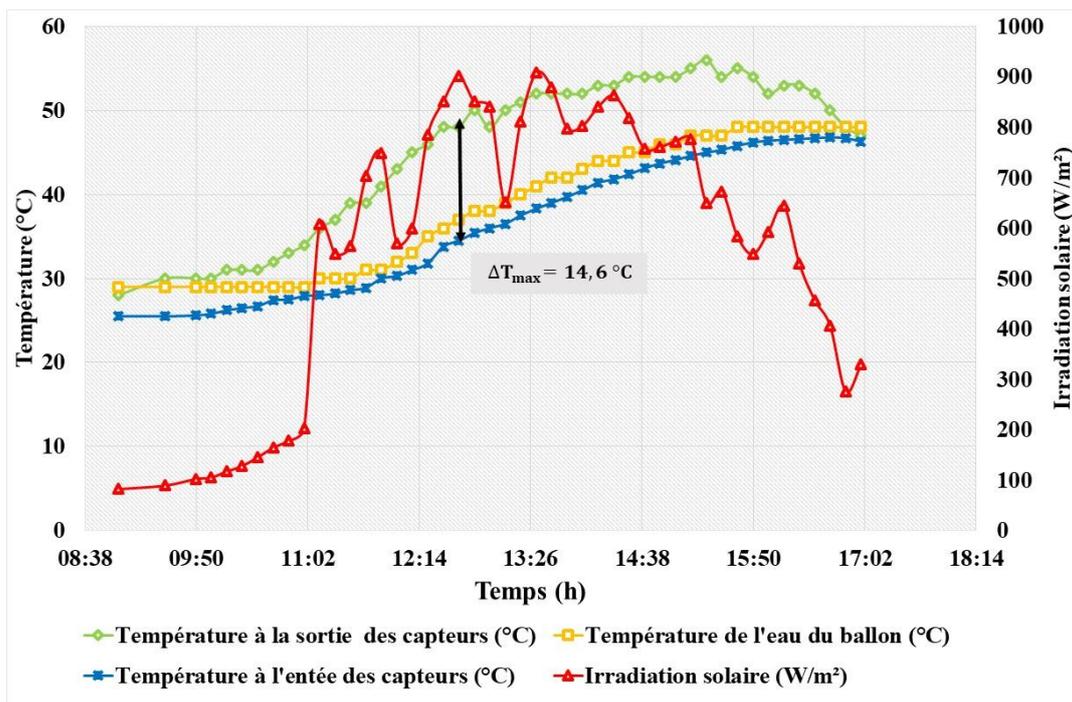
Les valeurs obtenues lors des prélèvements des températures du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs, de l'eau du ballon de stockage, ainsi que de l'irradiation solaire nous ont permis de tracer les courbes ci-dessous. C'est-à-dire pour le mardi 04 février 2020, le jeudi 06 février 2020 et le vendredi 14 février 2020.



(a) Mardi 04 février 2020



(b) Jeudi 06 février 2020



(c) Vendredi 14 février 2020

Figure (III.1) : Variation des températures et de l'irradiation solaire en fonction des heures

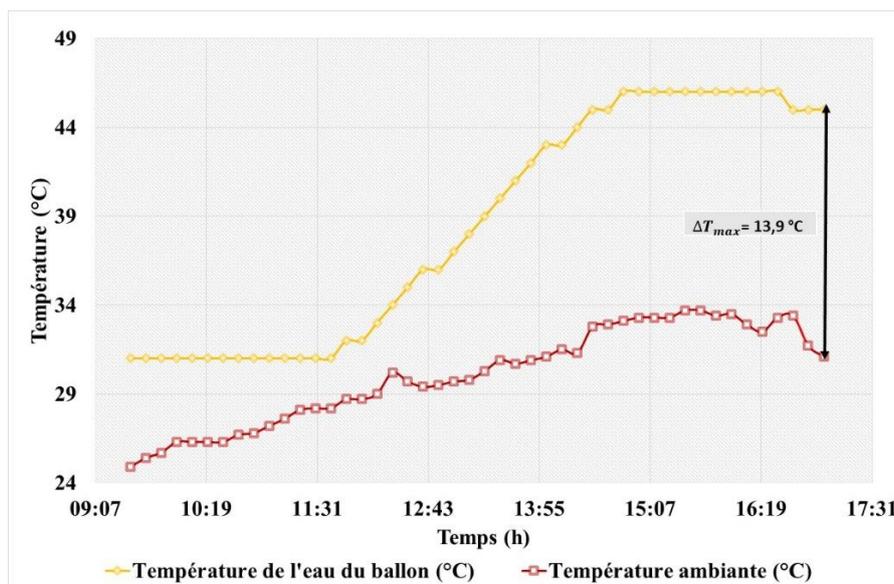
Les courbes ci-dessus montrent la variation des températures du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des capteurs, de l'eau du ballon de stockage, ainsi que celle de l'irradiation solaire en fonction du temps. Les températures du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs ainsi que celle de l'eau du ballon de stockage ont la même allure tout au long de la journée. L'écart de température entre l'entrée et la sortie des capteurs est maximal pour le jeudi 06 février 2020, vers 14h30mn avec une différence de  $\Delta T_{max} = 26,3 \text{ }^\circ\text{C}$  pour une irradiation maximale de  $1052 \text{ W/m}^2$  à 13h50mn.

D'abord, Au début du prélèvement des résultats, nous constatons que la température de l'eau du réservoir est restée constante. Cela peut s'expliquer par le fait que l'écart de température qui existe entre les capteurs et l'eau du ballon de stockage était inférieur à  $6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Pour que le fluide caloporteur soit en circulation dans le circuit solaire, il faut que cet écart de température soit supérieur ou égal à  $6 \text{ }^\circ\text{C}$  afin que la pompe soit mise en service.

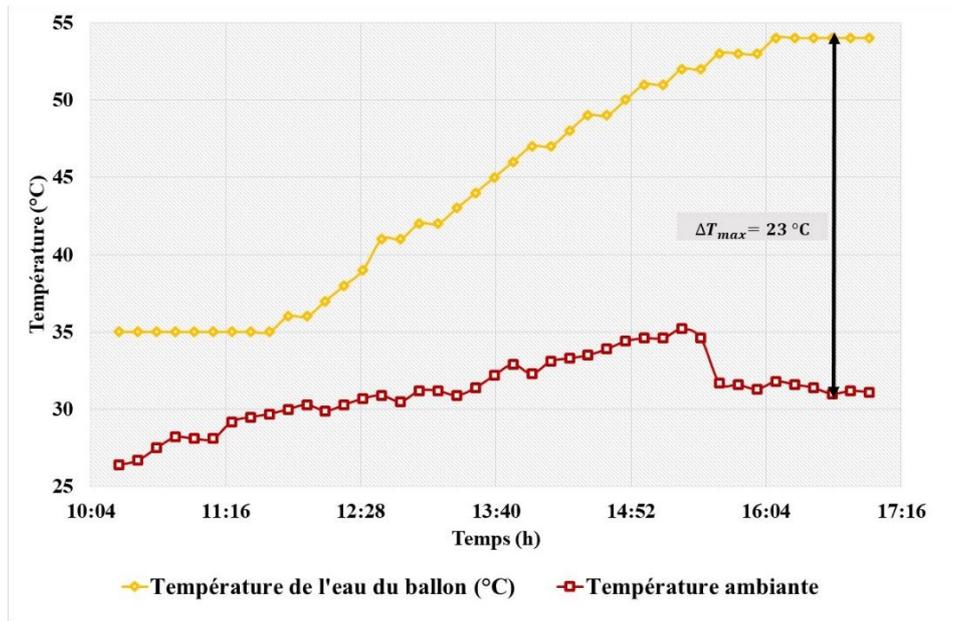
Ensuite, nous remarquons que lorsque l'irradiation solaire diminue, la température du fluide à la sortie des capteurs diminue très lentement. Cela est dû à l'effet de serre qui se produit à l'intérieur des capteurs solaires.

Enfin, nous constatons une irrégularité de la courbe de l'irradiation solaire qui est due au passage des nuages lors des prélèvements, mais aussi, nos capteurs étaient exposés à l'ombrage du bâtiment.

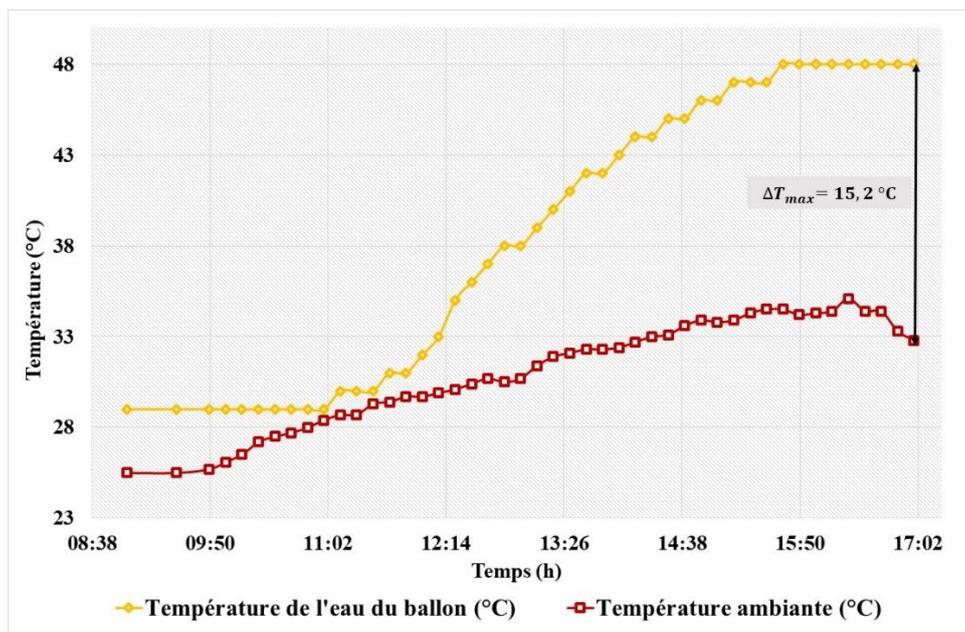
Les courbes ci-dessous affichent les résultats obtenus lors de prélèvement des températures de l'eau du ballon de stockage ainsi que celle de l'ambiante en fonction du temps.



(a) Mardi 04 février 2020



(b) Jeudi 06 février 2020.



(c) Vendredi 14 février 2020.

Figure (III.2) : Variation de la température de l'eau du ballon de stockage et celle ambiante en fonction des heures.

Les figures ci-dessus montrent l'évolution journalière de la température ambiante et celle de l'eau du réservoir en fonction du temps. Ces deux températures ont presque la même allure ce qui explique que l'augmentation de la température de l'eau du réservoir et celle ambiante dépendent de l'irradiation solaire journalière. Lorsque l'irradiation augmente, les capteurs

absorbent plus de rayonnement, qui sont à nouveau transformés en chaleur pour chauffer l'eau du ballon. La différence de température la plus élevée est celle du jeudi 06 février 2020 avec  $\Delta T_{max} = 23^{\circ}\text{C}$  à 16h40mn à cause du ciel dégagé. Alors que les différences de température des autres jours du mardi 04 et vendredi 14 sont respectivement de  $13,9^{\circ}\text{C}$  et  $15,2^{\circ}\text{C}$  à 17h00mn, restent inférieures à la différence de température maximale  $\Delta T_{max} = 23^{\circ}\text{C}$ . Cette différence peut être expliquée par des passages de nuages qui sont révélés par l'irrégularité de la courbe de l'irradiation. Aussi, nous constatons vers la fin de la journée lors que la température ambiante diminue, celle de l'eau du ballon de stockage reste constante. Cela s'explique par le fait que le ballon était isolé thermiquement et que la température ambiante n'avait pas trop d'influence sur l'eau du ballon de stockage.

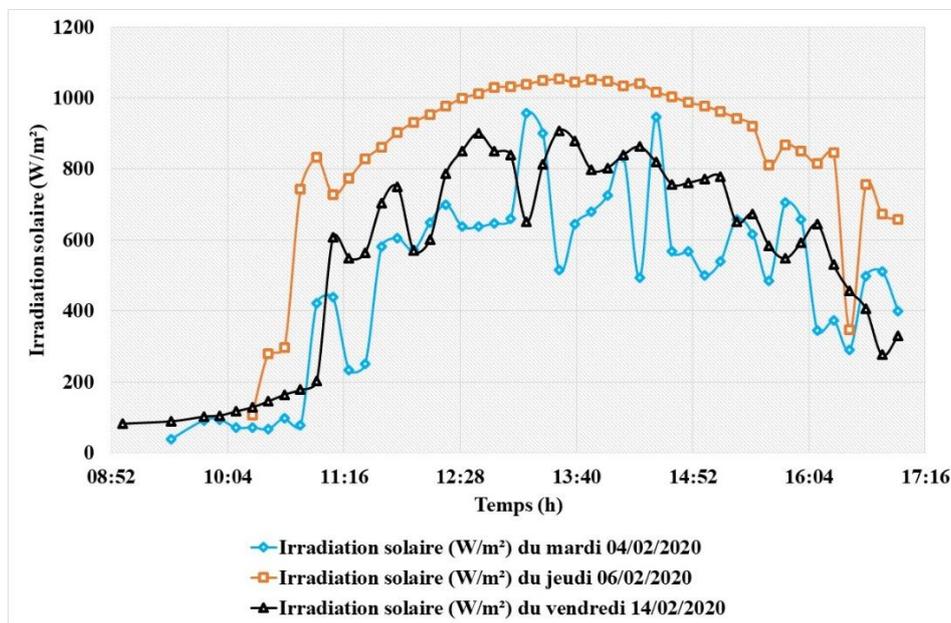


Figure (III.3) : Variation de l'irradiation solaire du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps.

La figure (III.3) illustre la variation de l'irradiation solaire du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 ainsi que celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. Nous constatons que l'irradiation solaire du jeudi 06 février 2020 est plus élevée que celle du mardi 04 et du vendredi 14 février 2020 avec une irradiation maximale de  $1052 \text{ W/m}^2$ . Cela s'explique par le fait que les mesures ont été faites sur une période à ciel clair lors des prélèvements. La variation de l'irradiation solaire au cours de la journée est due à la position du soleil.

L'irrégularité des courbes de l'irradiation solaire du mardi 04 et du vendredi 14 février 2020 est due au passage des nuages.

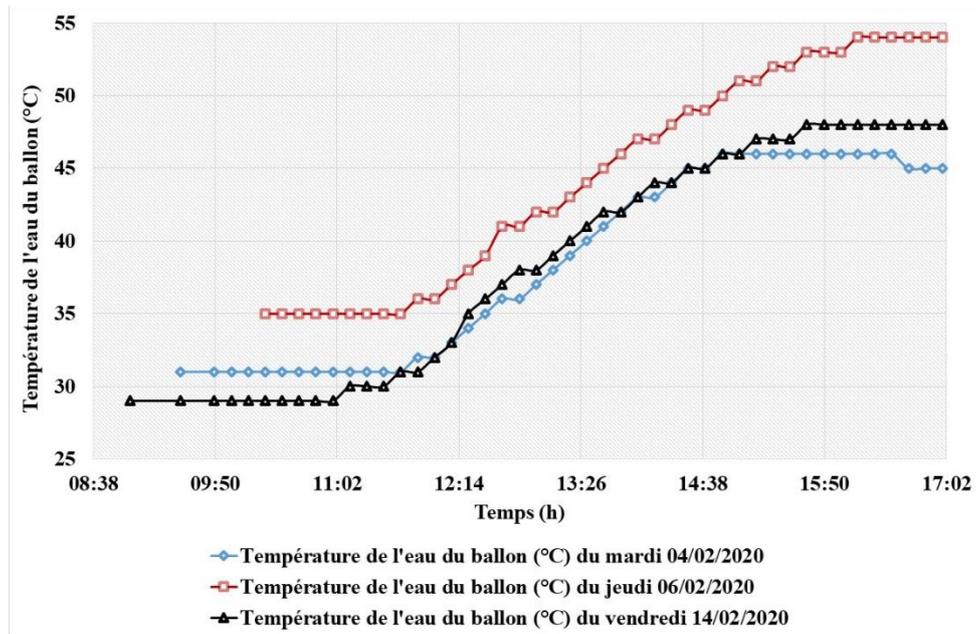
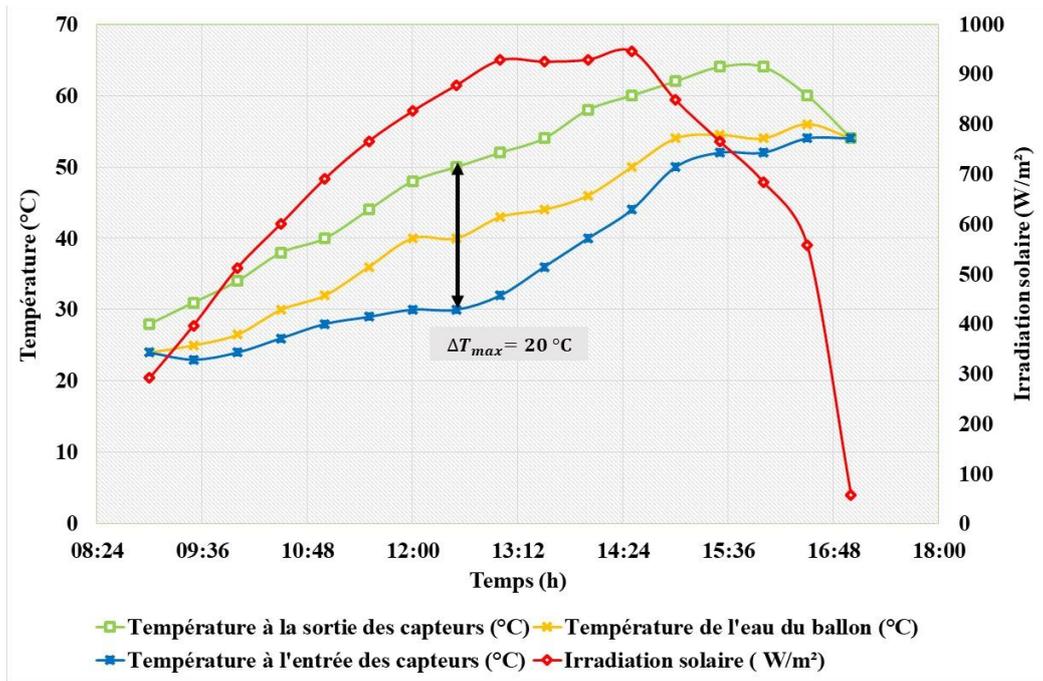


Figure (III.4) : Variation de la température de l’eau du ballon de stockage du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps.

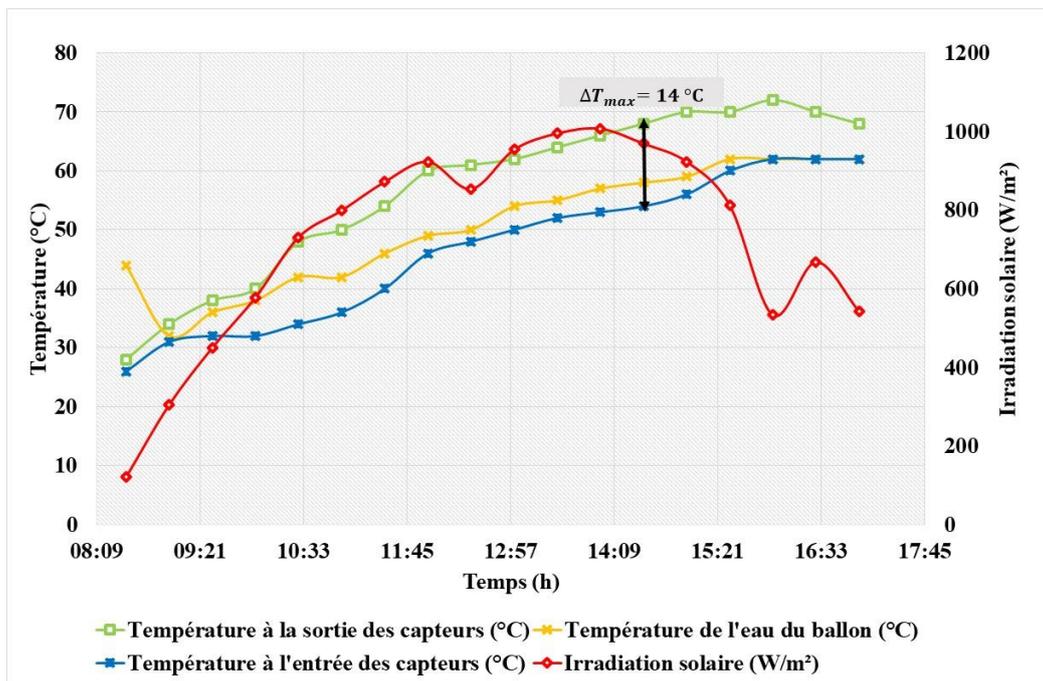
La figure (III.4) présente la variation de la température de l’eau du ballon de stockage du mardi 04/02/2020, du jeudi 06/02/2020 ainsi que celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. Nous remarquons que la température de l’eau du ballon de stockage du jeudi 06 février 2020 est plus élevée (54°C) que celle du mardi 04 (45°C) et du vendredi 14 (48°C) février 2020. Cette élévation de la température est due à l’irradiation solaire intense du jeudi.

### III.2 Chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc

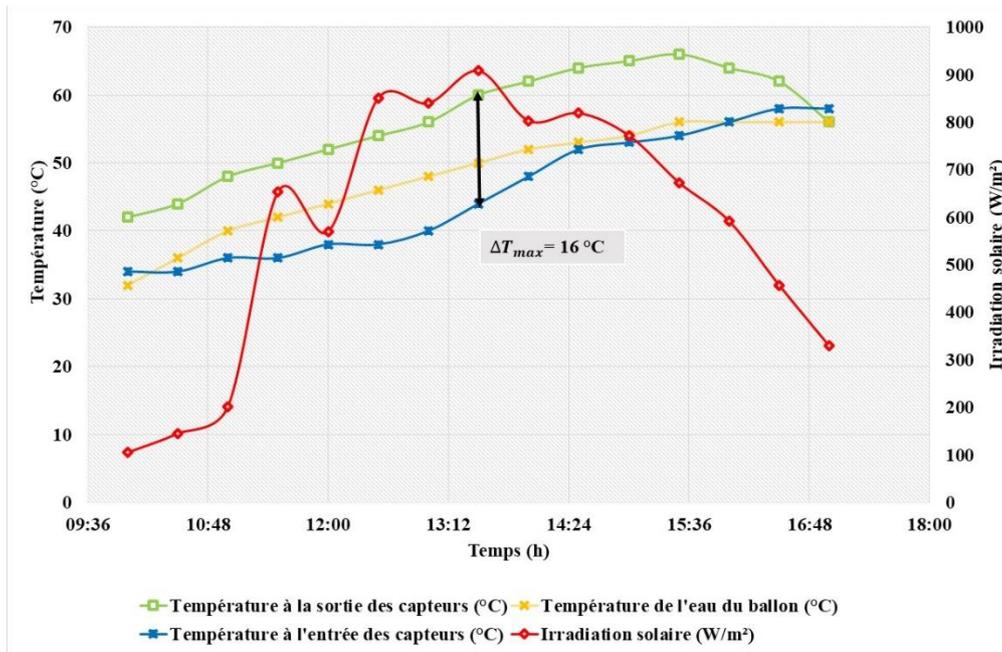
Les valeurs obtenues lors des prélèvements des températures du fluide à l’entrée et à la sortie des capteurs, de l’eau du ballon de stockage, de l’irradiation solaire, ainsi que de l’ambiante nous ont aussi permis de tracer les courbes ci-dessous. C’est-à-dire pour le mercredi 12 février 2020, le jeudi 13 février 2020 et le vendredi 14 février 2020.



(a) Mercredi 12 février 2020



(b) Jeudi 13 février 2020.



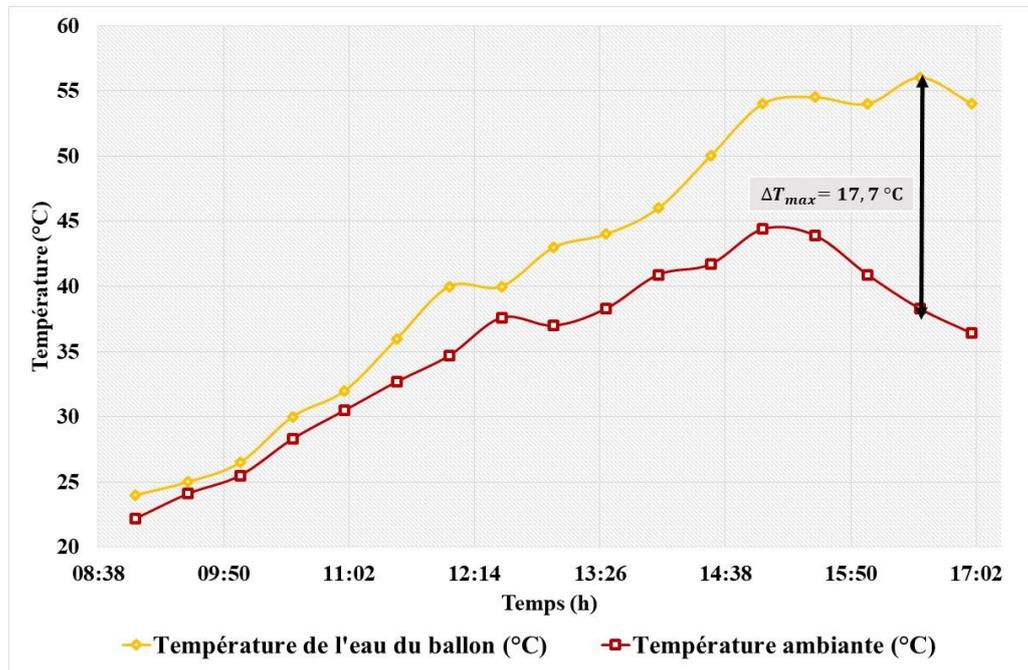
(c) Vendredi 14 février 2020

Figure (III.5) : Variation des températures et de l'irradiation solaire en fonction des heures

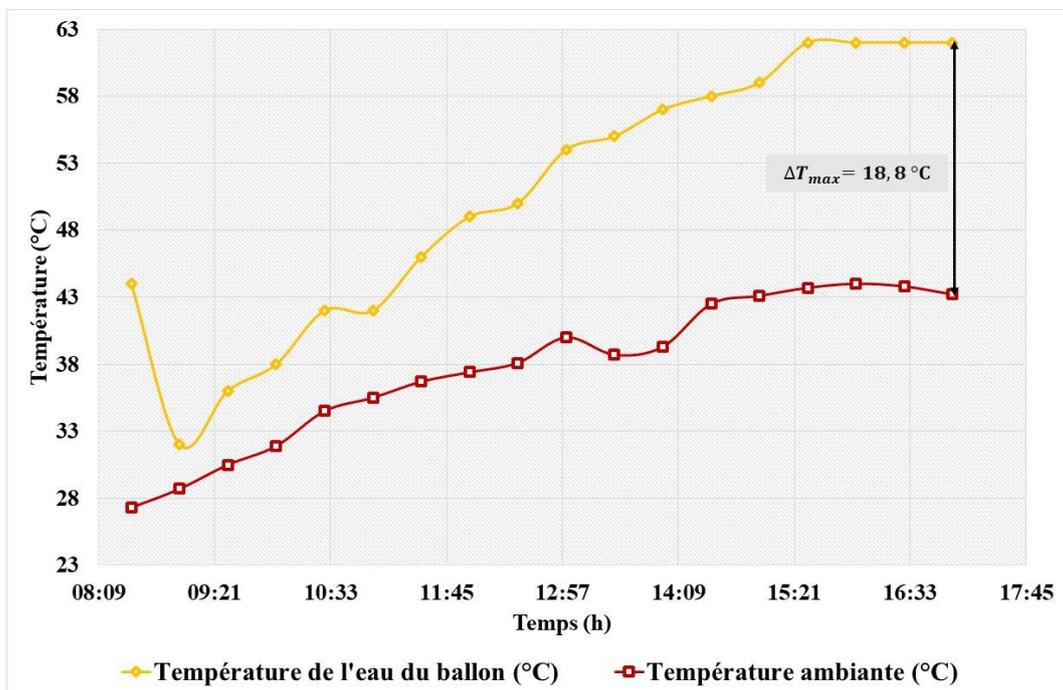
Les figures ci-dessus montrent la variation des températures de l'eau du ballon, du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs ainsi que de l'irradiation solaire en fonction du temps. La température de l'eau du réservoir et celle des capteurs augmente de façon proportionnelle. Cela s'explique par le fait que le système monobloc était fixé sur une terrasse, orienté et bien incliné de sorte qu'aucun obstacle ne puisse limiter l'ensoleillement. En plus, la circulation du fluide dans les capteurs est assurée par une différence de température appelée principe du thermosiphon. L'irradiation maximale est de  $1112 \text{ W/m}^2$  vers 13h30mn dans la journée du mercredi 11 février 2020 avec une différence de température à l'entrée et à la sortie des capteurs  $\Delta T_{max} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ce qui confirme, sans doute, que l'installation d'un système à thermosiphon serait plus rentable.

Nous constatons vers la fin de la journée, lorsque l'irradiation solaire diminue, la température du fluide à l'entrée et à la sortie des capteurs ainsi que celle de l'eau du ballon de stockage était identique. Cela est due au fait que nous n'avons pas puisé de l'eau chaude pour baisser la température du ballon de stockage.

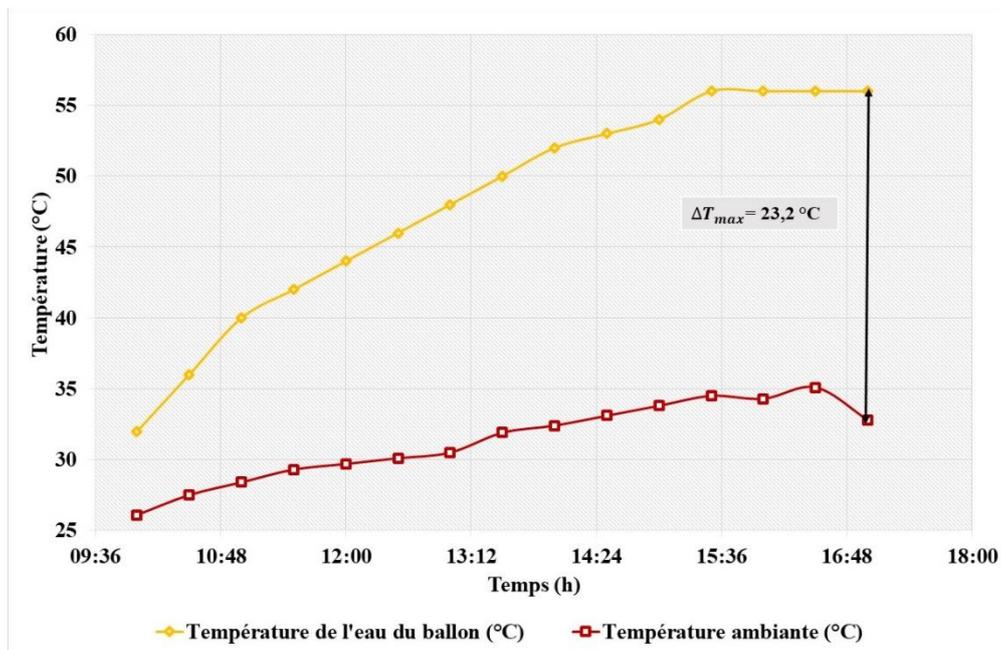
Les courbes ci-dessous affichent les résultats obtenus lors de prélèvement des températures de l'eau du ballon de stockage ainsi que celle de l'ambiante en fonction du temps.



(a) Mercredi 12 février 2020



(b) Jeudi 13 février 2020.



(c) vendredi 14 février 2020.

Figure (III.6) : Variation de la température de l'eau du ballon et celle ambiante en fonction du temps

Les courbes ci-dessous exhibent l'évolution de la température ambiante et celle de l'eau du ballon en fonction du temps. La variation de la température ambiante dépend de l'irradiation journalière. Lorsqu'elle augmente, les capteurs absorbent plus de chaleur pour augmenter la température de l'eau du ballon.

Nous constatons que l'écart maximal de température qui existe entre l'ambiante et l'eau du ballon de stockage est de 23,6°C pour le vendredi 14 février 2020, de 18,8°C pour le jeudi 13 février 2020 et de 17,7°C pour le mercredi 12 février 2020. Aussi, nous remarquons que lorsque la température ambiante diminue, celle de l'eau du ballon de stockage reste presque constante. Ce qui veut dire que le ballon était bien isolé thermiquement (pertes de température minime) et que l'ambiante n'avait pas trop d'influence sur l'eau du ballon de stockage.

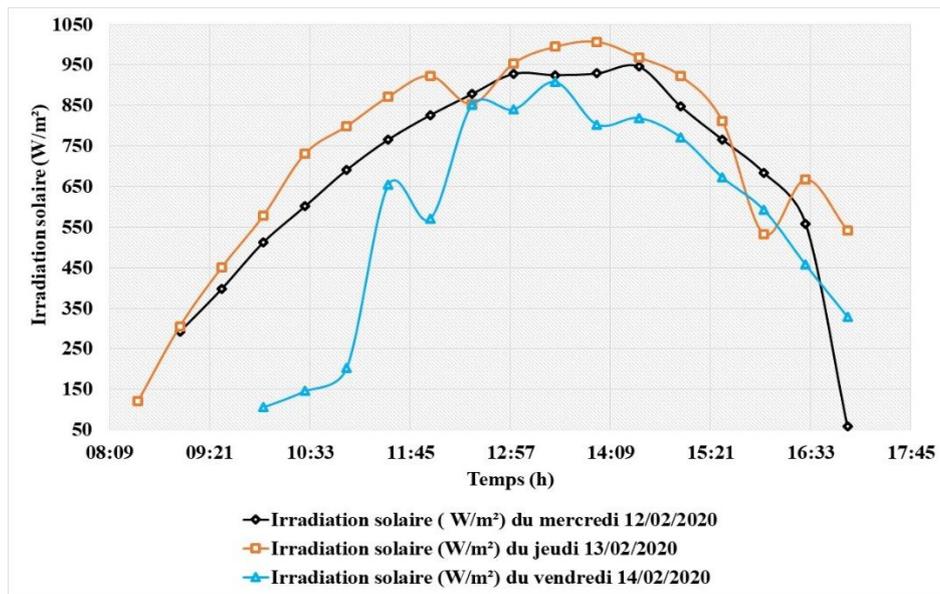


Figure (III.7) : Variation de l'irradiation solaire du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps.

La figure (III.7) affiche la variation de l'irradiation solaire du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 ainsi que celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. Nous constatons que l'irradiation solaire du jeudi 13 février 2020 est plus élevée que celle du mercredi 12 et du vendredi 14 février 2020 avec une irradiation maximale de 1007 W/m<sup>2</sup>. C'est due au fait que nous sommes tombés sur une période à ciel clair lors des prélèvements et que les capteurs solaires ne sont pas exposés à l'ombrage des objets. La variation de l'irradiation solaire au cours de la journée est due à la position du soleil.

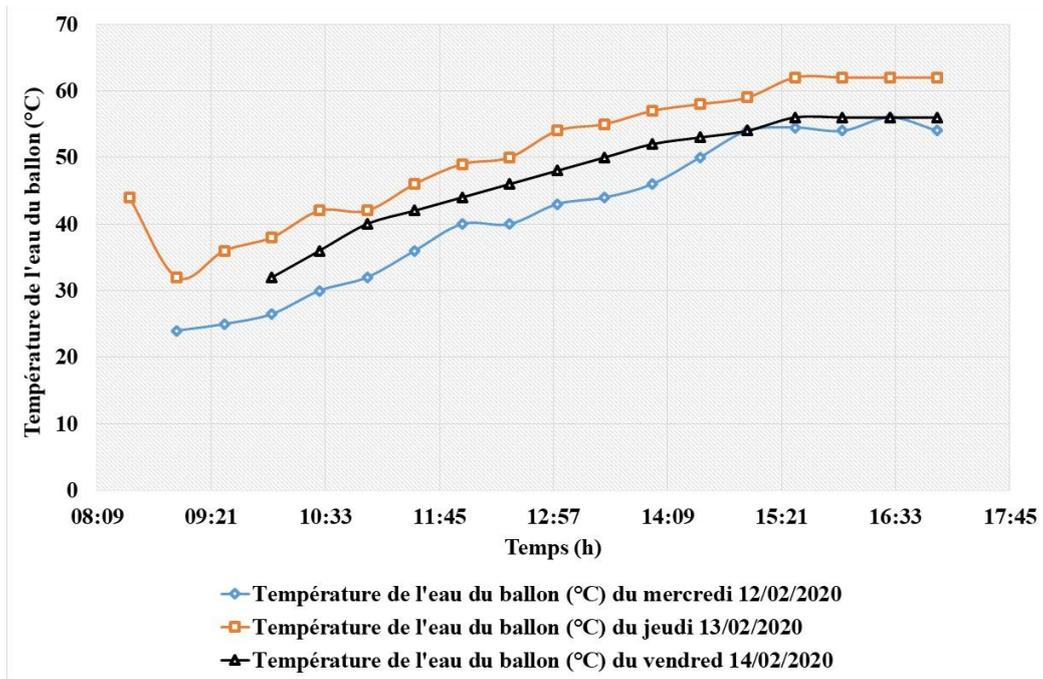


Figure (III.8) : Variation de la température de l'eau du ballon de stockage du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 et celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps.

La figure (III.8) présente la variation de la température de l'eau du ballon de stockage du mercredi 12/02/2020, du jeudi 13/02/2020 ainsi que celle du vendredi 14/02/2020 en fonction du temps. Nous constatons que la température de l'eau du ballon de stockage du jeudi 13 février 2020 est plus intense (72 °C) que celle du mercredi 12 (54 °C) et du vendredi 14 (56 °C) février 2020. Cette élévation de la température est due à l'irradiation solaire intense du jeudi.

## CONCLUSION GENEALE

Ce travail de mémoire consistait à dimensionner et à étudier la performance d'un chauffe-eau solaire à capteur plan vitré pour un usage domestique. D'abord, pour dimensionner le système solaire, une évaluation des besoins en eau chaude sanitaire a été faite. Ensuite, des équations ont été utilisées pour obtenir différents résultats. Enfin, nous avons effectué des prélèvements de la température du fluide caloporteur à l'entrée et à la sortie des capteurs solaires, de l'eau du ballon de stockage, de l'ambiante ainsi que celle de l'irradiation solaire en fonction du temps pour tracer des courbes. De même, nous avons eu à faire le raccordement et le remplissage du circuit solaire par de l'eau glycolée pour le chauffe-eau solaire à circulation forcée.

Les études qui ont été menés sur ces deux kits nous ont permis de faire le dimensionnement des composants du chauffe-eau solaire. Ensuite, de faire le raccordement et le remplissage du circuit solaire avec de l'eau glycolée. Et enfin d'effectuer des mesures à l'aide d'un régulateur pour la circulation forcée et des thermocouples pour le thermosiphon monobloc. Les résultats obtenus lors de ces prélèvements ont permis de tracer différentes courbes. L'analyse de ces courbes nous montre que les deux kits de chauffe-eau solaire étudiés sont performants et respectent les exigences de fonctionnalité (température de l'eau du ballon de stockage  $\geq$  à 50 °C).

Le rendement du système à thermosiphon monobloc est de 88 % avec un taux de réduction d'émission de CO<sub>2</sub> de 1190,8 kg/an et un taux d'amortissement de 6 ans soit un prix de revient de 1 888 550 Franc CFA. Par contre, le rendement du système à circulation forcée est de 76 % avec un taux de réduction d'émission de CO<sub>2</sub> de 933,59 kg/an et un taux d'amortissement de 9 ans soit un prix de revient de 2 213 900 Franc CFA. Toujours est-il que la durée de vie d'un chauffe-eau solaire est d'environ 20 ans en moyenne. Ainsi, compte tenu de ces résultats obtenus, nous pouvons conclure que l'installation d'un chauffe-eau solaire à thermosiphon monobloc serait plus rentable en termes de coût et d'entretien du fait que nous sommes situés dans une région à forte ensoleillement. Mais ce système n'est pas adapté à tout type d'habitation.

En perspective, d'abord, il serait intéressant de concevoir un chauffe-eau solaire local et comparer sa performance aux chauffe-eau importés. Ensuite, étudier l'impact de l'orientation et de l'inclinaison des capteurs sur le rendement du système. Puis, tester la capacité de production de chaleur de la résistance électrique placée sur la partie haute du ballon de stockage. En plus calculer le taux de couverture des chauffe-eaux solaires. Enfin, dimensionner les tuyaux du circuit solaire et hydraulique.

# BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] **Thiam**, A. (2015). Rapport de l'étude du marché du solaire thermique : production d'eau chaude et séchage des produits agricole au Sénégal. ECREE, Dakar/Sénégal, 70p.
- [2] **Tissot**, M. (2012). L'énergie solaire thermique et photovoltaïque. Eyrolles, Paris, 155p.
- [3] **CEREEC**. (2017). Utilisation Thermique de l'Energie Solaire. AEE, Autriche, 121p.
- [4] **Battaglia** J. L., **Kusiak** A. et **Puiggali** J. R. (2014). Introduction aux transferts thermiques. Dunod, Paris, 265p.
- [5] <https://www.solaire-diffusion.eu/chauffe-eau-solaire/dimensionner-son-chauffe-eau-solaire.html>. Consulté le 10 février 2020.
- [6] **Fortier**, J. F. et al. (2019, décembre). Définition d'effet de serre [site web]. Consulté le 10 février 2020.
- [7] **Laughton**, C. (2012). Eau chaude solaire. Dunod, Paris, 273p.
- [8] **Veynandt**, V. et **Moschick**, R. (2017). Dimensionnement d'un chauffe-eau solaire et autres composants d'un système solaire thermique. AEE-Institute for Sustainable Technologies, Autriche, non paginée.
- [9] **Graham**, I. (1999). Les énergies en questions, Bonneuil-les-eaux, 35p.
- [10] **Riolet**, E. (2010). L'énergie solaire et photovoltaïque pour le particulier. Eyrolles, Paris, 104p.
- [11] **Brahimi**, A. (2016). Etude de performance d'un capteur solaire plan à eau. Mémoire de master 2. Université de Lorraine, Lorraine, 190p.  
<https://www.aquaportail.com/definition-2411-effet-de-serre.html>.
- [12] **Laughton**, C. (2012). Eau chaude sanitaire : conception et installation des chauffe-eau solaires. Dunod, Paris, 200p.
- [13] **Caccaveli**, D. et **Cheutin**, F. (2012). Chauffe-eau solaire individuel : conception, mise en œuvre et entretien Ed.1. CSTB, Paris, 104p.
- [14] <https://www.approsud.com>. Consulté le 10 février 2020.
- [15] **Ouédraogo**, B. (2013). Développement de couches absorbantes à base de composites al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-NiO pour des applications en énergie solaire thermique. Thèse. Université de Montréal, Montréal, 173p. Consulté le 18 mars 2020.  
[https://www.researchgate.net/figure/3-Schemas-de-bilan-energetique-dun-capteur-solaire\\_fig2\\_273139345](https://www.researchgate.net/figure/3-Schemas-de-bilan-energetique-dun-capteur-solaire_fig2_273139345).
- [16] Interactif (sans date). [Site web]. Consulté le 09 octobre 2020.  
<https://www.nouvenergie.fr/e-formation/solaire-1/rendement-capteurs/>

[17] [https://www.get-invest.eu/wp-content/uploads/2017/05/Trade-Mission-Senegal-Flyer-European\\_French.pdf](https://www.get-invest.eu/wp-content/uploads/2017/05/Trade-Mission-Senegal-Flyer-European_French.pdf) consulté le 18 mars 2020.

[18] <https://www.solaris-store.com/1540-chauffe-eau-solaire-thermosiphon-300l.html>.  
Consulté le 29 octobre 2020

