

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION



Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en génie mécanique,

Spécialité : Energétique.

Thème :

**Etude par simulation numérique et expérimentale
d'une installation de chauffage solaire collective**

Présenté par :

Mlle NOUALI Lyna

Jury d'évaluation du mémoire :

Président: M. Salah ZOUAOUI

UMM TIZI-OUZOU

Examineur : M. Sidali FOUCHANE

UMM TIZI-OUZOU

Encadrant : M. Hicham BENDJEBBAS

UDES BOU-ISMAIL TIPASA

Co-encadrant : M. Hani BELTAGY

UMM TIZI-OUZOU

Promotion 2023/2024

ملخص

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة الأداء الحراري لنظام تسخين شمسي جماعي يستعمل من أجل تسخين ثلاثة مكاتب و مكتبة يتكون هذا النظام من 16 لاقط شمسي حراري مثبتة على السطح ، . بوحدة تنمية الأجهزة الشمسية ببوسماعيل ولاية تيبازة كما تتكون أيضا من خزان مائي ذو سعة 1500ل.

من أجل تقدير الأداء الحراري تم إستعمال نظام قياسي متطور. يتم ضمان انتقال الماء عن طريق مضخة التي تضمن التدفق اللازم لدرجات الحرارة المحددة في بداية التشغيل. ثم إستعمال نظام الدعم الذي يتمثل في مقاومة الكهرباء من أجل تعويض العوامل الطبيعية المتذبذبة للطاقة الشمسية.

ثم إستعمال نمذجة و محكمة رقمية من أجل إيجاد مختلف أداءات النظام . تم إنجاز تحليل تجريبي دقيق و معمق من أجل إنجاز مختلف الأداءات الحرارية، ثم مقارنة النتائج المحصل عليها و التحقق من صحتها مع النتائج الرقمية.

يدخل هذا العمل في إطار مشروع بحث عن الأنظمة التسخين الشمسي الجماعي.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الشمسية، تطبيقات شمسية حرارية، مسخن شمسي جماعي، نظام تنظيم، نظام دعم.

Résumé

Le présent travail consiste à étudier les performances thermiques d'un système de chauffage solaire collectif utilisé pour le chauffage des locaux, ce système est installé à l'unité de développement des équipements solaire (UDES), Bou Ismaïl, Tipaza, il est utilisé pour le chauffage des locaux à savoir : 4 bureaux et une bibliothèque. Cette installation est composée de 16 capteurs thermiques installés sur la terrasse, elle contient une cuve de stockage de 1500 litres. Un système d'acquisition est mis en place afin d'estimer les performances thermiques de l'installation. La circulation de l'eau est assurée par des circulateurs qui assurent le débit nécessaire pour les températures de consignes à l'aide d'un système de régulation adapté. Un système d'appoint est installé afin de compenser le caractère intermittent de l'énergie solaire.

Une modélisation et simulation numérique sont réalisées afin de déterminer les différentes performances de l'installation.

Une analyse expérimentale détaillée est réalisée permettant de déterminer le comportement thermique de l'installation, les résultats trouvés sont comparés et validés avec les résultats numériques.

Ce sujet fait partie d'un projet de recherche sur les systèmes de chauffages solaires collectifs.

Mots clés : énergie solaire, applications basses température, chauffe-eau solaire, chauffage collectif, système de régulation, système d'appoint.

Abstract:

The present work consists in studying the thermal performance of a collective solar heating system used for space heating. This system is installed at the solar equipment development unit (UDES), Bou Ismail, Tipaza, and is used to heat 4 offices and a library. The system consists of 16 thermal collectors installed on the terrace, and contains a 1500 liter storage tank. A data acquisition system is used to estimate the system's thermal performance. Water circulation is ensured by circulators which, with the aid of an appropriate control system, provide the flow required for the set temperatures. A back-up system is installed to compensate for the intermittent nature of solar energy.

Numerical modelling and simulation are carried out to determine the system's various performances.

A detailed experimental analysis is carried out to determine the thermal behavior of the system, and the results found are compared and validated with the numerical results.

Keywords: solar energy, low-temperature applications, solar water heater, district heating, control system, backup system.

TABLE DES MATIERES

RESUME

TABLE DES MATIERS

LISTE DES ILLUSTRATIONS, GRAFIQUES ET TABLEAUX

LISTE DES SYMBOLES ET DES ABREVIATIONS

Introduction générale	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES.....	3
I. Introduction	4
I.1. Les énergies fossiles	4
I.2. Les énergies renouvelables	5
I.2.1.Le solaire photovoltaïque :.....	5
I.2.2.Le solaire thermique :.....	5
I.2.3.L'Energie Eolienne	5
I.2.4.La biomasse	5
I.2.5.La géothermie	6
I.3. Les énergies renouvelables en Algérie :.....	6
I.3.1.Potentiel solaire en Algérie	6
I.3.2.Potentiel éolien en Algérie	6
I.3.3.Potentiel géothermique en Algérie	6
I.4. Le rayonnement solaire	7
I.4.1.Généralités sur le soleil	7
I.4.2.Le soleil, source d'énergie	7
I.4.3.Relations géométriques entre la Terre et le soleil	7
I.4.4.Coordonnées Géographiques	8
I.4.5.Coordonnées horizontales.....	8
I.4.6.Hauteur du soleil	8
I.4.7.Azimut du soleil	9
I.5. Trajectoire du soleil	9
I.5.1.Déclinaison du soleil	9
I.5.2.Diagramme de la hauteur du soleil	10

I.5.3.Dénomination des angles.....	10
I.6. Rayonnement solaire en fonction de la météo.....	10
I.6.1.Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère terrestre.....	10
I.6.2.Mesure du rayonnement solaire global	11
I.6.3.Application de l'énergie solaire	12
I.6.4.Solaire photovoltaïque	12
I.6.5.Solaire thermique	13
I.7. Le chauffe-eau solaire	16
I.7.1.Différents types de chauffe- eau solaires.....	16
I.7.2. Différents composants du chauffe- eau solaire.....	17
I.7.3.Système de captation	18
I.7.4.Différents types de capteurs	18
I.7.5.Constituants du capteur solaire.....	19
I.8. Système de stockage	19
I.8.1.Définition.....	19
I.8.2.Constituant de la cuve.....	20
I.8.3.Différents types de ballons de stockage.....	20
I.8.4.Système d'appoint (Intégration à une installation existante)	21
I.8.5.Principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire.....	22
I.9. Mise en œuvre du circuit primaire	23
I.9.1.Purgeur	23
I.9.2.Soupape de sécurité	23
I.9.3.Vase d'expansion	23
Circulateur	24
I.9.4.Tuyauterie	24
I.9.5.Fluide caloporteur	25
I.9.6.Connexion électrique	25
I.9.7.Protection contre le calcaire	26
I.9.8.Protection contre la corrosion	26
I.9.9.Protection contre le gel	26
I.10. Mise en œuvre du circuit secondaire	26
Conclusion	26
CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART.....	28

II. Les systèmes solaires de chauffage de l'eau et des locaux	29
II.1. Introduction	29
II.1.1. Types de systèmes de chauffage solaire de l'eau	31
II.1.1.1. Systèmes à boucle directe ou ouverte (Figure.33)	31
II.1.1.2. Systèmes indirects ou systèmes à boucle fermée	32
II.1.1.3. Systèmes de chauffage solaire des locaux.....	35
II.1.1.4. Systèmes solaires combinés	37
II.2. Quelques travaux de recherches publiés dans le domaine de chauffage solaire collectif	40
Conclusion	44
CHAPITRE 3 : MODELISATION DU SYSTEME	45
III.1. Introduction	46
III.2. Bilan thermique.....	46
III.3. L'évolution des températures au niveau du capteur	51
III.4. L'évolution de la température moyenne de la plaque : $T_{ab,m}$	52
III.5. Evolution de la température de sortie d'eau T_s	52
III.6. Rendement instantané du capteur	52
Conclusion	53
CHAPITRE 4 : LA SIMULATION	54
IV.1. Introduction	55
IV.2. Présentation du TRNSYS	55
IV.3. Données métrologique	56
IV.4. Capteurs.....	57
IV.5. La cuve de stockage	58
IV.6. La pompe	59
IV.7. La tuyauterie	59
IV.8. Les radiateurs	60
IV.9. Résultats de simulation.....	62
Conclusion	71
CHAPITRE 5 : ETUDE EXPERIMENTAL.....	72

V.1.Introduction :	73
V.2.Présentation de l'organisme d'accueil	73
V.3.Déroulement du processus expérimental :	74
V.4.L'accord des différents instruments de mesures	81
V.5.Les résultats expérimentaux	83
Conclusion	101
Conclusion générale	102
Références bibliographiques	103

LA LISTE DES FIGURES

- Figure. I.1** : principales sources d'énergies et leurs utilisations.
- Figure.I.2** : Coordonnées horaires.
- Figure. I.3** : Les coordonnées géographiques.
- Figure.I.4** : la trajectoire du soleil.
- Figure.I.5** : la déclinaison du soleil
- Figure.I.6** : diagramme de la hauteur du soleil
- Figure.I.7** : la dénomination des angles.
- Figure. I.8** : rayonnement en fonction de la météo.
- Figure.I.9** : Interaction entre le rayonnement et l'atmosphère.
- Figure.I.10** : pyranomètre pour la mesure du rayonnement global.
- Figure.I.11** : rayonnement solaire reçu sur terre par le ciel clair.
- Figure. I.12** : fonctionnement d'un panneau solaire PV.
- Figure. I.13** : Les panneaux solaires PV
- Figure. I.14** : Les panneaux solaires thermiques
- Figure. I.15** : Fonctionnement des panneaux solaires thermiques
- Figure. I.16** : Capteur solaire plan.
- Figure. I.17** : Capteur solaire à tube sous vide.
- Figure. I.18** : Capteur solaire a air.
- Figure. I.19** : Distillateur solaire.
- Figure. I.20** : chauffe-eau solaire monobloc.
- Figure. I.21** : chauffe-eau solaire a éléments séparés.
- Figure.I.22** : cuve de stockage.
- Figure.I.23** : ballon de stockage.
- Figure.I.24** : ballon de stockage avec échangeur.
- Figure.I.25** :chaudier avec un système d'appoint.
- Figure.I.26** : chaudière avec deux sources d'énergies.
- Figure.I.27** : purgeur.
- Figure.I.28** : soupape de sécurité.
- Figure.I.29** : vase d'expansion.
- Figure.I.30** : débitmètre.
- Figure.I.31** : canalisation.

Figure. II.1: Composants du système de chauffage de l'eau

Figure. II.2: Systèmes directs

Figure. II.3: Système de chauffage indirect de l'eau chaude sanitaire

Figure. II.4: Circuit fermé avec réservoir de stockage et système d'échange de chaleur.

Figure. II.5 : Circuit fermé avec deux réservoirs de stockage et un système d'échangeur de chaleur

Figure. II.6 : Système solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau de la piscine

Figure. II.7 : Système de chauffage solaire actif

Figure. II.8: schéma de principe d'un système solaire pour chauffage collectif.

Figure. II.9: Système de chauffage et de production d'eau chaude solaire pour les sites isolés

Figure. II.10 : Pompe à chaleur eau/eau à assistance solaire pour le chauffage et l'ECS : 1 Stockage d'ECS ; 2 Stockage d'eau de chauffage ; 3 Chauffage électrique supplémentaire ; 4 Chauffage électrique d'ECS ; 5 Capteur solaire plat

Figure. III.1 : Différents échanges thermiques au sein du capteur

Figure. III.2 : schéma électrique équivalent d'un capteur solaire

Figure.IV.1 : Page de démarrage du logiciel

Figure. IV.2 : Sélection de fichier météorologique

Figure. IV.3 : les différentes caractéristiques du système de captation

Figure. IV.4 : les paramètres d'entrées du circuit solaire

Figure. IV.5 : les paramètres d'entrées de la cuve de stockage

Figure. IV.6 : les paramètres d'entrées des pompes de circulation

Figure. IV.7: les différentes dimensions de la tuyauterie

Figure. IV.8 : Les paramètres du radiateur

Figure. IV.9 : Le modèle finale d'un capteur solaire plan

Figure. IV.10 : Le modèle final des deux circuits raccordés

Figure.IV.11: Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps

Figure. IV.12 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps

Figure. IV.13 : Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps

Figure. IV.14: le rendement instantané en fonction du temps

Figure.IV.15 : Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps.

Figure.IV.16 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps.

Figure. IV.17: Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps.

Figure.IV.18 : le rendement instantané en fonction du temps

Figure.IV.19 : Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps.

Figure.IV.20 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps.

Figure.IV.21 : Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps.

Figure.IV.22 : le rendement instantané en fonction du temps.

Figure.V.1 : l'unité de développement des équipements solaires (UDES, CDER).

Figure.V.2: Schéma synoptique de l'installation.

Figure.V.3: les capteurs solaires posés sur la terrasse de l'UDES

Figure. V.4 : Système de stockage.

Figure.V.5 : les conduites isolées avec l'Armaflex.

Figure.V.6 : la résistance électrique avec son armoire.

Figure.V.7: l'isolation thermique de la cuve de stockage avant et après le début des travaux.

Figure.V.8 : le débitmètre.

Figure.V.9 : Thermomètre et manomètres mesurant la température et la pression.

Figure.V.10 : Le purgeur

Figure.V.11 : Vase d'expansion.

Figure.V.12 : Soupape de sécurité

Figure.V.13 : Systèmes de régulation des deux circuits.

Figure.V.14 : La mise en place des différents thermocouples.

Figure.V.15 : Le pyromètre et l'anémomètre

Figure.V.16: Les données météorologiques en fonction des températures de sorties

Figure. V.17 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de la température ambiante

Figure. V.18: les températures au niveau de la cuve de stockage en fonction des températures d'entrées et de sorties

Figure. V.19 : Les températures des différents bureaux en fonction des températures d'entrées et de sorties des radiateurs

Figure.V.20: Les données météorologiques en fonction des températures de sorties

Figure. V.21 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de la température ambiante

Figure.V.22 : les températures au niveau de la cuve de stockage en fonction des températures d'entrées et de sorties

Figure.V.23 : Les températures des différents bureaux en fonction des températures d'entrées et de sorties des radiateurs.

Figure.V.24 : Les données météorologique en fonction des températures de sorties

Figure.V.25: Les températures d'entrées et de sorties en fonction de la température ambiante

Figur.V.26 : les températures au niveau de la cuve de stockage en fonction des températures d'entrées et de sorties

Figure.V.27 : Les températures des différents bureaux en fonction des températures d'entrées et de sorties des radiateurs

Figure.V.28 : Les données météorologique en fonction des températures de sorties

Figure.V.29 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de la température ambiante

Figure.V.30 : les températures au niveau de la cuve de stockage en fonction des températures d'entrées et de sorties

Figure.V.31 : Les températures des différents bureaux en fonction des températures d'entrées et de sorties des radiateurs

Figure.V.32: Les performances pour le circuit solaire.

Figure.V.33 : Les performances pour le circuit du chauffage

Figure.V.34 : Les performances pour le circuit solaire

Figure.V.35 : Les performances pour le circuit du chauffage

Figure.V.36 : Les performances pour le circuit solaire

Figure.V.37 : Les performances pour le circuit du chauffage

Figure.V.38 : Les performances pour le circuit solaire

Figure.V.39 : Les performances pour le circuit du chauffage

Figure.V.40 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

Figure.V.41 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

Figure.V.42 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

Figure.V.43 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

Figure.V.44 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

Figure.V.45 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

LA LISTE DES TABLEAUX

Tableau.I.1 : potentiel solaire en Algérie.....	5
--	---

Liste des abréviations

CDER : Centre de développement des énergies renouvelables

CESI : Le chauffe-eau solaire individuel

CFD : analyses de dynamique des fluides numériques

ECS : L'eau chaude sanitaire

EMHV : Ester méthylique d'huile végétale

ETBE: L'éthyl-tertio-butyl-ether

ETC : capteurs à tubes sous vide

FPC : composé de capteurs plans

HC : hybride de chauffage

HTF : heat transfer fluid (fluide de transfert thermique)

SER : Source énergie renouvelable

SSC : système solaire combiné

TRNSYS : Transient System Simulation

UDES : Unité de Développement des Equipements Solaires.

Liste des symboles

τ	Transmittivité de la couverte transparente	
α	Absorptivité de la plaque absorbante.	
θ	Angle d'incidence	[degré]
σ	Constante de Stefan Boltzmann	[W/m ² .K ⁴]
ε_v	Émissivité de verre	
ε_{ab}	Émissivité de la plaque	
λ	Conductivité thermique de l'isolant	[W/m.K]
ξ_{cv}	Emissivité totale	
ξ_p	Emissivité infrarouge de l'absorbeur	
ξ_v	Emissivité infrarouge de la vitre	
$\dot{m}$	Débit de fluide à l'entrée de capteur Débit d'eau	[Kg/s]
A_{cap}	Surface du capteur	[m ²]
C	Facteur d'influence de l'inclinaison du capteur	
C_p	chaleur massique de l'eau	[J/Kg. K]
e	Épaisseur de l'isolant	[m]
f	facteur de forme géométrique	
F_R	Facteur de conductance.	
G	éclairement global	[W/m ²]
h_c	Coefficient d'échange par convection	[W/m ² .K]
h_{cv}	Coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur	[W/m ² .K]
h_{cva}	Coefficient de transfert du au vent	[W/m ² .K]
h_{cve}	Coefficient de pertes par convection du a la présence du vent	[W/m ² .K]
h_{rve}	Coefficient de pertes par rayonnement entre la vitre et l'environnement	[W/m ² .K]

N	Nombre de vitre	
Q_a	Énergie absorbée par l'absorbeur	[J]
q_{av}	La puissance absorbée par la vitre	
Q_p	Énergie perdue par le capteur dans l'environnement	[J]
Q_u	Énergie extraite du capteur pour le HTF	[J]
Q_u	Puissance utile du capteur	[KJ/h]
T_{amb}	Température ambiante	[°C]
T_{ab}	Température de l'absorbeur	[°C]
$T_{ab,m}$	Température moyenne de la plaque	[K]
T_e	Température à l'entrée du capteur.	[°C]
T_{mf}	Température moyenne du fluide	[°C]
T_p	Température de la plaque	[°C]
T_s	Température à la sortie du capteur.	[°C]
T_v	Température de vitrage	[°C]
$U_{arriere}$	Coefficient des pertes thermiques vers l'arrière	[W/m ² .K]
U_c	Coefficient de pertes globale	[W/m ² .K]

Introduction générale

En raison de la croissance rapide de la population et de l'économie mondiales, en particulier dans les pays en développement, la consommation totale d'énergie dans le monde a augmenté et devrait augmenter de 71 % entre 2003 et 2030. Les combustibles fossiles continuent de fournir une grande partie de l'énergie utilisée dans le monde, et le pétrole reste la principale source d'énergie. Par conséquent, les combustibles fossiles sont les principaux responsables du réchauffement de la planète.

La prise de conscience du réchauffement climatique s'est intensifiée ces derniers temps et a relancé la recherche de sources d'énergie indépendantes des combustibles fossiles et contribuant moins au réchauffement climatique. Parmi les sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles, les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire retiennent l'attention du public, car elles sont disponibles et ont moins d'effets néfastes sur l'environnement que les combustibles fossiles.

L'un des grands avantages de l'énergie solaire est l'utilisation de stratégies à la fois simples et complexes pour la capter et l'utiliser pour le chauffage des locaux et de l'eau. Il existe deux stratégies pour capter la puissance du soleil : le chauffage solaire actif et le chauffage solaire passif. Les systèmes d'énergie solaire active ont été associés à des pompes à chaleur pour le chauffage de l'eau et/ou des locaux.

Les systèmes de chauffage solaire sont un type de technologie d'énergie renouvelable qui a été de plus en plus utilisé au cours de la dernière décennie pour fournir du chauffage, de la climatisation et de l'eau chaude sanitaire (ECS) aux bâtiments.

Les performances d'un système de chauffe-eau solaire est très dépendant de son orientation, les propriétés optiques et géométriques, les climatiques, la situation géographique, les paramètres de fonctionnement et la durée d'utilisation.

L'Algérie, grâce à sa situation géographique, occupe une position privilégiée dans l'exploitation de l'énergie solaire avec une durée d'ensoleillement moyenne annuel de 3000heures /an, est parmi les potentiels les plus élevés au monde.

Ce travail est consacré à une analyse de performances d'une installation de chauffage solaire collectif utilisée pour le chauffage des locaux, cette analyse a été effectuée à travers une étude théorique et expérimentale d'une installation de chauffage solaire collective, pour cela nous avons établis le plan de travail suivant :

- Le premier chapitre présente quelques généralités, il est divisé en deux parties, le rayonnement solaire fait l'objet de la première partie, où sont données quelques rappelles astronomiques, et les divers applications de l'énergie solaire. La deuxième partie du chapitre est consacrée aux systèmes de chauffages solaires individuels et collectifs
- Le chapitre 2 est consacré à l'étude bibliographique et l'état de l'art des systèmes de chauffage solaires.
- La modélisation thermique fait l'objet du chapitre 3, où sont donnés les différents échanges thermique au sein d'un capteur solaire plan, ainsi que les pertes thermique arrières et latérales.
- Les résultats de la simulation sont présentés dans le chapitre 4, avec une étude détaillée où sont pris en considération tous les paramètres influençant sur le rendement de l'installation.
- Dans le chapitre 5, nous présentons notre installation solaire étudié, l'étude expérimentale de cette dernière nous a permet de valider les résultats théoriques obtenus
- Enfin, on termine par une conclusion générale regroupant les conclusions sur les différents chapitres, clôturés par quelques recommandations afin d'enrichir ce travail dans le future.

Chapitre 1 : Généralités

Chapitre 1 : Généralités

I. Introduction :

Il existe deux types d'énergies, les énergies fossiles, et les énergies renouvelables :

Les énergies fossiles désignent l'énergie que l'on produit par fossilisation des êtres vivants : pétrole, gaz naturel, charbon.....

Les énergies renouvelables, sont issues de phénomènes naturels.

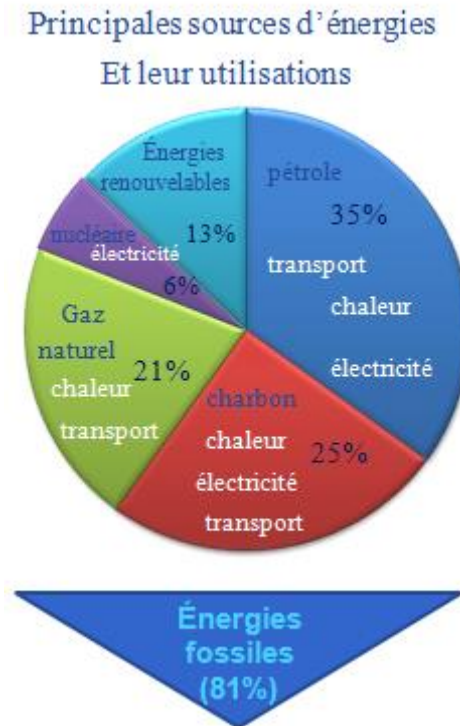


Figure. I.1 : principales sources d'énergies et leurs utilisations.

I.1. Les énergies fossiles :

On peut classer les sources d'énergie suivantes dans la catégorie des sources d'énergie fossiles :

- Le pétrole et ses dérivés ;
- Le gaz naturel, que l'on pourrait éventuellement classer comme dérivé du pétrole ;
- Le charbon ;
- On peut caractériser une source d'énergie fossile par des ressources finies et épuisables, aussi on constate que :
- Les gisements sont localisés, généralement difficiles d'accès et éloignés des zones de consommation ;

Chapitre 1 : Généralités

- Leur usage est polluant ; plus généralement il a un impact environnemental difficilement réversible.

I.2. Les énergies renouvelables :

Ce sont des énergies inépuisables, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes.

Ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel.

En Algérie, elles sont très peu utilisées, malgré un gisement solaire fortement appréciable. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

I.2.1. Le solaire photovoltaïque :

Des modules solaires produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil. Ils alimentent des sites isolés ou le réseau de distribution général.

L'intégration à l'architecture est l'avenir du photovoltaïque dans les pays industrialisés.

I.2.2. Le solaire thermique :

Les capteurs solaires produisent de l'eau chaude sanitaire. Ils peuvent être aussi utilisés pour le chauffage.

Plusieurs dizaines de millions de mètres carrés de capteurs sont installés dans le monde.

Les capteurs solaires dits "haute température" produisent de l'électricité par vapeur interposée, quelques grandes centrales de ce type existent dans le monde.

I.2.3. L'Energie Eolienne :

Les aérogénérateurs, mis en mouvement par le vent, fabriquent des dizaines de millions de MWh. Utile dans les sites isolés, cette électricité alimente aussi les grands réseaux de distribution.

Les éoliennes mécaniques servent à pomper de l'eau dans de nombreux pays.

I.2.4. La biomasse :

(Masse des végétaux) réunit le bois, la paille, les rafles de maïs, le biogaz et les biocarburants :

Le bois énergie représente 14 % de la consommation énergétique mondiale. Issu des déchets de la forêt ou des industries du bois, il est brûlé pour produire de la chaleur.

Chapitre 1 : Généralités

Le biogaz est issu de la fermentation des déchets organiques. Sa combustion produit de la chaleur, mais également de l'électricité par cogénération.

Les biocarburants proviennent de plantes cultivées (tournesol, betterave, colza...).

Le biodiesel (ou ester méthylique d'huile végétale, EMHV), l'éthanol, et son dérivé, l'éthyl-tertio-butyl-ether, l'ETBE sont les plus courants. Ils sont mélangés à de l'essence ou à du gazole.

I.2.5. La géothermie

Cette énergie utilise la chaleur du sous-sol. Avec une température moyenne ou faible, on chauffe des locaux, alors qu'une température élevée permet de produire de l'électricité par vapeur interposée.

I.3. Les énergies renouvelables en Algérie :

I.3.1. Potentiel solaire en Algérie :

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires 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).

Tableau. I .1 : 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 (kWh/m ² .an)	1700	1900	2650

I.3.2. Potentiel éolien en Algérie :

L'Algérie à un régime de vent modéré (2 à 6 m/s) Ce potentiel énergétique convient parfaitement pour le pompage de l'eau particulièrement sur les Hauts Plateaux.

Chapitre 1 : Généralités

I.3.3. Potentiel géothermique en Algérie :

Plus de deux cent (200) sources chaudes ont été inventoriées dans la partie Nord du Pays.

Un tiers environ (33%) d'entre elles ont des températures supérieures à 45°C. Il existe des sources à hautes températures pouvant atteindre 118°C à Biskra

I.4. Le rayonnement solaire :

I.4.1. Généralités sur le soleil :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie de forme sphérique de 14×10^5 Km de diamètre, sa masse est de l'ordre 2×10^{30} Kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments.

C'est l'étoile la plus proche de la terre avec une distance de 150 millions de kilomètres. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qui l'émet sous forme d'onde électromagnétique ; 30% de cette puissance est réfléchi vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère. [1], [2].

I.4.2. Le soleil, source d'énergie :

Afin de garantir leur avenir énergétique, plusieurs pays se sont penchés sur le développement des énergies renouvelables et plus particulièrement l'énergie solaire.

Cette forme d'énergie présente des avantages suivants : Non polluante et gratuite.

Malheureusement des caractéristiques défavorables qui limitent considérablement ces applications.

I.4.3. Relations géométriques entre la Terre et le soleil : [3]

La Terre décrit un tour complet autour de son axe en approximativement 24 heures. La caractéristique la plus importante de cette rotation est le fait que son axe de rotation est incliné de $23^\circ 27'$ par rapport au plan de l'écliptique. Cette inclinaison fait que le jour et la nuit n'ont pas une durée identique en différents points de la Terre, et c'est à elle que l'on doit les saisons



Chapitre 1 : Généralités



Figure.I.2 : Coordonnées horaires.

I.4.4. Coordonnées Géographiques : [3]

- La latitude est une mesure angulaire s'étendant de 0° à l'équateur à 90° aux pôles.
- La longitude est une mesure angulaire sur 360° par rapport à un *méridien de référence*, avec une étendue de 180° Ouest à 180° Est.
- Le méridien de Greenwich est le méridien de référence (il sert aussi de référence pour les fuseaux horaires).

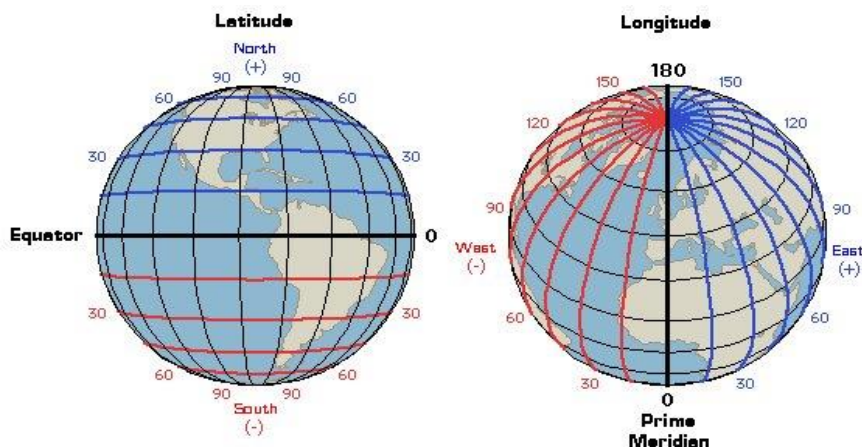


Figure. I.3 : Les coordonnées géographiques.

I.4.5. Coordonnées horizontales :

Repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

I.4.6. Hauteur du soleil :

C'est l'angle h formé par le plan horizontal au lieu d'observation et la direction du soleil, Il est donné par la relation :

Chapitre 1 : Généralités

$$\sin(h) = \sin(\varphi)\sin(\delta) + \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) \quad \dots\dots\dots(I.1)$$

Avec φ, δ, ω , sont respectivement la latitude du lieu, la déclinaison du soleil et l'angle horaire.

I.4.7. Azimut du soleil :

C'est l'angle compris entre le méridien du lieu et le plan vertical passant par le soleil. La connaissance de l'azimut du soleil est indispensable pour le calcul de l'angle d'incidence des rayons sur une surface non horizontale. [2]

$$\cos(a) = \frac{\sin(h) \cdot \sin(\varphi) - \sin(\delta)}{\cos(\varphi) \cdot \cos(h)} \quad (I.2)$$

I.5. Trajectoire du soleil : [4]

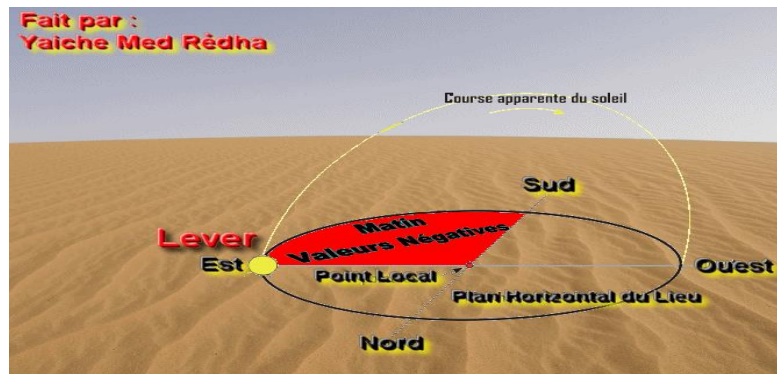


Figure.I.4 : la trajectoire du soleil.

I.5.1. Déclinaison du soleil :

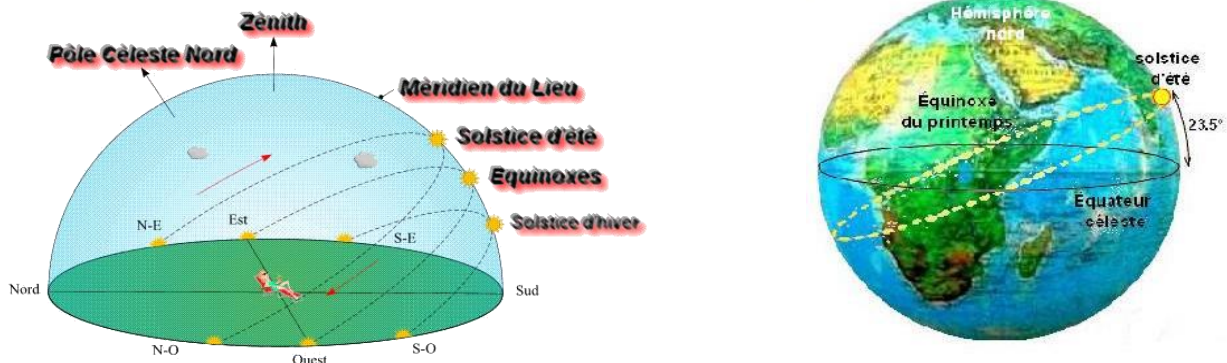


Figure.I.5 : la déclinaison du soleil.

Chapitre 1 : Généralités

La hauteur maximale du soleil dans le ciel est assez facile à calculer :

- Équinoxes : $90^\circ - \text{latitude}$
- Solstices : $(90^\circ - \text{latitude}) \pm 23^\circ 45'$
- Les autres jours : $(90^\circ - \text{latitude}) \pm \text{la déclinaison du soleil}$.

I.5.2. Diagramme de la hauteur du soleil :

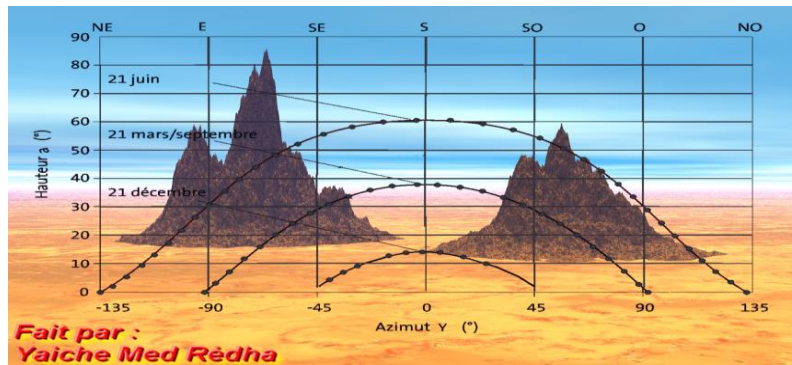


Figure.I.6 : diagramme de la hauteur du soleil.

I.5.3. Dénomination des angles :

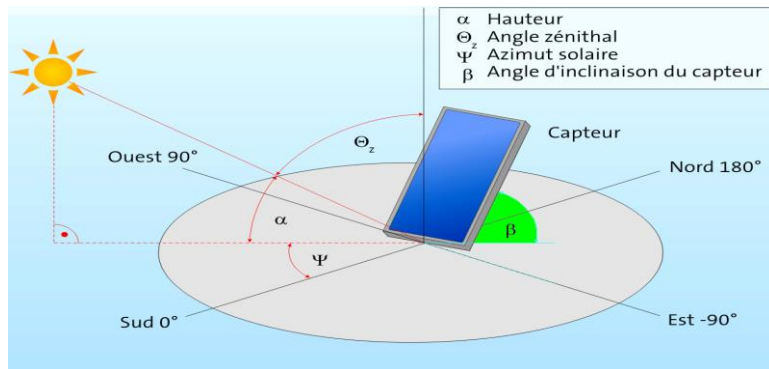


Figure.I.7 : la dénomination des angles.

I.6. Rayonnement solaire en fonction de la météo :



Chapitre 1 : Généralités

Figure. I.8 : rayonnement en fonction de la météo.

I.6.1. Interaction entre le rayonnement solaire et l'atmosphère terrestre :

Après avoir subi les diverses extinctions lors de sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire atteint le sol sous forme de rayonnement direct et diffus, et dont la composante totale est le rayonnement global.

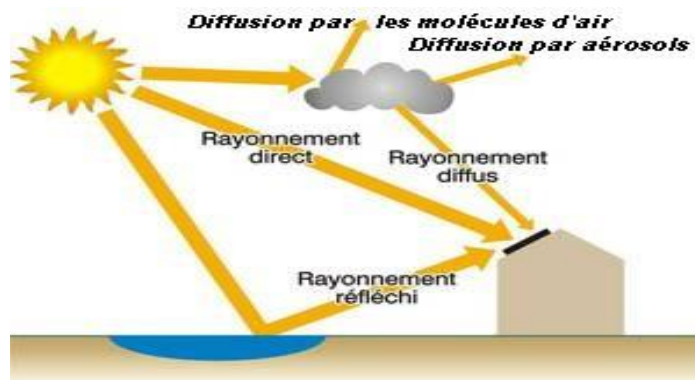


Figure.I.9 : Interaction entre le rayonnement et l'atmosphère.

I.6.2. Mesure du rayonnement solaire global :

Le rayonnement global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus sur une surface de réception horizontale. Le pyranomètre est essentiellement constitué d'une thermopile à surface noircie, fixée à l'intérieur d'un boîtier cylindrique en laiton chromé, protégée à sa partie supérieure par deux coupelles hémisphériques en verre.



Figure.I.10 : pyranomètre pour la mesure du rayonnement global.

Chapitre 1 : Généralités

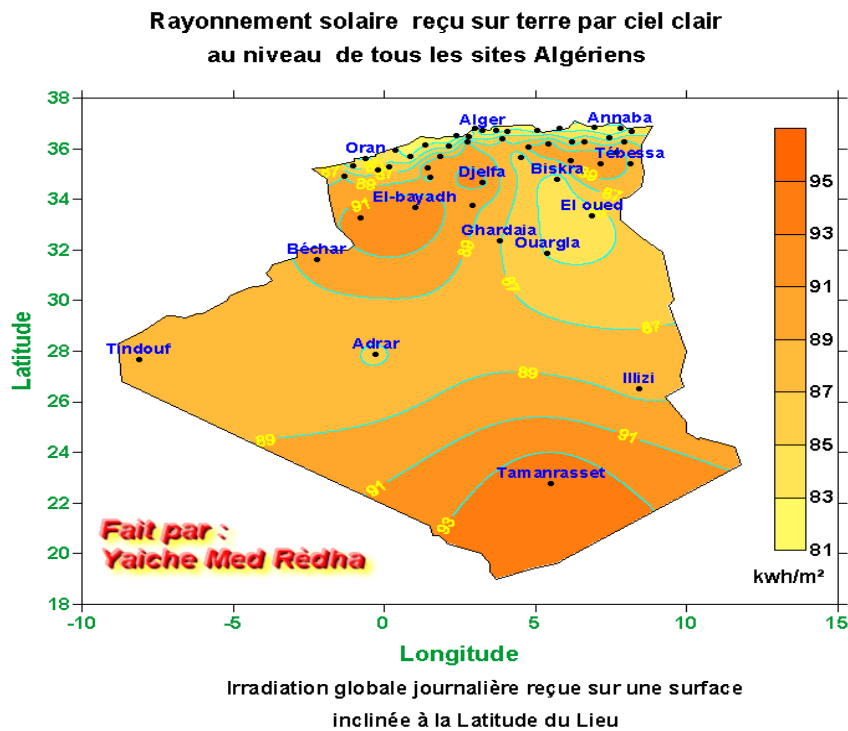


Figure.I.11 : rayonnement solaire reçu sur terre par le ciel clair.

I.6.3. Application de l'énergie solaire :

Dans le domaine de l'énergie solaire on distingue plusieurs applications comme le solaire thermique, et le solaire photovoltaïque. Le principe de fonctionnement de ces applications diffère d'une technologie à une autre.

I.6.4. Solaire photovoltaïque :

C'est la transformation directe de la lumière en électricité à l'échelle atomique par des panneaux solaires constitués des matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, ils ont une capacité de transformer la lumière (Photons) en électricité (électrons). Le principe de cet effet est que la collision entre un photon et un semi-conducteur (silicium) produit des charges positives et négatives qui engendrent un courant. Le silicium est utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques qui produisent un courant continu. Pour être injecté dans le réseau, il doit être transformé en courant alternatif à travers un onduleur.

Chapitre 1 : Généralités

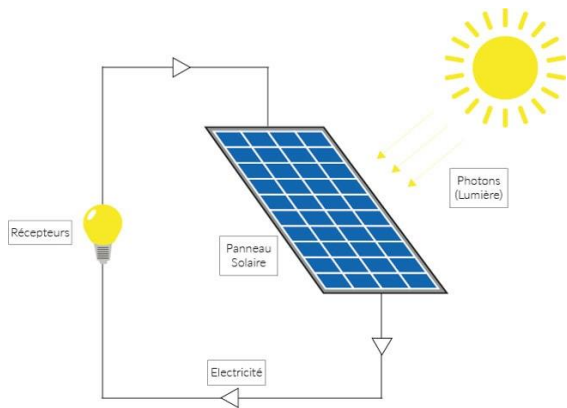


Figure. I.12: fonctionnement d'un panneau solaire PV. **Figure. I.13:** Les panneaux solaires PV.

I.6.5. Solaire thermique :

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage soit pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

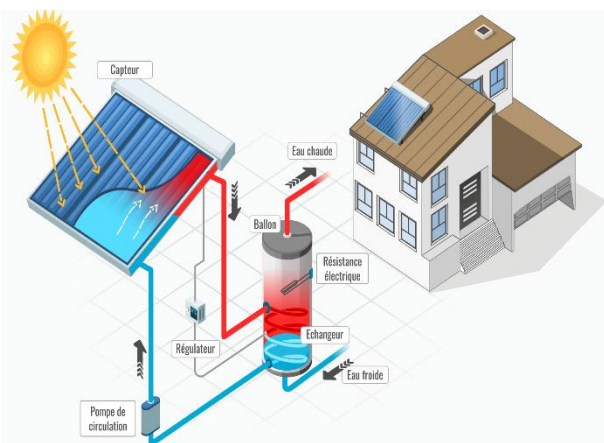


Figure. I.14 : Les panneaux solaires thermiques. **Figure. I.15 :** Fonctionnement des panneaux solaires thermiques.

➤ Capteur solaire plan :

Chapitre 1 : Généralités

Un capteur solaire plan est composé d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant (l'absorbeur), et d'un système de transfert de chaleur par le fluide « caloporteur », d'une isolation thermique arrière et latérale, une couverture transparente qui assure l'effet de serre et évite le refroidissement de l'absorbeur en le protégeant du vent.

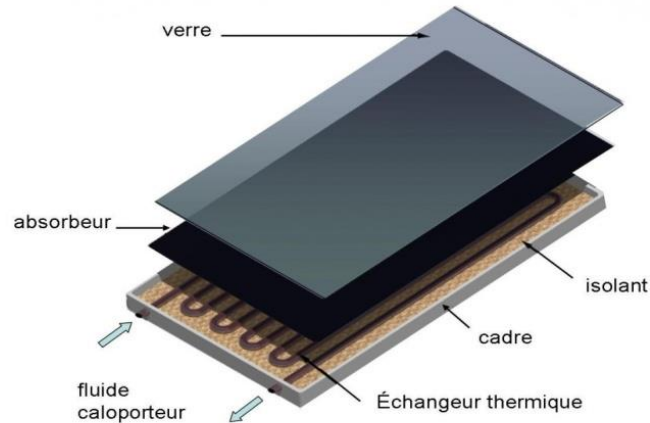


Figure. I.16 : Capteur solaire plan.

➤ Capteur solaire à tube sous vide :

Il est constitué d'une série de tubes transparents sous vide qui isolent l'absorbeur. On Le rôle du vide, dans ces tubes, est de réduire les déperditions de chaleur par convection et par conduction thermique. L'intensité du vide est d'une importance décisive pour l'interruption du mécanisme de transfert de chaleur.

Ce type de capteurs s'échauffent plus rapidement ils permettent de mieux profiter de l'éclairement du soleil du matin et du soir. Ils peuvent aussi t atteindre des températures extrêmes de plus de 150° C, le fluide caloporteur est spécialement développé pour ce genre d'installation.

Chapitre 1 : Généralités

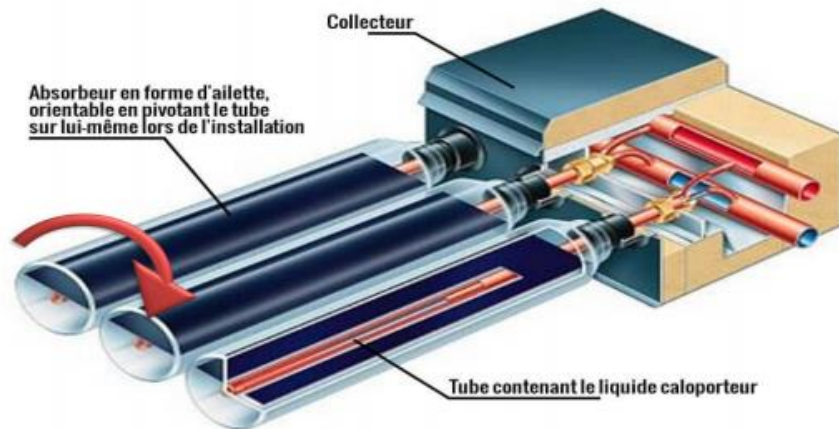


Figure. I.17 : Capteur solaire à tube sous vide.

➤ Capteur solaire à air :

Les capteurs solaires à air transforment l'énergie radiante du soleil en énergie thermique extraite par l'air en écoulement dans le capteur. Cette énergie est utilisée dans différentes applications solaires, comme par exemple, le séchage des produits agro-alimentaire (figues, thé, café, riz...), le chauffage des locaux industriels ou à usage d'habitation, ainsi que dans la réfrigération solaire.



Figure. I.18 : Capteur solaire a air.

➤ Distillateur solaire :

La distillation solaire est une technique qui utilise le rayonnement solaire pour chauffer de l'eau saumâtre dans un bac couvert par une vitre inclinée. L'eau dans le bac s'évapore et la vapeur d'eau se condense sur la surface de la vitre. La condensation forme des gouttes d'eau pures qui coulent sur la vitre inclinée pour être récupérées dans un récipient propre.

Chapitre 1 : Généralités

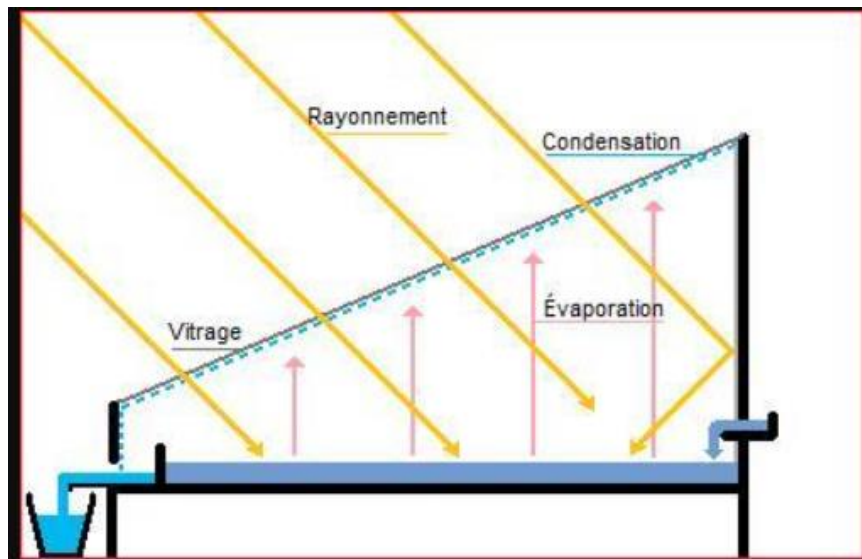


Figure. I.19 : Distillateur solaire.

Pour notre travail on va étudier le chauffe-eau solaire, dans ce qui suit on va détailler sur ce dernier ainsi que ses différents composants

I.7. Le chauffe-eau solaire : [4]

Le chauffe-eau solaire individuel (C.E.S.I.) est composé de panneaux (ou capteurs) solaires vitrés (verre trempé) qui absorbent le rayonnement solaire et réchauffent ainsi un liquide caloporteur (eau + antigel) contenu dans un réseau de tuyauterie. Ce circuit primaire permet de réchauffer l'eau contenu dans un ballon de stockage. Des accessoires assurent le bon fonctionnement du système : circulateur ou pompe, régulateur thermique.

I.7.1. Différents types de chauffe- eau solaires :

Il existe 2 types de chauffe-eau solaires :

1. Le chauffe- eau monobloc.
2. Le chauffe-eau solaire à éléments séparés.

Monobloc :

Le chauffe-eau solaire "*monobloc*", relie les capteurs et le ballon dans un seul composant. Son fonctionnement est autonome et son installation très simple. C'est le chauffe-eau solaire le moins cher et un grand nombre sont utilisés à travers le monde.

Chapitre 1 : Généralités



Figure. I.20 : chauffe-eau solaire monobloc.

A éléments séparés :

Le chauffe- eau solaire à éléments séparés est adapté à toutes les différentes configurations.

Le ballon peut être installé dans une cave ou éloigné des capteurs.

Ce type de chauffe-eau solaire est plus coûteux que le précédent.



Figure. I.21 : chauffe-eau solaire a éléments séparés.

I.7.2. Différents composants du chauffe- eau solaire :

Le chauffe- eau solaire individuel est composé essentiellement de deux systèmes :

- le système de captation ;

Chapitre 1 : Généralités

- le système de stockage.

I.7.3. Système de captation :

Il est déterminé par le type d'application recherchée, la fiabilité, le prix et les températures souhaitées : les capteurs plans ordinaires ont un rendement plus élevé pour la production d'eau chaude de basse température 40-50 °C alors que les capteurs sous vide sont mieux adaptés pour produire des températures plus élevées (60-100 °C). Les capteurs sous vide sont généralement plus chers.

I.7.4. Différents types de capteurs :

▪ Capteurs sous vides :

Gamme de températures : $T > 70^{\circ}\text{C}$

Applications

- Chauffage d'eau sanitaire.
- Chauffage des locaux.
- Climatisation solaire.



▪ Capteurs sans vitrage :

Gamme de températures : $T < 30^{\circ}\text{C}$

Applications

- Chauffage piscines.
- Le préchauffage de l'eau sanitaire.



▪ Capteur solaire plan :

Gamme de températures $30^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$

Applications

- Chauffage d'eau sanitaire.
- Chauffage des locaux.



Chapitre 1 : Généralités

I.7.5. Constituants du capteur solaire :

Le capteur plan est constitué de :

Une couverture transparente : Elle est formée de préférence en verre (excellente résistance au vieillissement / matières synthétiques), pauvre en oxyde de fer (laisse passer plus de rayonnement que le verre ordinaire) et trempé (incassable, résiste aux chocs thermiques et aux températures élevées). Elle est généralement de 4mm d'épaisseur.

Un absorbeur : C'est la partie essentielle du capteur, elle est composée d'une plaque noire qui transfère la chaleur absorbée vers le fluide caloporteur qui la parcourt. Il doit avoir un haut coefficient d'absorption et un coefficient d'émissivité bas (couche sélective).

Tube : 8mm pour la circulation forcée
 12mm thermosiphon

Collecteur ; 22 mm

Une isolation : Les caractéristiques doivent lui permettre de résister aux hautes températures (200°C) et d'être imputrescible. 30 mm d'épaisseur mousses de polyurethane ou de laine de verre.

Un coffre ; Le coffre ou le boîtier constitue l'enveloppe arrière et latérale du capteur, ses fonctions sont multiples :

- La cohésion de l'ensemble ;
- La protection mécanique ;
- La fixation et l'étanchéité.

I.8. Système de stockage :

I.8.1. Définition :

Le réservoir de stockage permet d'accumuler cuve est primordial vis-à-vis des pertes de chaleur, de la longévité et de l'entretien. Le plus adéquat est l'acier inoxydable. Il réduit les pertes de chaleur par conduction entre la partie supérieure (chaude) et inférieure (froide) de la cuve. En outre, sans nécessité d'entretien, il offre d'excellentes garanties face aux problèmes de corrosion. D'autre part, les réservoirs de stockage installés verticalement garantissent une meilleure stratification thermique de l'eau que les réservoirs disposés horizontalement. Enfin, il est important que la distance aux points de puisage de l'eau soit la plus courte possible pour éviter les pertes thermiques dans les canalisations qui doivent être calorifugées.

I.8.2. Constituant de la cuve :

Chapitre 1 : Généralités

La cuve de stockage a une forme cylindrique avec soit des fonds plats ou bombés, réalisée en acier inoxydable ou en galvaniser, pour mieux emmagasiner l'eau chaude cette cuve est isolée par de la mousse polyuréthane ou en laine de verre.

La paroi intérieure doit être garnie d'un revêtement protecteur, de qualité alimentaire, et qui doit assurer la résistance contre la corrosion et contre les températures qui peuvent dépasser les 80°C.

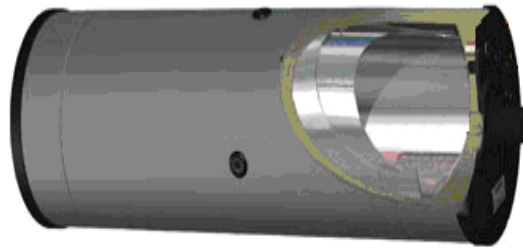


Figure. I.22 : cuve de stockage.

I.8.3. Différents types de ballons de stockage

▪ Avec échangeur

En acier inoxydable ou galvanisé.

Dans le cas de la galvanisation, la paroi intérieure doit être garnie d'un revêtement protecteur, de qualité alimentaire. Ce revêtement doit assurer la résistance contre la corrosion et contre les températures qui peuvent dépasser 80 °C. Elle peut être aussi emmaillée.

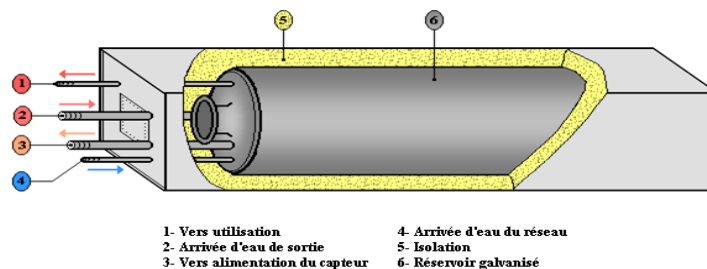


Figure. I.23 : ballon de stockage.

▪ Sans échangeur

Utile en cas de risque de gel ou d'eau corrosive ou entartré, il devra alors présenter les caractéristiques suivantes :

- Matériau compatible avec celui du ballon, des conduites de raccordement et du fluide primaire employé.
- Implantation en partie basse du ballon solaire.
- Surface d'échange suffisante, de manière à assurer un coefficient d'échange minimal de 50W/K par m² de capteur.

Chapitre 1 : Généralités

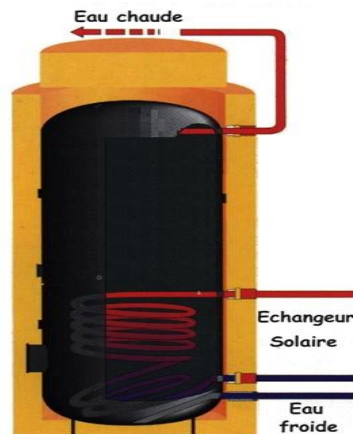


Figure. I.24 : ballon de stockage avec échangeur.

I.8.4. Système d'appoint (Intégration à une installation existante) :

S'il n'y a plus assez, ou plus du tout de soleil, un dispositif d'appoint prend le relais pour reconstituer le stock d'eau chaude.

Le chauffe-eau solaire muni d'une résistance électrique sera conforme aux normes en vigueur ;
La résistance électrique sera située dans la moitié supérieure du ballon ;

L'appoint est indispensable pour assurer la permanence du service d'eau chaude en hiver, en demi-saison ou par longue période de mauvais temps.

Cumulus électrique

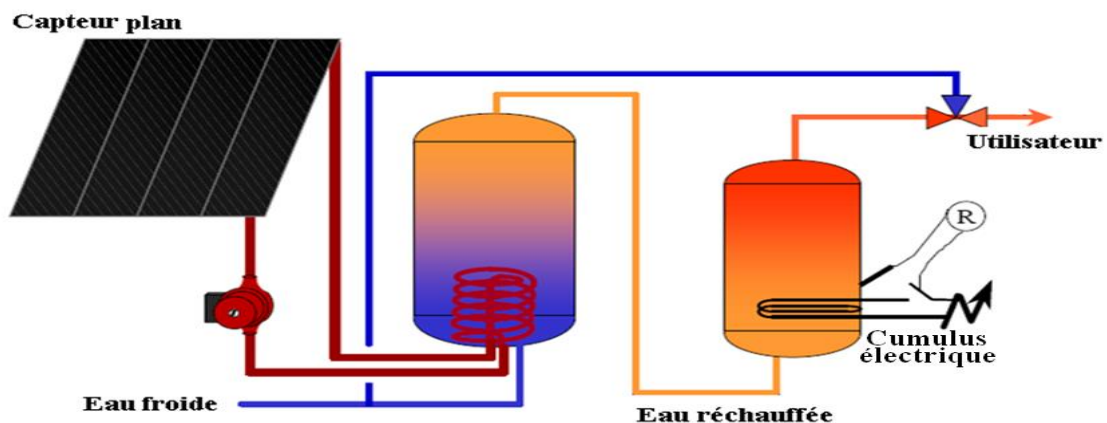


Figure. I.25 : chaudière avec un système d'appoint.

Chaudière

Chapitre 1 : Généralités

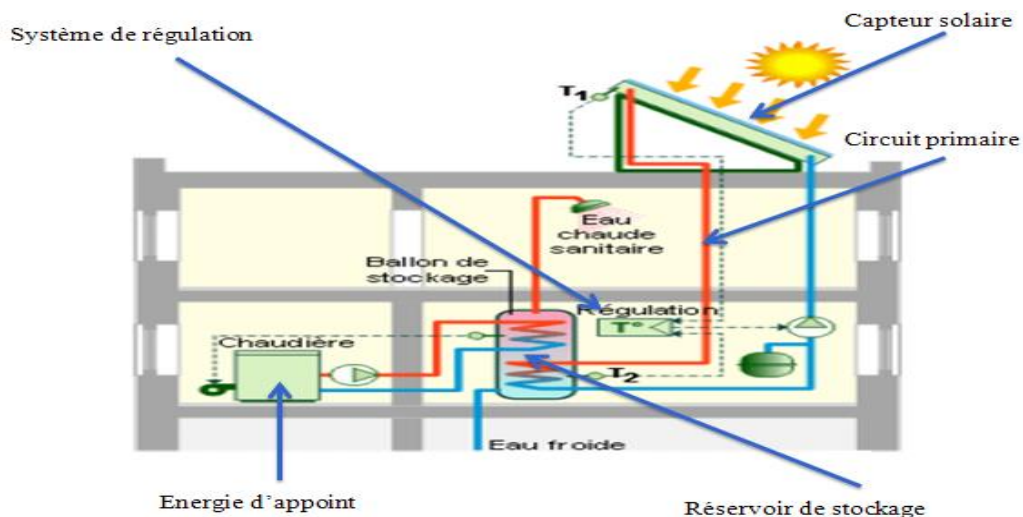


Figure.I.26 : chaudière avec deux sources d'énergies.

I.8.5. Principe de fonctionnement du chauffe-eau solaire

Le Thermosiphon :

Les chauffe-eau solaires « en thermosiphon » sont dépourvus de pompe (et de régulation). Le liquide caloporteur circule grâce à la différence de densité entre ce liquide et l'eau du ballon. Tant qu'il est plus chaud, donc moins dense que l'eau stockée, le liquide primaire s'élève en effet naturellement, par thermo-circulation. Thermosiphon veut dire que la circulation de la chaleur passe des capteurs au ballon naturellement sans pompe ou autre dispositif, grâce à les différences de température. Pour ce faire, le ballon doit impérativement être placé plus haut que les capteurs et les circuits hydrauliques doivent être installés dans les règles de l'art afin de faciliter la thermo-circulation. Le fonctionnement de ce type de chauffe-eau solaire est très simple et les risques de pannes sont faibles. Les coûts sont restreints et les performances, surtout dans les régions ensoleillées sont excellentes.

Avantages

- Autorégulation.
- Le débit s'adapte au rayonnement capté.

Inconvénients

- Impossible de limiter la température maximale du réservoir.
- Il ne peut être utilisé en période de gel relativement prolongée.
-

I.9. Mise en œuvre du circuit primaire

I.9.1. Purgeur

Chapitre 1 : Généralités

Il est placé dans le circuit primaire, il est chargé d'évacuer d'éventuelles surpressions.

Il sert à dégazer tout l'air se trouvant dans le circuit.

Sa pression maximale est de 4 bars.



Figure. I.27 : purgeur.

I.9.2. Soupape de sécurité

Une soupape de sécurité munie d'un manomètre destinée à évacuer les surpressions en cas de surchauffe de l'installation.

En été en cas de dysfonctionnement, la soupape peut provoquer l'évacuation d'une partie du fluide caloporteur.



Figure. I.28 : soupape de sécurité.

I.9.3. Vase d'expansion :

L'eau se dilate en chauffant. Pour éviter que l'installation n'éclate, on ajoute un vase d'expansion. Son volume devra être suffisant pour encaisser la dilatation de l'eau entre 4° à 90°C.

Un vase d'expansion permet le maintien de la pression quelle que soit la température de l'eau dans le circuit.

Il est placé entre le ballon et le capteur placé du côté aspiration de la pompe de circulation, chargé d'absorber les différences de volume et de récolter la totalité du fluide caloporteur expulsé des capteurs en cas de surchauffe.

En pratique, il convient de multiplier ce chiffre, en tenant compte :

Chapitre 1 : Généralités

1. Du volume de l'antigel (coefficient de dilatation supérieur à celui de l'eau).
2. Les températures qui peuvent descendre très bas pendant la nuit.



Figure.I.29 : vase d'expansion.

I.9.4. Circulateur :

En général, Les fabricants des capteurs solaires recommandent un débit qui est compris entre 40 et 70 litres par heure et par m².

Certains fabricants fournissent des circulateurs à débit réglables sur 3 positions. Cette position est définie en fonction des longueurs aller-retour de raccordement des capteurs au ballon, du diamètre du tube utilisé et de la surface de capteurs installés.

Par prudence pour éviter un vieillissement prématuré du circulateur dû à la chaleur, on placera le circulateur en amont des capteurs car l'eau y sera moins chaude.

Il faut surtout éviter de disposer le circulateur au point bas de l'installation afin que les dépôts s'y accumulant ne le détériorent pas.



Figure.I.30 : débitmètre.

I.9.5. Tuyauterie

Dans la pratique, les matériaux utilisés pour la tuyauterie, hors recommandations particulières du fabricant, sont généralement le cuivre, l'acier et l'inox flexible.

L'acier galvanisé ne supporte pas les températures supérieures à 60°. Il ne doit pas être installé en amont d'une portion de circuit en cuivre.

Il est nécessaire de prévoir une protection anti UV pour l'isolation.

Chapitre 1 : Généralités

L'isolation doit être d'une épaisseur suffisante selon les conditions climatiques de chaque régions (exemple Djelfa ce n'est pas comme Alger).

Il faut éviter les points ou s'enferme de l'air. Si cela n'est pas possible, il faut prévoir un purgeur à cet endroit.

Les diamètres doivent être de 18 à 22 mm pour des distances allant jusqu'à 20 mètres et 15 mm pour une distance allant jusqu'à 12 mètres.

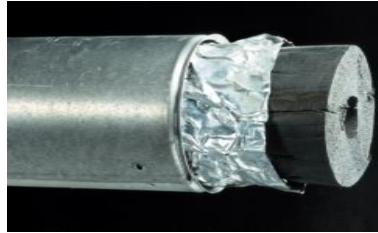


Figure.I.31 : canalisation.

I.9.6. Fluide caloporteur :

Le remplissage du système peut se faire soit depuis la partie haute du capteur, grâce à l'apesanteur, soit à l'aide d'une pompe à éprouve depuis le kit. La pression de fonctionnement est entre 1.5 à 3 bars.

Pendant le remplissage il est recommandé d'agiter périodiquement le système pour éviter le blocage d'air à l'intérieur du réservoir et du capteur.

On peut utiliser une moitié de l'eau de pluie et moitié l'eau distillée pure (qui est corrosive).

Il est recommandé de placer un bac de rétention sous le kit hydraulique pour retenir d'éventuelles fuites d'eau, et doit être effectué le matin ou le soir pour éviter une montée rapide en température.

Tout remplissage doit être accompagné d'un dégazage en ouvrant les bouchons de tous les purgeurs d'air.

I.9.7. Connexion électrique :

Pendant le transport et l'installation du thermostat, il faut éviter de le faire tomber, car cela peut produire un risque majeur.

Dans le cas où les besoins sont limités dans la journée après 17h et avant 10 h, il est recommandé d'utiliser un disjoncteur.

Avant l'installation il faut vérifier la tension utilisée.

I.9.8. Protection contre le calcaire :

Chapitre 1 : Généralités

L'eau contient des sels dissous en proportion variable sous l'action de la chaleur il se forme un dépôt très insoluble appelé tartre qui s'accumule.

Ce dépôt est mauvais conducteur de chaleur et provoque une baisse de rendement.

Une conduite entartée voit son diamètre diminuer est donc les pertes de charges augmentent.

L'utilisation d'un adoucisseur d'eau est recommandée.

I.9.9. Protection contre la corrosion :

L'anode de magnésium doit être contrôlée au moins 2 fois par an en fonctionnement normal et les contrôles doivent être intensifiés en présence d'eaux particulièrement agressives.

La cuve en acier vitrifié assure une protection complète contre la corrosion de la surface intérieure, soudures comprises pour une longévité maximale.

I.9.10. Protection contre le gel :

Il est très important de respecter les proportions mentionnées par les constructeurs (ces proportions sont en fonction du site).

I.10. Mise en œuvre du circuit secondaire :

Régulation solaire :

L'installation solaire thermique de production d'eau chaude est totalement automatisée.

Ce système possède plusieurs organes de régulation (généralement contenu dans un seul boîtier), avec entre autres un appareil de régulation pour le circuit primaire, qui commande le circulateur et celui du circuit de transfert, un appareil de régulation commandant le circulateur de la chaudière et le circulateur de la conduite.

Elle compare à tout moment la température du capteur et celle de la partie basse ou médiane du ballon.

Si le ballon est le plus chaud, la régulation arrête le fonctionnement du circulateur. A l'inverse, quand le capteur est plus chaud que le ballon, le circulateur est automatiquement remis en route, et le liquide primaire transmet sa chaleur à l'eau sanitaire du ballon.

Conclusion :

La généralisation des énergies renouvelables, telles que le solaire, l'éolien, l'hydroélectrique et la géothermie, est impérative pour opérer une transition vers un avenir énergétique durable. Ces sources d'énergie, par leur caractère inépuisable et leur faible impact environnemental, représentent une alternative aux énergies fossiles, dont l'utilisation est à la fois limitée dans le temps et préjudiciable à l'environnement.

Chapitre 1 : Généralités

L'Algérie bénéficie d'un potentiel notable en énergie solaire, éolienne et géothermique. Cependant, l'exploitation des énergies renouvelables reste marginale dans le pays, ne contribuant qu'à une part modeste de la consommation d'électricité totale.

La transition vers un système énergétique largement alimenté par des sources d'énergie renouvelables est indispensable pour garantir un avenir durable sur les plans environnemental et économique. L'Algérie, tout comme d'autres pays, joue un rôle important dans cette transition en exploitant pleinement son potentiel en énergies renouvelables.

L'utilisation des chauffe-eau solaire pour la production de l'eau chaude sanitaire et pour le chauffage des locaux peut être utilisée comme une alternative aux autres systèmes conventionnels électrique et gaz, mais cela repose sur une bonne maîtrise de ces systèmes à savoir : les matériaux utilisés dans la fabrication, une bonne isolation thermique, ainsi que le type de montage pour les installations collectives.

CHAPITRE 2 : ETAT DE L'ART

II. Les systèmes solaires de chauffage de l'eau et des locaux :

II.1.Introduction :

Parmi les sources d'énergie alternatives aux combustibles fossiles, les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire retiennent l'attention du public, car elles sont disponibles et ont moins d'effets négatifs sur l'environnement que les combustibles fossiles. Les systèmes de chauffage solaire sont un type de technologie d'énergie renouvelable qui a été de plus en plus utilisé au cours de la dernière décennie pour fournir du chauffage, de la climatisation et de l'eau chaude sanitaire (ECS) aux bâtiments. Ce chapitre passe brièvement en revue les technologies de chauffage assurées par l'énergie solaire disponibles et leurs avancées récentes. Il décrit ainsi les principaux types de systèmes de chauffage solaire des locaux et de l'eau, en se concentrant sur les classifications, les composants du système et les principes de fonctionnement. Il se concentre également sur les systèmes actifs et combinés. En outre, certaines instructions d'installation, de fonctionnement, d'entretien et de contrôle des systèmes de chauffage solaire sont présentés et des exemples d'application des systèmes de production d'eau chaude sanitaire et des systèmes combinés sont présentés aussi, enfin quelques travaux de recherches publiés dans le domaine sont décrits et présentés.

II.2.Systèmes de chauffage solaire de l'eau :

La part de l'énergie utilisée pour chauffer l'ECS a augmenté de manière significative à mesure que la performance thermique de l'enveloppe des bâtiments s'est améliorée. L'énergie de chauffage de l'ECS dépend de l'utilisation de l'eau, qui a considérablement diminué au cours des dernières décennies pour atteindre 120-140 l/jour/personne dans les bâtiments résidentiels. Environ 40 % de l'eau domestique est utilisée comme eau chaude. Cela peut correspondre à une consommation d'énergie de 30-40 kWh/m² dans les bâtiments résidentiels, ce qui est considérable (25 %) par rapport à la consommation d'énergie dans les bâtiments de l'UE, qui est généralement de l'ordre de 100-150 kWh/m² [5].

Un système de chauffage solaire de l'eau (Fig.32) comprend un capteur solaire qui absorbe le rayonnement solaire et le convertit en chaleur, laquelle est ensuite absorbée par un fluide caloporteur (HTF) (eau, antigel ou air) qui traverse le capteur. Le HTF est stocké ou utilisé directement.

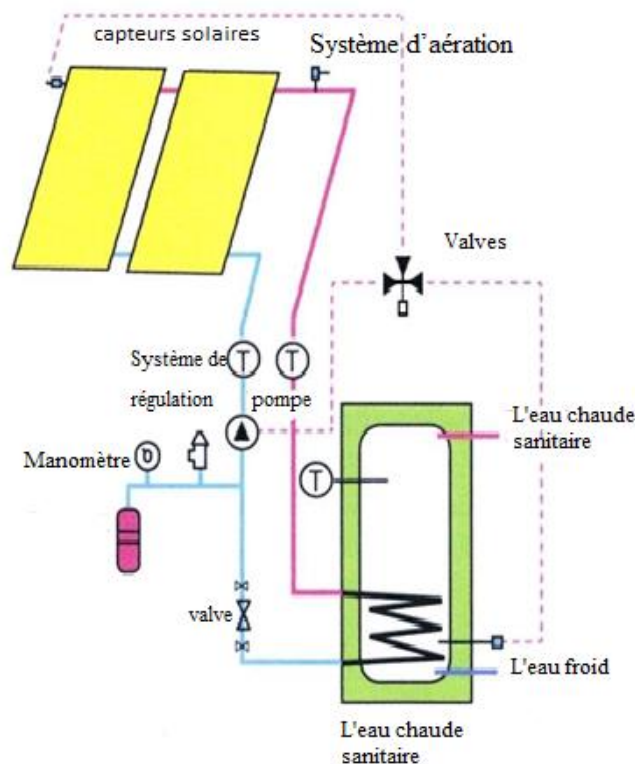


Figure. II.1: Composants du système de chauffage de l'eau.

Pour les chauffe-eau à accumulation, le taux de chauffage requis Q , en W, peut être calculé à l'aide de l'équation :

$$Q_{hw} = \frac{G_{hw} \rho c_p \Delta t}{\eta} \quad (\text{II.1})$$

Avec : G_{hw} : est le débit maximal d'eau chaude, en m^3/s

ρ est la masse volumique de l'eau en kg/m^3

c_p est la chaleur massique de l'eau, en $\text{J}/(\text{kg K})$

Δt est la différence de température, en K

η est le rendement de l'appareil de chauffage. Un calcul exact de la demande de chaleur pour l'ECS peut être effectué en utilisant les normes internationales ou nationales.

Le volume du réservoir de stockage d'eau chaude V_{ST} , en m^3 , peut être calculé à l'aide de l'équation :

$$V_{ST} = \Delta\tau \frac{Q_{hw}}{\rho c_p \Delta t} \quad (II.2)$$

Avec : $\Delta\tau$ est le temps de chauffage de l'eau, en secondes.

II.2.1. Types de systèmes de chauffage solaire de l'eau :

Dans un système de chauffage solaire de l'eau, l'eau est chauffée directement dans le capteur ou indirectement par un HTF qui est chauffé dans le capteur, passe par un échangeur de chaleur et transfère sa chaleur à l'eau domestique ou à l'eau de réseau. Le HTF est transporté par une circulation naturelle ou forcée. La circulation naturelle se fait par convection naturelle (thermosiphon), tandis que la circulation forcée utilise des pompes. À l'exception du système à thermosiphon qui ne nécessite aucune régulation, les chauffe-eau solaires domestiques et collectifs sont régulés par des thermostats différentiels. Cinq types de systèmes solaires sont utilisés pour chauffer l'eau sanitaire et l'eau de réseau à savoir : thermosiphon, circulation directe, circulation indirecte, stockage intégral des capteurs et construction sur site.

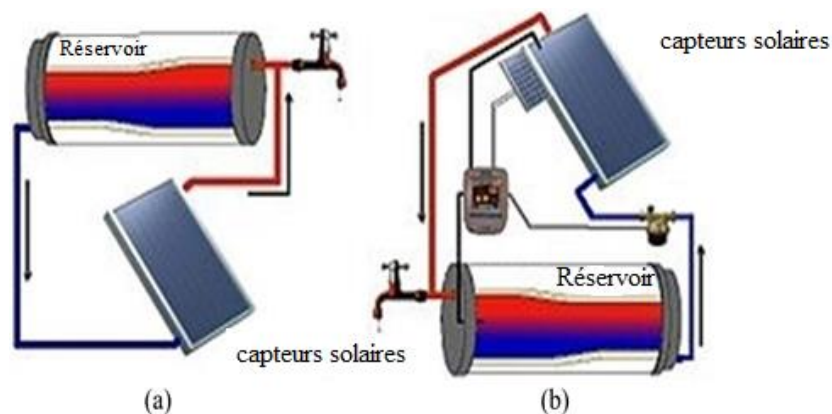


Figure. II.2: Systèmes directs

- a) système avec réservoir au-dessus du collecteur ; b) système actif avec pompe et régulateur alimenté par un panneau photovoltaïque.

II.2.1.1. Systèmes à boucle directe ou ouverte (Figure.33)

Dans ces systèmes l'eau circule dans les collecteurs, Ils sont relativement bon marché mais peuvent présenter les inconvénients suivants :

- Ils offrent peu ou pas de protection contre la surchauffe, à moins qu'ils ne soient équipés d'une pompe d'exportation de chaleur.
- Ils offrent peu ou pas de protection contre le gel, à moins que les capteurs ne soient résistants au gel.

- Les capteurs s'entartrent dans les régions où l'eau est dure, à moins d'utiliser un adoucisseur d'eau.

Jusqu'à l'avènement des capteurs solaires résistants au gel, ceux-ci n'étaient pas considérés comme adaptés aux climats froids car, si le capteur est endommagé par le gel, les conduites d'eau sous pression forceront l'eau à sortir du capteur endommagé par le gel jusqu'à ce que le problème soit détecté et corrigé.

II.2.1.2. Systèmes indirects ou systèmes à boucle fermée :

Ces systèmes utilisent un échangeur de chaleur qui sépare l'eau potable du HTF qui circule dans le collecteur. Les deux HTF les plus courants sont l'eau et un mélange d'eau antigel qui utilise généralement du propylène glycol non toxique. Après avoir été chauffé dans les panneaux, le HTF est acheminé vers l'échangeur de chaleur, où sa chaleur est transférée à l'eau potable. Bien que légèrement plus coûteux, les systèmes indirects offrent une protection contre le gel et généralement une protection contre la surchauffe. Pour produire de l'ECS à une température de 45 °C à partir d'eau froide à une température de 10 °C, la plaque absorbante doit atteindre la température de 50°C à 70°C pour transférer efficacement la chaleur au fluide caloporteur et à l'ECS.

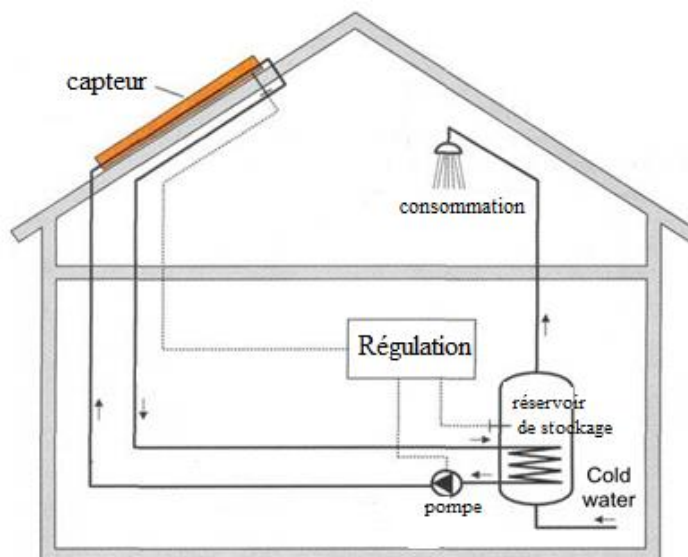


Figure. II.3: Système de chauffage indirect de l'eau chaude sanitaire.

- Les systèmes passifs (**Figure. II.2.a**) s'appuient sur la convection due à la chaleur ou sur des caloducs pour faire circuler l'eau ou le liquide de chauffage (caloporteur) dans le système. Les systèmes de chauffe-eau solaires passifs coûtent moins cher et ne nécessitent que très peu ou pas d'entretien, mais l'efficacité d'un système passif est nettement inférieure à celle d'un système actif. La surchauffe et le gel sont des problèmes majeurs.

- **Les systèmes actifs (Figure. II.2.b)** utilisent une ou plusieurs pompes pour faire circuler l'eau et/ou le liquide de chauffage dans le système. Bien que légèrement plus chers, les systèmes actifs offrent plusieurs avantages :
 - Le réservoir de stockage peut être situé plus bas que les capteurs, ce qui offre une plus grande liberté dans la conception du système et permet d'utiliser des réservoirs de stockage préexistants.
 - Le réservoir de stockage peut être caché.
 - Le réservoir de stockage peut être placé dans un espace conditionné ou semi-conditionné, ce qui réduit les pertes de chaleur.
 - Efficacité supérieure.
- **Les systèmes solaires** actifs modernes sont équipés de régulateurs électroniques qui offrent un large éventail de fonctionnalités. Dans un système actif typique, le régulateur met la pompe en marche lorsque l'eau du capteur est approximativement 8-10 °C plus chaude que l'eau du réservoir et il arrête la pompe lorsque la différence de température approche 3-5°C. Cela permet de s'assurer que l'eau reçoit toujours de la chaleur du collecteur lorsque la pompe fonctionne et d'éviter que la pompe ne se mette en marche et ne s'arrête trop souvent.

➤ Exemples de systèmes de production d'eau chaude solaire

Le développement technique dans le domaine de l'énergie solaire au cours des dernières années (2020-2025) a permis l'émergence d'une gamme diversifiée de systèmes solaires de production d'eau chaude sanitaire. A titre d'exemple, trois variantes constructives utilisées dans la pratique pour les systèmes solaires en circuit fermé et avec échangeur de chaleur sont présentées [5] :

La configuration standard d'un système solaire d'ECS est présentée dans la figure 4. Il s'agit du système le plus simple et le moins cher avec circulation forcée, et donc de l'installation la plus courante. La pompe de circulation transporte le fluide

caloporteur entre le capteur solaire et l'échangeur de chaleur dans le réservoir de stockage (serpentin), lorsque la température du fluide dans le capteur solaire est supérieure à la température de l'ECS dans le réservoir de stockage.

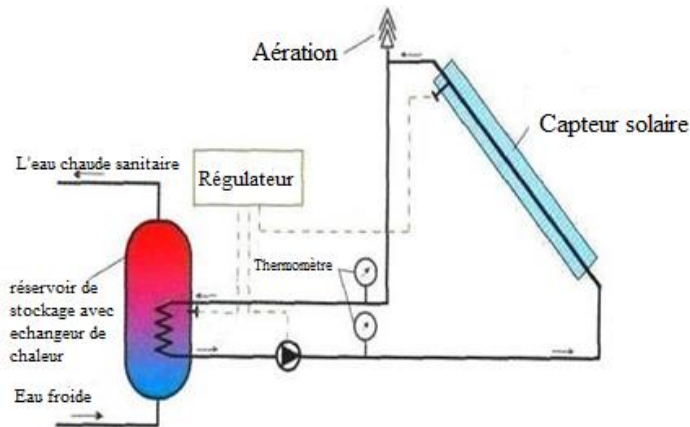


Figure. II.4: Circuit fermé avec réservoir de stockage et système d'échange de chaleur.

Pour les installations moyennes et grandes, deux réservoirs de stockage de faible volume sont utilisés au lieu d'un réservoir de grand volume, et une vanne à trois voies, commandée en fonction de la température du HTF et de l'eau du réservoir (Figure.36), est utilisée pour contrôler le chauffage de l'eau dans les deux réservoirs de stockage. Ceci constitue une solution opérationnelle avantageuse (consommations variables). Les réservoirs de stockage peuvent être utilisés pour l'ECS ou l'un pour l'ECS et l'autre pour le chauffage (préchauffage) du fluide de distribution (caloporteur) dans le système de chauffage ;

Une autre variante constructive est représentée par l'utilisation de capteurs solaires pour le chauffage de l'eau domestique ainsi que pour le chauffage de l'eau de la piscine au moyen d'un échangeur de chaleur (Figure. 6). Pour chaque mètre carré de piscine d'une profondeur normale, il faut 0,5 à 0,7 m² de capteur solaire.

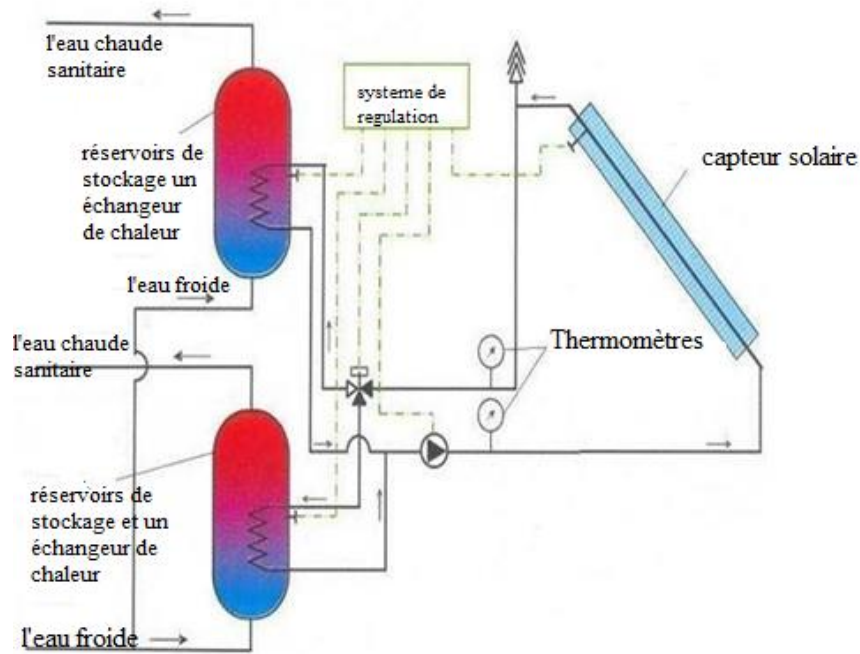


Figure. II.5 : Circuit fermé avec deux réservoirs de stockage et un système d'échangeur de chaleur.

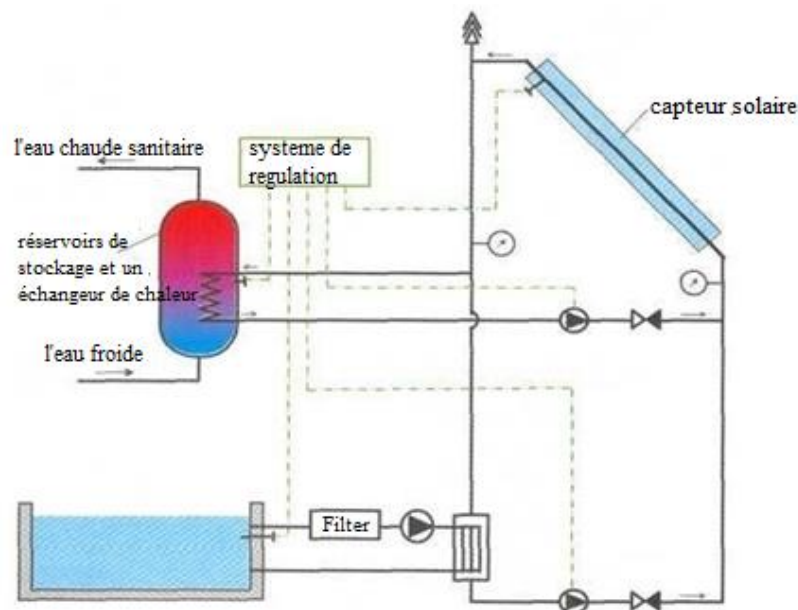


Figure. II.6 : Système solaire pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage de l'eau de la piscine.

II.2.1.3. Systèmes de chauffage solaire des locaux

- Les systèmes passifs peuvent être divisés en plusieurs catégories. L'énergie thermique obtenue à partir du soleil grâce à un système solaire thermique peut être

Chapitre 2 : Etat de l'art.

utilisée pour le chauffage des locaux. Les systèmes de chauffage solaire se répartissent en deux catégories principales : les systèmes passifs et les systèmes actifs.

Dans un système passif à gain direct, le capteur solaire (fenêtres) et le stockage (sols, murs, etc.) font partie de l'espace occupé et représentent généralement le pourcentage le plus élevé de la charge de chauffage couverte par l'énergie solaire. Pour réduire les pertes de chaleur, la masse thermique doit être bien isolée de l'environnement extérieur ou du sol [6]. Les systèmes passifs à gain indirect utilisent la surface des murs orientés vers le sud ou le toit pour absorber le rayonnement solaire, ce qui provoque une augmentation de la température qui, à son tour, transmet la chaleur dans le bâtiment de plusieurs manières.

Les systèmes de chauffage solaire actif (Figure. II.6) utilisent l'énergie solaire pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou air) dans un circuit de capteurs, puis transfèrent la chaleur solaire directement dans l'espace intérieur ou dans un réservoir de stockage en vue d'une utilisation ultérieure. Les systèmes à liquide sont plus souvent utilisés lorsque le stockage est inclus, et conviennent bien aux systèmes de chauffage par rayonnement, aux chaudières avec radiateurs à eau chaude, et même aux pompes à chaleur à absorption. Ainsi, le fluide de distribution (eau chaude) utilisé par le système de chauffage existant (radiateur, plancher radiant, etc.) circule à travers un échangeur de chaleur dans le réservoir de stockage. Lorsque l'eau chaude traverse l'échangeur de chaleur, elle est réchauffée, puis renvoyée dans le système de chauffage. Si le système solaire ne peut pas fournir un chauffage adéquat, un système auxiliaire ou de secours fournit la chaleur supplémentaire.

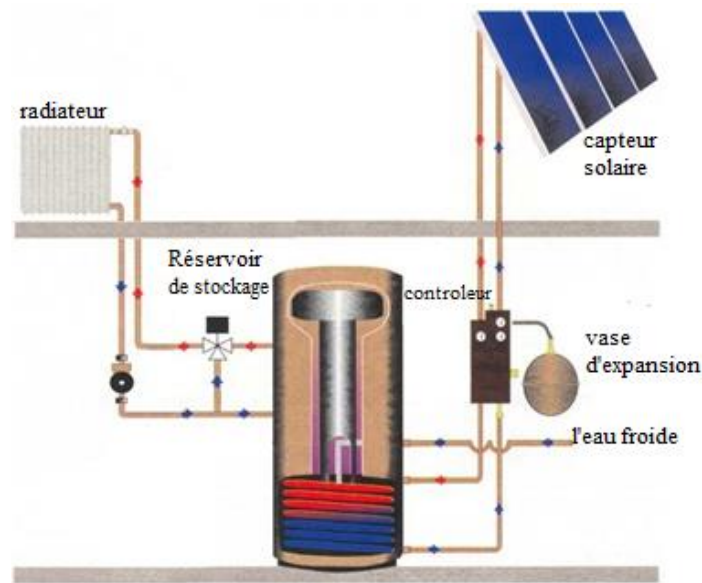


Figure. II.7 : Système de chauffage solaire actif.

Deux types de systèmes de régulation sont couramment utilisés pour les capteurs solaires dans les bâtiments : tout ou rien et proportionnel. Avec un régulateur tout ou rien, il est décidé d'activer ou de désactiver les pompes de circulation en fonction de la production utile ou non des capteurs. Avec un régulateur proportionnel, la vitesse de la pompe est modifiée pour tenter de maintenir un niveau de température spécifié à la sortie des capteurs.

La plupart des systèmes de chauffage solaire sont installés sur le toit ou sur le sol à proximité du bâtiment. Pour obtenir les meilleurs résultats, les capteurs solaires doivent être installés de telle sorte qu'ils :

- Reçoivent l'éclairement direct du soleil entre 9 heures et 15 heures, tout au long de l'année ; et
- Soient orientés vers le sud (bien qu'ils puissent être orientés jusqu'à 30 % vers le sud-est ou le sud-ouest).

Un système solaire thermique nécessite un entretien annuel/périodique modéré pour garantir un fonctionnement efficace. L'entretien est généralement assuré par l'installateur et/ou le fabricant.

II.2.1.4. Systèmes solaires combinés :

- **Description du système**

Un système solaire combiné (SSC) fournit à la fois le chauffage/refroidissement des espaces solaires et l'eau chaude à partir d'un réseau commun de capteurs solaires thermiques, généralement complété par une source de chaleur auxiliaire non solaire. Les études expérimentales ont montré que les SSC sont capables de répondre à la demande d'énergie de 10 à 100% en fonction des conditions climatiques, des composants du système, de l'efficacité du système et de la demande d'énergie [7]. Ainsi, en fonction de la taille du système SSC installé, la contribution annuelle au chauffage des locaux peut varier de 10 à 60% ou plus dans les bâtiments à très faible consommation d'énergie.

La figure 8 montre l'un des nombreux systèmes pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des locaux [6]. Dans ce cas, un grand réservoir de stockage à pression atmosphérique est utilisé, à partir duquel l'eau est pompée vers les collecteurs par la pompe P1 en réponse au thermostat différentiel T1. Un système de vidange est utilisé pour éviter le gel, car la quantité d'antigel nécessaire serait exagérée. L'eau chaude sanitaire est obtenue en plaçant un serpentin d'échangeur de chaleur dans le réservoir, près du sommet, où, même en cas de stratification, l'eau la plus chaude sera trouvée.

Un chauffe-eau auxiliaire augmente la température de l'eau chauffée par le soleil en cas de besoin. Le thermostat T2 détecte la température intérieure et démarre la pompe P2 lorsque la chaleur est nécessaire. Si l'eau du réservoir de stockage devient trop froide pour fournir suffisamment de chaleur, le deuxième contact du thermostat demande de la chaleur au chauffage auxiliaire.

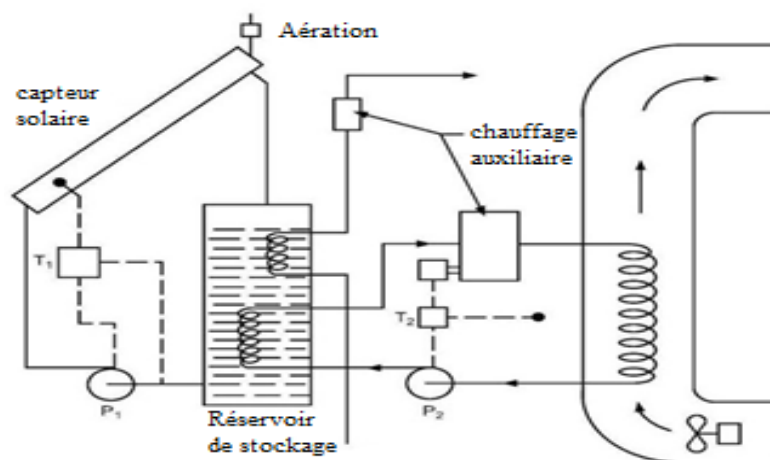


Figure. II.8: schéma de principe d'un système solaire pour chauffage collectif.

- Exemples d'application des systèmes solaires combinés

Les systèmes solaires combinés peuvent être bien utilisés chez les consommateurs isolés pour la production d'eau chaude sanitaire et le chauffage des bâtiments. Un système solaire thermique efficace est un système qui combine le chauffage solaire passif et le chauffage solaire actif et qui utilise le stockage à long terme de la chaleur collectée dans un réservoir de stockage enterré et isolé thermiquement (Figure. 9). La chaleur collectée est utilisée en hiver pour le chauffage des locaux et la production d'eau chaude sanitaire [7].

Actuellement, un grand nombre d'installations sont basées sur l'utilisation de l'énergie solaire en combinaison avec la pompe à chaleur. Le système de chauffage et d'eau chaude d'une maison solaire (Figure. 41) située à Essen, en Allemagne, utilise l'énergie solaire comme source de chaleur par le biais d'un capteur plan [8].

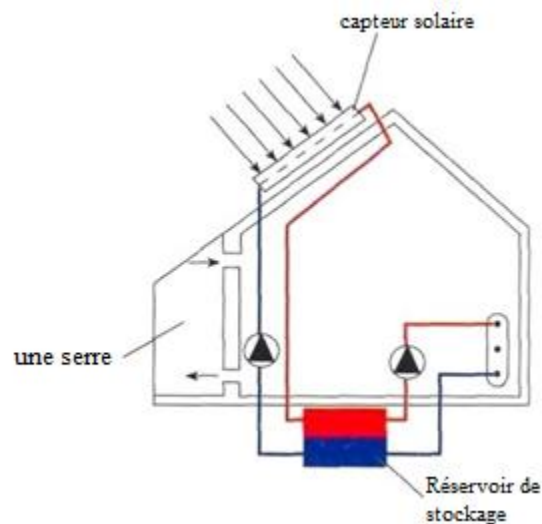


Figure. II.9: Système de chauffage et de production d'eau chaude solaire pour les sites isolés.

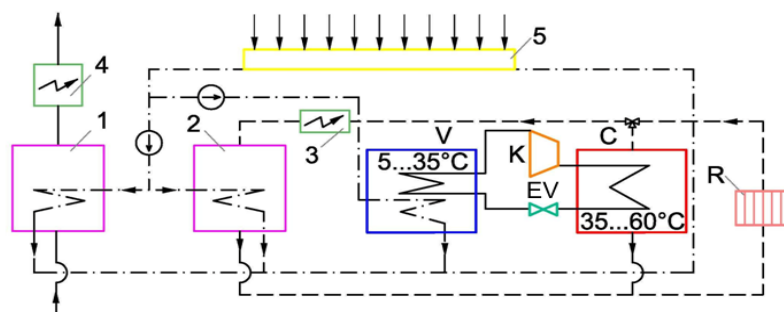


Figure. II.10 : Pompe à chaleur eau/eau à assistance solaire pour le chauffage et l'ECS : 1 Stockage d'ECS ; 2 Stockage d'eau de chauffage ; 3 Chauffage électrique supplémentaire ; 4 Chauffage électrique d'ECS ; 5 Capteur solaire plat.

Chapitre 2 : Etat de l'art.

L'eau chaude du circuit du capteur solaire chauffe la chaudière (1) utilisée pour la production d'ECS et la chaudière (2) utilisée pour chauffer l'eau des radiateurs. Lorsque ce système n'est pas suffisant, une pompe à chaleur se met à fonctionner en utilisant l'eau chauffée du capteur solaire, produisant l'eau chaude dans le condenseur C pour les radiateurs. L'installation a la possibilité de chauffer l'eau avec de l'énergie électrique lorsque cela n'est pas possible avec l'énergie solaire.

➤ Quelques travaux de recherches publiés dans le domaine de chauffage solaire collectif :

Parmi les travaux de recherche rencontrés dans le domaine de chauffage solaire collectif qui ont beaucoup contribué dans le développement de la partie thermique de cette technologie, nous pouvons citer le travail de Mohammed Dhiya-Eddine Sarmouk et Al [9] qui ont effectué une Étude expérimentale et numérique d'un système de chauffage solaire des locaux où ils ont utilisés des capteurs plan de 4 m² intégré à un immeuble afin d'assurer l'alimentation en eau chaude et en chaleur, un système de régulation et un système d'acquisition ont été mis en place dans l'installation afin d'estimer les performances de l'installation et assurer la température de consigne. L'outil de modélisation utilisé dans cette étude est le logiciel TRNSYS où les résultats obtenus ont été comparés et validés par avec résultats expérimentaux trouvés. Une simulation dynamique a été réalisée afin d'optimiser la fraction solaire et cela pour trois gammes de surfaces de captation à savoir : [2-10] m² ; [10-20] m² et [20-30] m², Les résultats ont montré que la fraction solaire est fortement dépendante de la surface des capteurs et du volume de stockage.

Un autre travail similaire est celui publié par Sami Awani et Al [10] qui ont effectué une étude expérimentale et numérique d'une nouvelle conception d'un système de chauffage de l'eau utilisant des chauffe-eau solaires à thermosiphon munie d'un matériau à changement de phase (MCP). Dans cette étude les pertes thermiques ont été prises en considération afin de voir leurs influences sur l'efficacité des capteurs. Le dispositif expérimental utilisé se compose d'un capteur solaire plan d'une surface de 2 m² et d'un réservoir de stockage d'un volume de 280 litres. L'étude numérique a été réalisée par les deux outils de simulations à savoir : Fluent et TRNSYS où les résultats numériques ont été validés par des résultats expérimentaux. Les auteurs ont constaté que l'ajout du MCP a amélioré les performances thermiques de

Chapitre 2 : Etat de l'art.

l'installation en absence du soleil, où la température de l'eau à l'intérieur du réservoir reste approximativement constante à environ 35 °C pour une journée d'été et 25 °C pour une journée d'hiver et cela pendant la nuit. Dans la nouvelle conception, la température de l'eau a été maintenue à une valeur presque double de celle de la conception classique, avec une valeur maximale de 67°C environ le double de celle du modèle classique, avec une valeur maximale de 67 °C et 55 °C en juillet et janvier respectivement, ce qui rend la nouvelle conception proposée par les auteurs très favorables pour les systèmes solaires de chauffage d'eau. L'analyse technico-économique a donné une période d'amortissement estimé à 7 ans et demi.

Abdellatif Zairi et Al [11] ont réalisé une Étude de performance d'un système combiné : Capteur solaire thermique avec système de stockage pour alimenter un plancher chauffant destinée au chauffage d'une pièce sur sites maghrébin, l'apport ajouté par les auteurs est l'utilisation d'un double échangeur dans la cuve de stockage. Un modèle numérique a été conçu sous TRNSYS à cet effet permettant de prédire les performances de l'installation, les résultats obtenus par simulation ont été comparés à ceux trouvés par l'expérimentale menée sur une cellule d'essai équipée d'un plancher chauffant dans les conditions climatiques de la ville d'Oran. D'autres simulations du système ont été réalisées en intégrant le réservoir de stockage et en considérant une stratégie de régulation, en deux étapes du réservoir de stockage.

Les résultats obtenus par simulation ont a montrés la fiabilité du modèle et l'efficacité du ballon utilisé comme chauffage d'appoint avec un taux de couverture de 91%. Le système solaire thermique combiné permet de remplacer l'appoint électrique ou gazier par un stockage solaire actif, sous l'application d'une stratégie de gestion de l'énergie.

Mohamed Krarouch et Al [12] ont étudié un système hybride solaire-biomasse destiné à l'alimentation en eau chaude d'un Hammam au Maroc ou ils ont utilisé un nouveau système hybride solaire-biomasse (HSBS), dans leur modélisation, ils ont évalué les performances de ce système à savoir : la fraction solaire, le cout et le taux d'émission de CO₂. Une combinaison de trois systèmes thermiques a été utilisée : capteur solaires plan, capteurs solaires a tubes sous vide, et un concentrateur cylindro-parabolique.

Un modèle de simulation sous TRNSYS a été développé et validé par rapport aux données expérimentales. Les performances du système à biomasse ont été comparées à d'autres systèmes de chauffage optimaux, en considérant des aspects énergétiques, exégétiques,

environnementaux et économiques. Les comparaisons ont montré que les surfaces optimales des collecteurs solaires varient entre 204 m² et 300 m², avec un coût plus bas de la chaleur. Les capteurs à tubes sous vide ont été identifiés comme la configuration optimale, atteignant une fraction solaire de 57 %. Le coût total du cycle de vie du système HSBS optimal est de 0,509 M\$ pour une demande annuelle totale de chaleur de 533 MWh. Les efficacités énergétiques et exergetiques totales sont évaluées à 40 % et 3,9 % respectivement.

Imad Ait Laasri et Al [13] ont proposé une nouvelle approche en intégrant une unité de stockage d'énergie thermique avec matériaux à changement de phase (MCP) optimisée par la topologie avec des ailettes dans un système de chauffage solaire de l'eau. À l'aide du logiciel EnergyPlus, ils ont évalué les besoins d'énergie et la puissance pour répondre aux besoins en chauffage domestiques.

Des analyses de dynamique des fluides numériques (CFD) ont été utilisées pour explorer divers matériaux à changement de phase dans différentes conditions opérationnelles.

Les résultats obtenus indiquent que l'efficacité du système solaire amélioré avec l'unité TO-LHTES (Topology-Optimized Latent Heat Thermal Energy Storage), en particulier avec des configurations spécifiques telles qu'une température injectée de 20 °C, une vitesse injectée de 0,02 m/s, une température stockée de 80 °C et le matériau à changement de phase RT50. En raison de la faible conductivité thermique de nombreux matériaux à changement de phase, une distribution et un stockage efficaces de la chaleur nécessitent des méthodes innovantes.

Une économie d'énergie maximale de 63,2 % a été enregistrée, montrant l'importance de cette approche pour améliorer l'efficacité des systèmes de chauffage solaire de l'eau.

Muhammad Arsalan et Al [14] ont représenté les différents types des modes conventionnels de chauffage des locaux qui sont caractérisés par leurs coûts élevés et de leurs émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement de la planète. Ensuite ils ont introduit une analyse expérimentale d'un système hybride de chauffage solaire, composé de capteurs plans (FPC) et de capteurs à tubes sous vide (ETC), ainsi que d'un radiateur

L'analyse technico-économique et environnementale de ce système a été effectuée dans des conditions hivernales réelles. Le dispositif expérimental permet de déterminer le comportement thermique des deux types de capteurs, les résultats obtenus ont été comparés avec ceux trouvés par la simulation CFD

Chapitre 2 : Etat de l'art.

Les résultats expérimentaux indiquent que l'efficacité énergétique maximale de l'ETC est de 72 %, suivie du HC et du FPC avec des rendements énergétiques de 61 % et 57 %.

En décembre, avec des températures ambiantes basses, les efficacités énergétiques maximales pour ETC, HC et FPC sont respectivement de 54 %, 42 % et 33 %.

L'analyse économique révèle que le rapport coût-bénéfice de l'hybride varie de 0.82 à 1.6, et la période de récupération varie de 8.9 à 7.41 ans par rapport au chauffage électrique, avec un taux d'inflation de 6 à 13 %. Le coût du cycle de vie est supérieur d'environ 38 % pour le chauffage électrique par rapport au système hybride. L'analyse environnementale montre que les chauffages conventionnels produisent 99 % et 78 % d'émissions de gaz à effet de serre de plus que les systèmes hybrides.

Ainsi, l'arrangement hybride de capteurs plans et de capteurs à tubes sous vide semble être plus avantageux pour le chauffage des locaux, offrant des gains énergétiques significatifs, des coûts plus avantageux et une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux installations individuelles de ces capteurs solaires à basse température.

F. Sahnoune et Al [15] ont examiné les aspects financiers et environnementaux du chauffage des logements et de la production d'eau chaude sanitaire en Algérie, en se concentrant sur une comparaison entre le chauffage conventionnel et le chauffage solaire pour une maison individuelle dans des conditions climatiques Algériennes. Une analyse thermique générale a été réalisée pour évaluer les pertes de chaleur dans différentes parties de la maison, tout en estimant les besoins en chauffage et en eau chaude sanitaire. Le dimensionnement du système solaire a été adapté en fonction de ces besoins.

L'étude intègre également une évaluation économique et environnementale pour comparer les performances des systèmes solaires et conventionnels. Malgré les importantes subventions de l'énergie conventionnelle en Algérie, la comparaison des coûts du kWh solaire thermique avec d'autres sources d'énergie, notamment l'énergie éolienne, s'est avérée favorable. Les résultats mettent en valeur les avantages économiques et environnementaux du solaire thermique, montrant que les importantes réductions de CO₂ contribuent à encourager le développement de cette forme d'énergie en Algérie.

II.3.Conclusion :

Chapitre 2 : Etat de l'art.

Les systèmes solaires mis en œuvre dans les bâtiments représentent une source d'énergie économique et non polluante avec une performance énergétique élevée, ce qui permet de réaliser des économies considérables en termes de consommation de carburant. Cependant, lors du choix de la solution technique, il est important de tenir compte des caractéristiques climatiques de la région et des particularités du bâtiment, ainsi que d'une analyse technico-économique du système choisi.

L'efficacité des systèmes de chauffage solaire et/ou de production d'eau chaude sanitaire avec stockage saisonnier de l'énergie peut être améliorée en concevant des systèmes mixtes avec des pompes à chaleur ou d'autres formes d'énergie.

Comparée à d'autres SER (énergie hydraulique, énergie éolienne, énergie géothermique), l'énergie solaire permet des installations simples avec des coûts relativement faibles.

Chapitre 3 : Modélisation du système.

Chapitre 3 : Modélisation du système

III.1. Introduction :

Pour simuler avec précision le comportement d'un capteur solaire plan soumis aux rayonnements solaires dans une localisation spécifique et à une période donnée de l'année, il est nécessaire de développer des modèles mathématiques robustes et de réaliser des bilans énergétiques détaillés qui décrivent les phénomènes thermiques à l'intérieur du capteur.

Ce chapitre se concentre sur la modélisation des performances thermiques d'un capteur solaire plan. Pour ce faire, nous commençons par établir un bilan énergétique au niveau du capteur. Ensuite, nous identifions les différents coefficients de transfert thermique, ainsi que le coefficient d'échange global nécessaire à la compréhension du système.

La modélisation d'un capteur solaire nécessite de déterminer la puissance utile, les différentes pertes thermiques telle que les pertes thermiques vers l'avant, vers l'arrière et latérales du capteur.

La modélisation d'un capteur solaire plan passe par l'établissement d'un bilan thermique, pour l'évaluation des gains et des pertes thermiques de la structure afin de définir son rendement.

III.2. Bilan thermique :

Hypothèses de la modélisation :

- La surface du capteur est uniformément éclairée ;
- Chacun des éléments du capteur soit à une température homogène ;
- Régime permanent ;
- La température de l'air environnant est homogène, par conséquent on considère que les pertes thermiques vers l'avant et l'arrière se font vers la même température ambiante ;
- L'écoulement de la chaleur est unidimensionnel ;
- La température de l'absorbeur est uniforme ;
- La température du vitrage est uniforme ;
- L'effet d'ombre est négligeable ;
- La température du ciel est uniforme ;

Chapitre 3 : Modélisation du système

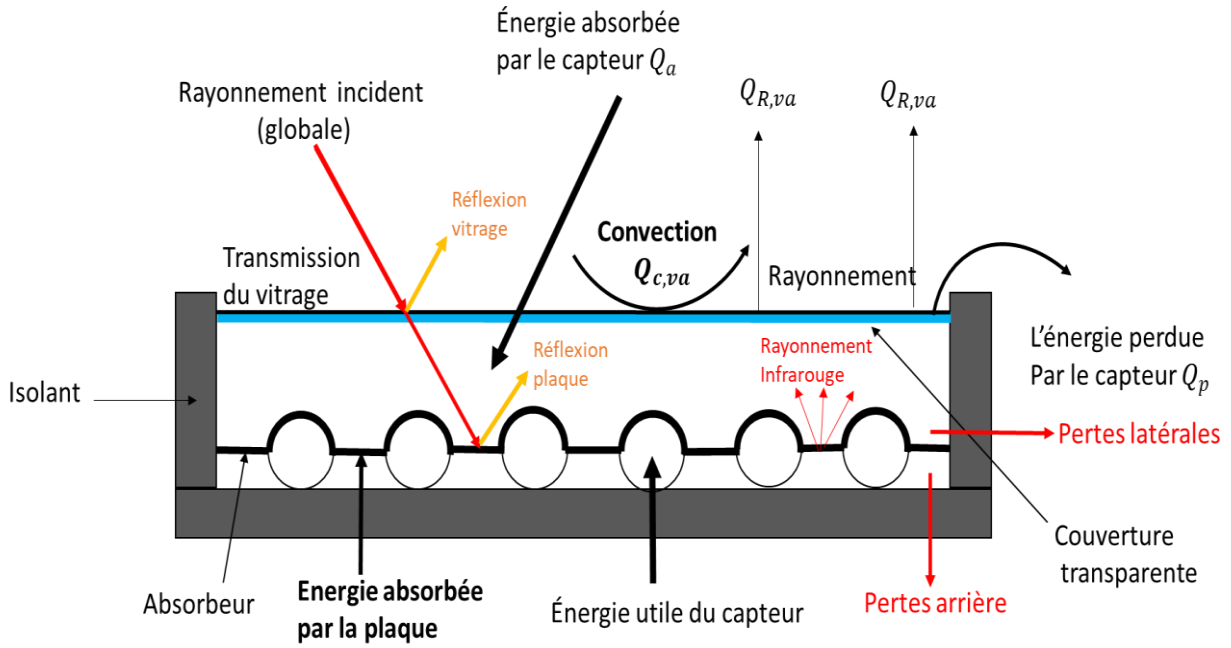


Figure. III.1 : Différents échanges thermiques au sein du capteur.

Conversion d'énergie : [16]

$$Q_u = Q_a - Q_p \quad (\text{III.1})$$

Avec :

Q_a : énergie absorbée par l'absorbeur [J].

Q_u : énergie extraite du capteur pour le HTF [J].

Q_p : énergie perdue par le capteur dans l'environnement [J].

La puissance solaire absorbée par le capteur :

$$P_a = G[\tau \alpha]. A = G[\tau(\theta)\alpha(\theta)]. A \quad (\text{III.2})$$

Avec :

G : éclairement global.

τ : Transmittivité de la couverture transparente.

α : Absorptivité de la plaque absorbante.

θ : Angle d'incidence.

Chapitre 3 : Modélisation du système

Puissance utile du capteur fournie en HTF/m²

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_s - T_e) \quad (\text{III.3})$$

$\dot{m}$: débit de fluide à l'entrée de capteur.

C_p : chaleur massique de l'eau [J/Kg. K].

T_s : température à la sortie du capteur.

T_e : température à l'entrée du capteur.

Puissance perdue par rapport à l'absorbeur vers l'extérieur :

$$Q_p = U_c(T_p - T_{amb}).A_{cap} \quad (\text{III.4})$$

U_c : coefficient de pertes globale.

A_{cap} : surface du capteur.

T_p : température de la plaque.

T_{amb} : température ambiante.

Calcul des coefficients de pertes thermique dans le capteur U_c :

Les pertes thermiques dans le capteur sont dues à la différence de température entre la plaque absorbante et le milieu ambiant

Ces pertes sont :

- Les pertes vers l'avant.
- Les pertes vers l'arrière.

Certaines simplifications sont représentées dans la figure 12. ci-dessous :

Chapitre 3 : Modélisation du système

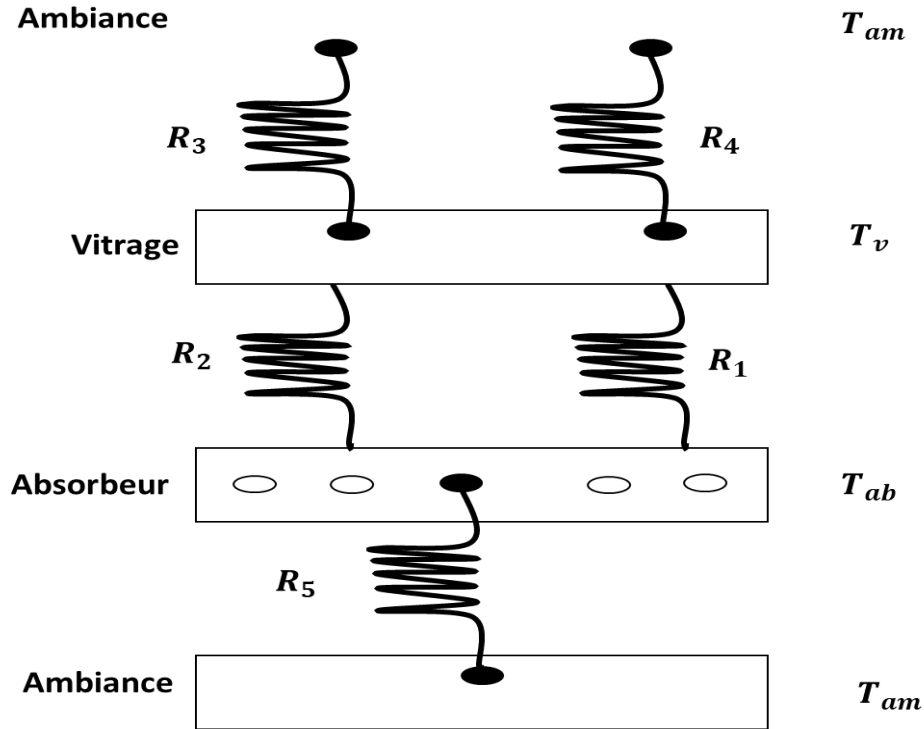


Figure. III.2 : schéma électrique équivalent d'un capteur solaire plan.

Avec :

R1 : Convection entre le vitrage et l'absorbeur.

R2 : Rayonnement entre le vitrage et l'absorbeur.

R3 : Rayonnement entre le vitrage et l'ambiance.

R4 : Convection entre le vitrage et l'ambiance.

R5 : Conduction à travers l'isolant.

❖ Les pertes thermiques par convection Q_c entre l'absorbeur et le vitrage (R1,R2)

Les pertes thermiques par convection sont données comme suit : [17]

$$Q_c = h_c(T_{ab} - T_v) \quad (\text{III.5})$$

Avec :

h_c : Coefficient d'échange par convection [$\text{W/m}^2\text{°C}$].

T_{ab} : Température de l'absorbeur [$^{\circ}\text{C}$].

T_v : Température de vitrage [$^{\circ}\text{C}$].

Chapitre 3 : Modélisation du système

- ❖ Les pertes thermiques par rayonnement entre l'absorbeur et le vitrage :[18]

Il s'agit d'un échange entre deux parois parallèles face à face, la quantité de chaleur échangé par rayonnement s'écrit :

$$Q_r = \sigma(T_{ab}^4 - T_v^4)(\varepsilon_{eff}^{-1})f \quad (III.6)$$

σ : constante de Stefan Boltzmann.

$$\sigma : 5,67.10^{-8} [W/m^2 \text{ } ^\circ C] .$$

$$\varepsilon_{eff} : \text{émissivité effective avec } \varepsilon_{eff} = \left(\frac{1}{\varepsilon_v} + \frac{1}{\varepsilon_{ab}} - 1\right) \quad (III.7)$$

ε_v : émissivité de verre

ε_{ab} : émissivité de la plaque

f : facteur de forme géométrique

On a alors la formule suivante pour le coefficient de transfert équivalent par rayonnement [19]

$$h_r = \sigma[(T_{ab} + 273,15)^2 - (T_v - 273,15)^2] \times [(T_{ab} + 273,15) + (T_v - 273,15)]. (\varepsilon_{eff})^{-1} (III.7)$$

- ❖ Les pertes thermiques par conduction à travers l'isolant :

Pour la partie arrière du capteur, l'échange de chaleur est donnée par :

$$Q_c = \frac{\lambda}{e}(T_{ab} - T_{am}) \quad (III.8)$$

λ : conductivité thermique de l'isolant [W/m.K].

e : épaisseur de l'isolant.

- ❖ Les pertes par rayonnement et par convection entre la vitre et le ciel (R_3, R_4) :

L'échange thermique par convection et rayonnement entre la vitre et l'absorbeur s'écrit comme la somme des deux modes de transfert de chaleur [20].

$$Q_{av} = A_c h_{cv}(T_{ab} - T_v) + A_c \xi_{cv} \xi_s (T_{ab}^4 - T_v^4) \quad (III.9)$$

Avec :

T_v : Température moyenne de la vitre.

h_{cv} : Le coefficient d'échange par convection entre la vitre et l'absorbeur.

$$\xi_{cv} : \text{Emissivité totale } \frac{1}{\xi_{cv}} = \frac{1}{\xi_p} + \frac{1}{\xi_v} - 1$$

Chapitre 3 : Modélisation du système

ξ_p : Emissivité infrarouge de l'absorbeur

ξ_v : Emissivité infrarouge de la vitre l'expression peut s'écrire aussi sous la forme suivante : [22]

$$q_{av} = A_c(h_{cv} + h_{rcv})(T_{ab} - T_v) \quad (\text{III.10})$$

Avec :

$$h_{rcv} = \delta \cdot A_c \cdot \xi_{pv}(T_{ab} + T_v)(T_{ab}^2 + T_v^2) \quad (\text{III.11})$$

Par ailleurs, les pertes par avant de la vitre vers l'ambiance s'écrivent : [21]

On néglige la puissance absorbée par la vitre :

$$q_{av} = A_c(h_{cve} + h_{rve})(T_v - T_a) \quad (\text{III.12})$$

h_{cve} : coefficient de pertes par convection du a la présence du vent. [23]

h_{rve} : coefficient de pertes par rayonnement entre la vitre et l'environnement.

$$h_{rve} = \xi_v \delta_s (T_{ciel} + T_v)(T_{ciel}^2 - T_v^2) \left(\frac{T_v - T_{ciel}}{T_v - T_a} \right) \quad (\text{III.13})$$

$$T_{ciel} = 0,0552 \cdot T_a^{1,5} \quad (\text{III.14})$$

Afin de simplifier la détermination des pertes vers l'avant, une formule empirique a été établie par Klein pour des températures inférieure a 20 °C avec une erreur inférieure a 0,3 [W/m².°C]

Cette formule s'écrit : [24]

$$U_{av} = \left[\frac{N}{\frac{C}{T_p} \left(\frac{T_{ab} - T_a}{N_v + f} \right)^a} + \frac{1}{h_{cva}} + \frac{\delta \cdot A \cdot (T_p + T_a)(T_{ab}^2 + T_a^2)}{\left(\frac{1}{\xi_p + 0,00591 N h_{cva}^{5-N}} \right)} \right] \quad (\text{III.15})$$

$$\text{Avec : } a = 0,43 \left(1 - \frac{100}{T_p} \right) \quad (\text{III.16})$$

$$C = \begin{cases} 520(1 - 0,000051\beta^2) & 0^\circ \leq \beta \leq 70^\circ \\ 390 & \beta \leq 90^\circ \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

$$f = (1 + 0,089h_{cva} - 0,1166h_{cva}\xi_c)(1 + 0,07866N) \quad (\text{III.18})$$

Chapitre 3 : Modélisation du système

$$S = \frac{2N+f+0,133(\xi_c-1)}{\xi_v} \quad (\text{III.19})$$

Avec : β : Angle d'inclinaison du capteur.

ξ_p : Emissivité de l'absorbeur.

N : Nombre de vitre.

h_{cva} : coefficient de transfert du au vent [W/m².K].

T_{ab} : Température moyenne de la plaque [K].

C : Facteur tenant compte de l'influence de l'inclinaison du capteur sur le coefficient de convection.

En effet, les capteurs sont généralement très bien isolés sur leurs faces arrière latérales.

L'analogie électrique tenant compte de ces implications représentée par la formule suivante :

$$U_{arriere} = \frac{1}{R_3+R_4} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{\lambda_3}{e_3}} + \frac{1}{\frac{\lambda_4}{e_4}}} \quad (\text{III.20})$$

$U_{arriere}$: Coefficient des pertes thermiques vers l'arrière

Donc : le coefficient des pertes thermique globale dans le capteur est de : $U_c = U_{av} + U_{ar}$
(III.21)

III.3. L'évolution des températures au niveau du capteur :

On détermine les températures de la plaque absorbante et la température de l'eau à la sortie.

III.4. L'évolution de la température moyenne de la plaque : $T_{ab,m}$

La température moyenne de la plaque absorbante est définie par la relation suivante :

$$T_{ab,m} = T_a + \frac{Q_{ab}}{U_c} - \frac{Q_u}{U_{s.S}} \quad (\text{III.22})$$

III.5. Evolution de la température de sortie d'eau T_s :

Dans le cas d'un capteur plan, la température de sortie de l'eau peut être calculée par :

$$T_s = T_e + \frac{Q_u}{\dot{m}c_p} \quad (\text{III.23})$$

Avec : T_e : température d'entrée de l'eau [°C]

Chapitre 3 : Modélisation du système

$\dot{m}$: Débit d'eau $[Kg/s]$.

C_p : Chaleur spécifique $[J/Kg.°C]$.

III.6. Rendement instantané du capteur :

Le rendement instantané est défini comme étant le rapport de la puissance thermique récupérée par le fluide caloporteur (Q_u) et la puissance solaire arrivant sur le plan incliné du capteur (Q_{ab}).

L'expression du rendement par rapport à la température moyenne du fluide s'écrit : [25]

$$\eta_i = F' \left[(\tau\alpha)_{eff} - U_c \cdot \frac{T_{mf} - T_a}{I_g} \right] \quad (III.24)$$

$$F' = \frac{\frac{1}{U_c}}{\frac{1}{[(1-D_e)F + D_e]U_c} + \frac{1}{h_i \pi D_i} + \frac{e_t}{K \pi D_i}} \quad (III.25)$$

L'expression du rendement instantané du capteur par rapport à la température d'entrée du fluide s'écrit [26]

$$\eta_i = F_R \left[(\tau\alpha)_{eff} - U_c \frac{(T_e - T_a)}{G} \right] \quad (III.26)$$

$$F_R = \frac{\dot{m}}{S \cdot h_p} \left[1 - \left(\frac{m \cdot S \cdot h_p}{\dot{m} \cdot C_f} \right) \right] \quad (III.27)$$

F' : est le rapport de la résistance thermique au transfert entre la plaque et l'air ambiant sur la résistance thermique entre le fluide caloporteur et l'air ambiant, appelé aussi facteur d'efficacité de la plaque absorbante.

F_R : facteur de conductance.

T_{mf} : Température moyenne du fluide.

T_e : Température d'entrée du fluide.

U_c : Coefficient pertes thermiques globales du capteur.

Conclusion :

Chapitre 3 : Modélisation du système

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du capteur solaire plan étudié, l'élément qui sert au chauffage de notre installation.

Les différentes expressions donnant les pertes thermiques de ce capteur ont été développées.

La modélisation théorique a permis de quantifier la production de la quantité d'énergie récupérée par le fluide en fonction de température moyenne du fluide ainsi que de la température d'entrée.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous allons expliquer les différentes étapes suivies pendant la simulation afin de déterminer les performances de notre installation à savoir :

- Température à l'entrée des capteurs
- Température à la sortie des capteurs
- Température de charge
- Température d'entrée et de sortie des radiateurs
- L'énergie totale reçue les capteurs
- L'énergie totale reçue par le système de chauffage

Pour ce faire le logiciel TRNSYS a été utilisé.

IV.2. Présentation du TRNSYS :

Le logiciel TRNSYS (Transient System Simulation) permet de modéliser des systèmes mécaniques et de prédire leur comportement en régime transitoire. Le fonctionnement de TRNSYS est basé sur l'utilisation de composants appelés TYPES. Chaque TYPE modélise un composant spécifique grâce à un système d'équations. Une large bibliothèque de TYPES est disponible avec le logiciel (exemple : capteur solaire, réservoir d'eau, radiateurs et encore un système de régulation). Les TYPES sont insérés dans la feuille de calcul de TRNSYS puis reliés entre eux par l'utilisateur. Un TYPE possède des paramètres (fixes durant la simulation), des entrées et des sorties. Ainsi, la sortie d'un TYPE pourra être l'entrée d'un autre TYPE. Les informations pouvant être échangées entre les TYPES sont très diverses (exemple : température, débit, taux d'échange de chaleur, signal de régulation, etc.). Le pas de temps et la durée de la simulation sont fixés par l'utilisateur. À chaque pas de temps, le logiciel résout le système d'équations. Une fois la convergence atteinte, il passe au pas de temps suivant.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

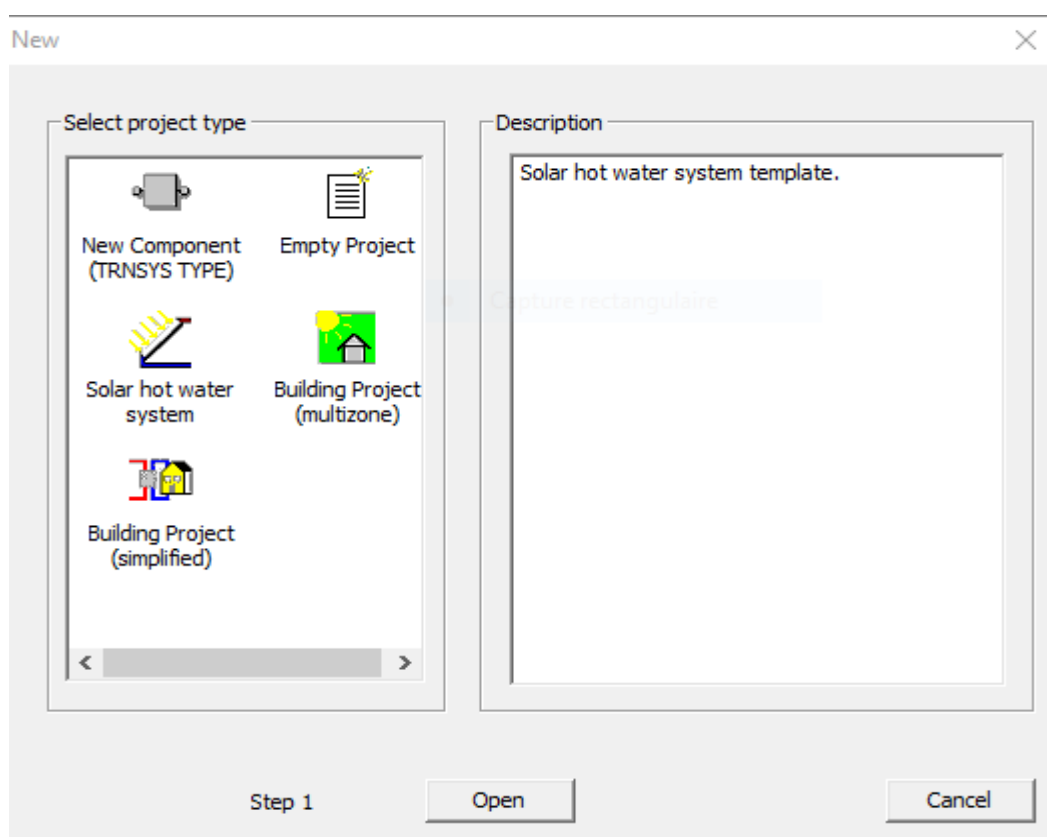


Figure.IV.1 : Page de démarrage du logiciel.

Une pompe de circulation alimente un capteur solaire plan. La température et le débit du fluide sortant de la pompe sont envoyés au capteur. Un fichier météo a été introduit permettant de lire les différents paramètres du site.

Le régulateur permet de contrôler la pompe de circulation en fonction de la température d'entrée et de sortie des capteurs. Tous les paramètres de l'installation ont été raccordés pour former notre modèle.

IV.3. Données métrologique :

Pour réaliser notre simulation, il faut sélectionner le fichier météorologique, pour notre cas le site de Bou-Ismaïl a été utilisé.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

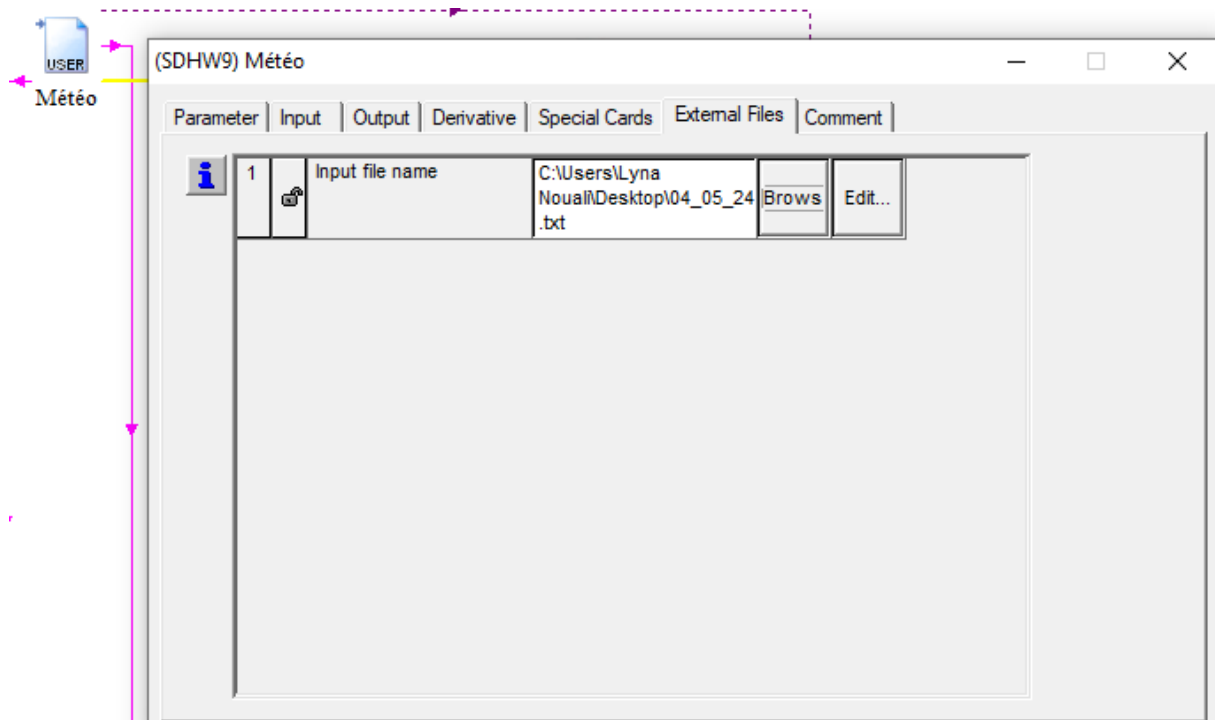


Figure. IV.2: Sélection de fichier météorologique

IV.4. Capteurs :

Nous avons introduit les modèles des capteurs solaires ainsi que leurs caractéristiques :

Quatre séries de capteurs raccordés pour former 16 capteurs solaires plans :

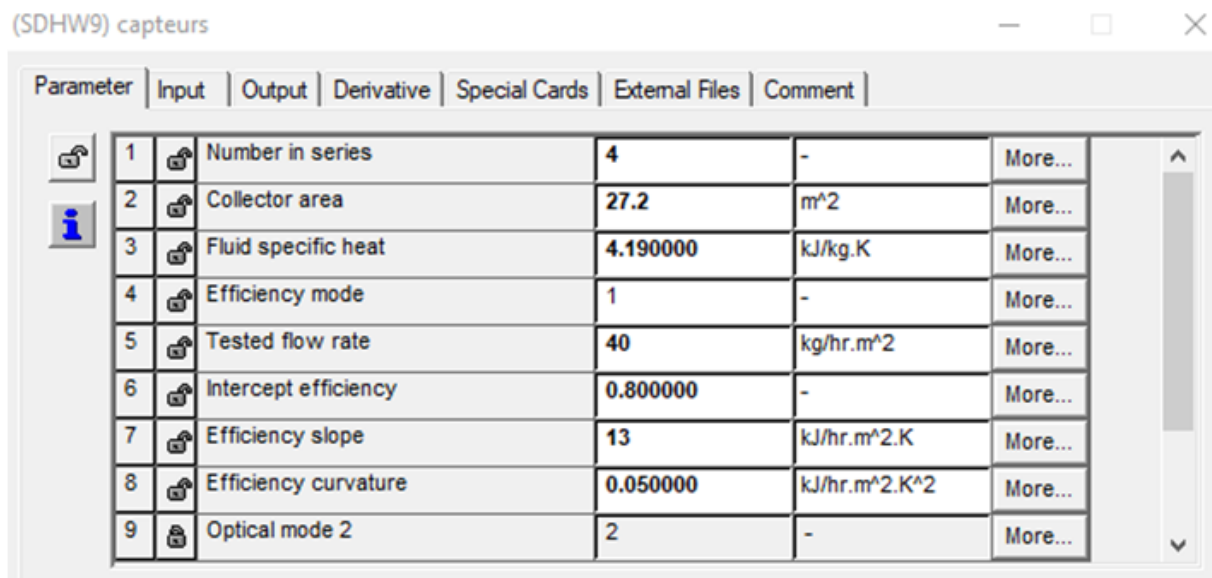


Figure. IV.3 : les différentes caractéristiques du système de captation

Une fois le modèle des capteurs est validé, nous avons introduit les paramètres d'entrées :

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

La température et le débit d'entrée, l'éclairement incident, les autres paramètres ont été choisis par défaut

(SDHW9) capteurs

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inlet temperature	20	C	More...		
2	Inlet flowrate	0.08	kg/s	More...		
3	Ambient temperature	10	C	More...		
4	Incident radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
5	Total horizontal radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
6	Horizontal diffuse radiation	0	kJ/hr.m ²	More...		
7	Ground reflectance	0.200000	-	More...		
8	Incidence angle	45	degrees	More...		
9	Collector slope	0	degrees	More...		

Figure. IV.4 : les paramètres d'entrés du circuit solaire

IV.5. La cuve de stockage :

Les différents paramètres de la cuve de stockage ont été introduits selon les données réelles de notre installation :

Type de l'isolation, le volume de la cuve, la chaleur spécifique de l'eau

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

(SDHW9) cuve de stockage

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Variable inlet positions	2	-	More...		
2	Tank volume	1500	l	More...		
3	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...		
4	Fluid density	1000.0	kg/m ³	More...		
5	Tank loss coefficient	2.5	kJ/hr.m ² .K	More...		
6	Height of node-1	0.3	m	More...		
7	Height of node-2	0.3	m	More...		
8	Height of node-3	0.3	m	More...		
9	Height of node-4	0.3	m	More...		

1	How many temperature levels (nodes) should be used in the tank?	6
2	How many heating elements to be modeled in this tank?	2

Figure. IV.5: les paramètres d'entrées de la cuve de stockage

IV.6. La pompe :

Nous avons introduit les différentes données des deux pompes afin de caractériser la circulation de l'eau les deux circuits hydrauliques.

(SDHW9) pompe 1

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Maximum flow rate	0.08	kg/s	More...		
2	Fluid specific heat	4.19	kJ/kg.K	More...		
3	Maximum power	240	kJ/hr	More...		
4	Conversion coefficient	0.05	-	More...		
5	Power coefficient	0.5	-	More...		

Figure. IV.6: les paramètres d'entrées des pompes de circulation

IV.7. La tuyauterie :

Nous avons introduits les différentes dimensions de la tuyauterie qui sont conformes aux dimensions de notre installation

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

(SDHW9) tuyaurterie -2

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Inside diameter	0.025	m	More...		
2	Pipe length	10.0	m	More...		
3	Loss coefficient	3.0	$\text{kJ/hr.m}^2.\text{K}$	More...		
4	Fluid density	1000.0	kg/m^3	More...		
5	Fluid specific heat	4.190	kJ/kg.K	More...		
6	Initial fluid temperature	35	C	More...		

Figure. IV.7 : les différentes dimensions de la tuyauterie

IV.8. Les radiateurs :

Afin de déterminer les performances de notre installation, nous avons modélisé le circuit secondaire en introduisant ses différents paramètres :

- Le débit d'entrée de l'eau provenant du circuit solaire dans les radiateurs
- La température d'entrée de l'eau provenant du circuit solaire dans les radiateurs
- Température de l'air ambiant

(SDHW9) radiateur 1

Parameter	Input	Output	Derivative	Special Cards	External Files	Comment
1	Fluid inlet temperature	50.0	C	More...		
2	Fluid flow rate	0.08	kg/s	More...		
3	Air inlet temperature	20.0	C	More...		
4	Air humidity ratio	0.005	-	More...		
5	Not used	50.0	% (base 100)	More...		
6	Air flow rate	10.0	kg/hr	More...		
7	Air pressure	1.0	atm	More...		
8	Air-side pressure drop	0.0	atm	More...		
9	Coil bypass fraction	0.15	Fraction	More...		

Figure. IV.8: Les paramètres du radiateur

Nous avons enfin validé notre modèle illustré dans les figures ci-dessous.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

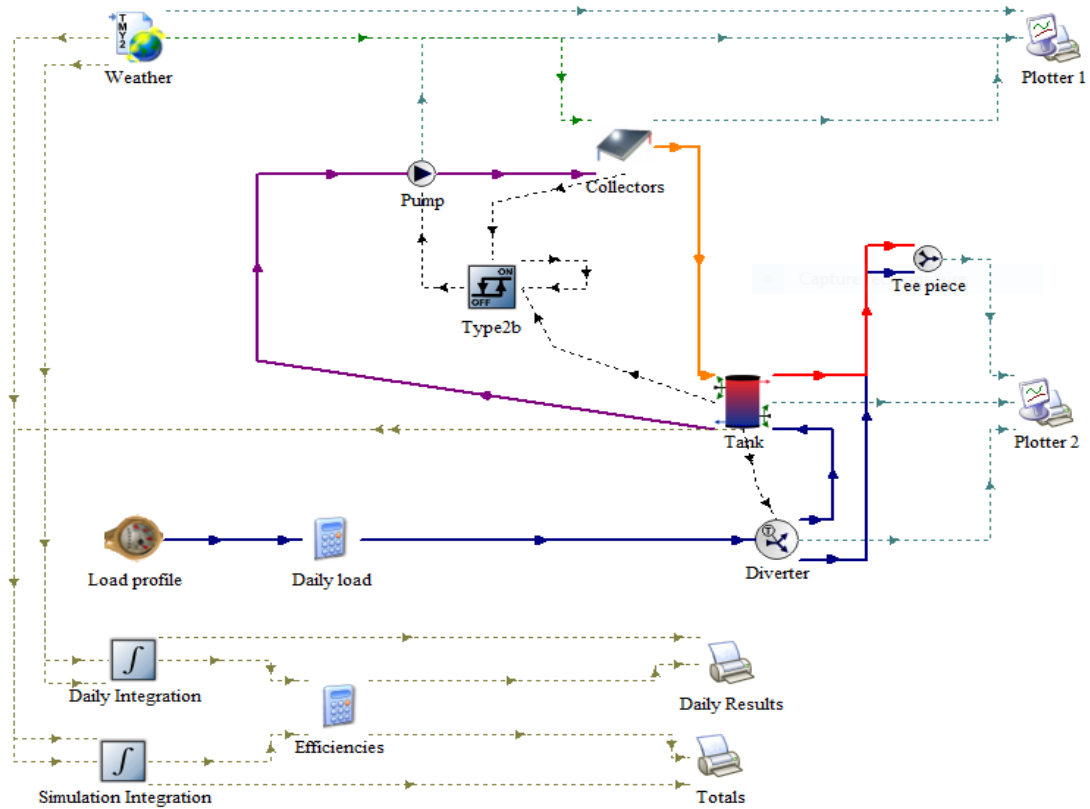


Figure. IV.9: Le modèle finale d'un capteur solaire plan.

Après avoir modélisé la partie solaire (circuit primaire), nous l'avons raccordé avec le circuit secondaire pour déterminer les performances de l'installation, le modèle final obtenu adopté à notre installation est illustré dans la figure ci-dessous :

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

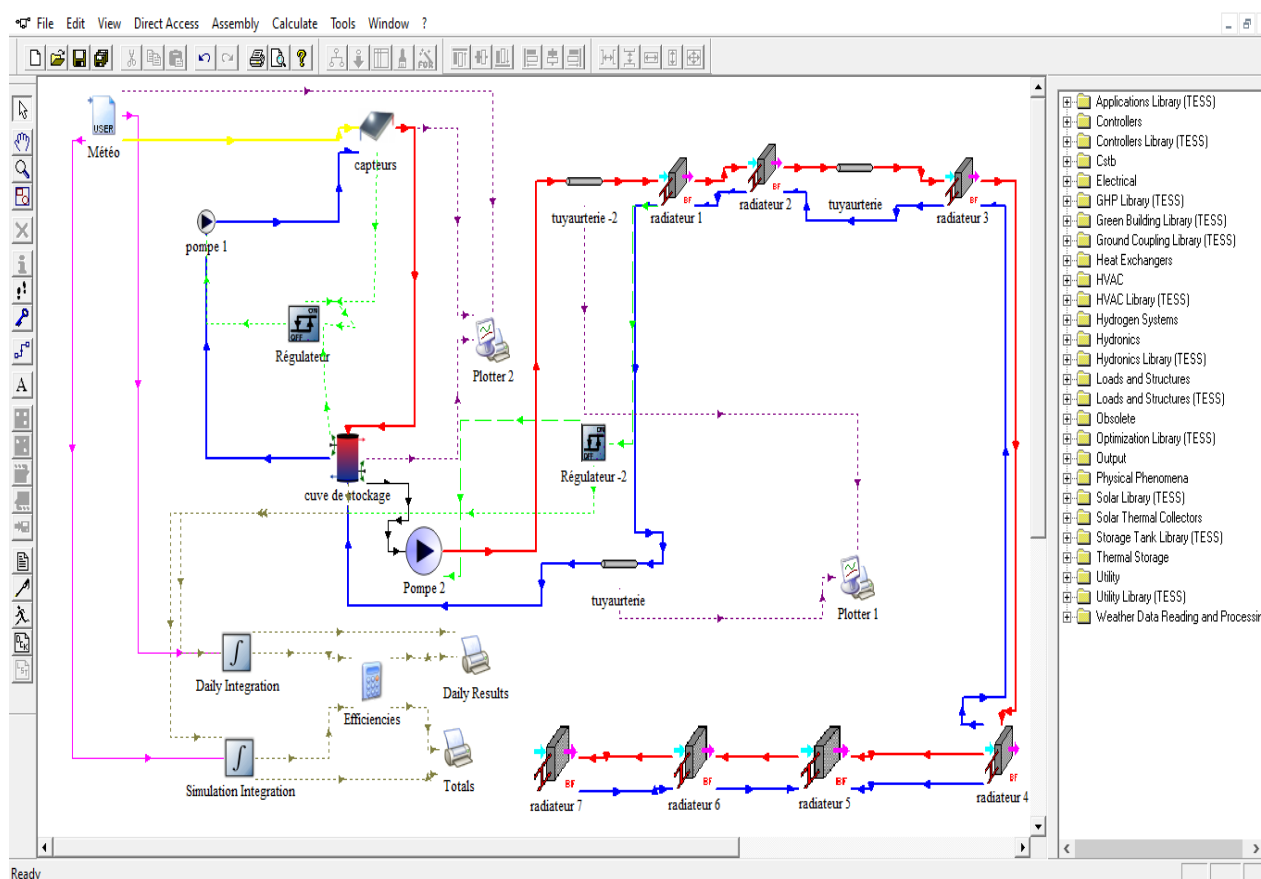


Figure. IV.10 : Le modèle final des deux circuits raccordés.

Le modèle final contient :

- Le champ de captation avec ses dimensions (16 capteurs) avec les raccordements en série et en parallèle.
- Une cuve de stockage (type 4c) d'une capacité de 1500 litres avec un appoint intégré.
- Des systèmes de régulation (type 2b) permettant de contrôler les deux circuits
- Les pompes de circulation (type 3d)
- Le fichier météo (type 9c) a été utilisé pour le site Bou-Ismaïl.
- Un afficheur des résultats numérique et graphique (type 65c).
- Les radiateurs (type 753).

IV.9. Résultats de simulation :

Nous avons retenu quatre journées représentatives durant la simulation : 27/04/2024 ; 29/04/2024 ; 03/05/2024 ; 04/05/2024 ; ces derniers représentent presque la totalité des journées du stage en terme de rayonnement solaire et de températures ambiante, les résultats expérimentaux pour ces journées sont présentés dans le chapitre 5.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

Après simulation, nous avons étudié le comportement thermique des deux circuits primaires et secondaires, les résultats obtenus pour les journées sélectionnés sont illustrés dans les figures ci-dessous :

27/04/2024

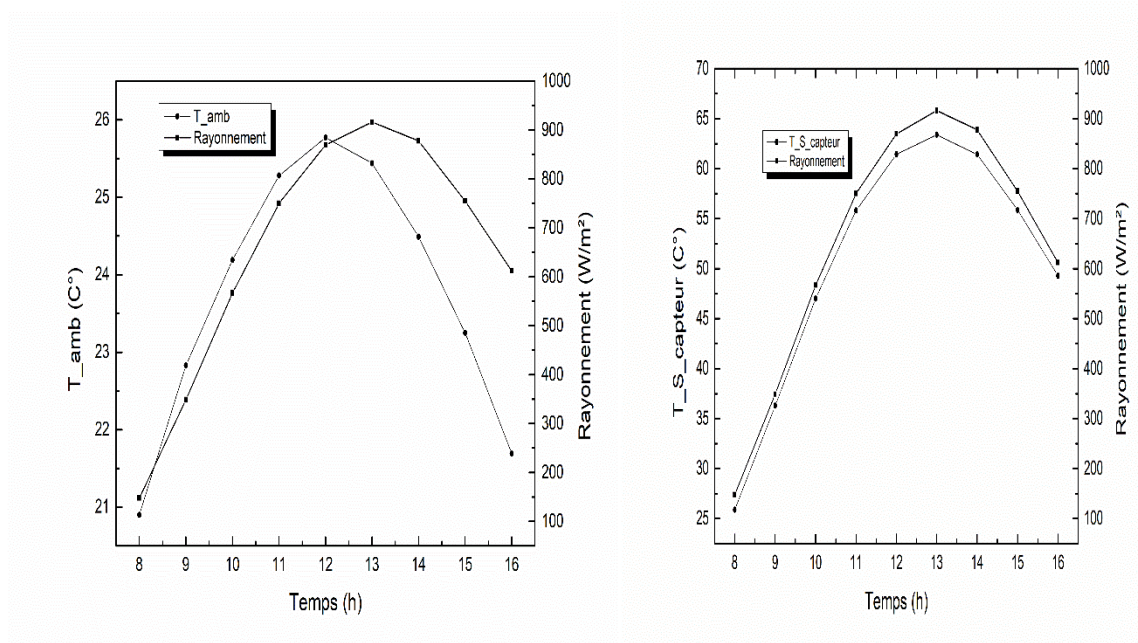


Figure. IV.11 : Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps.

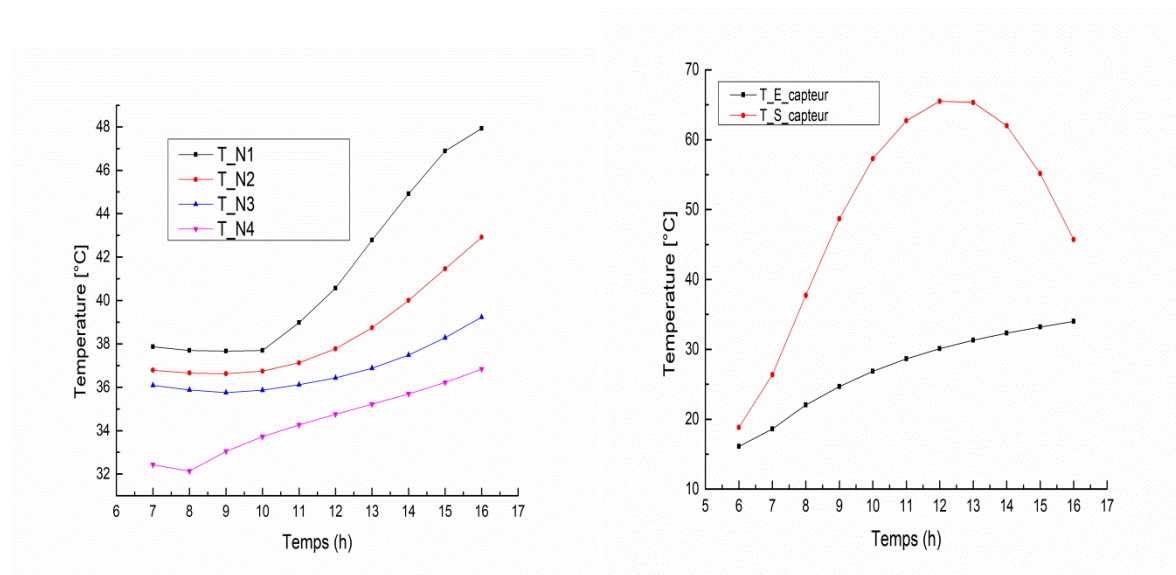


Figure.IV.12 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

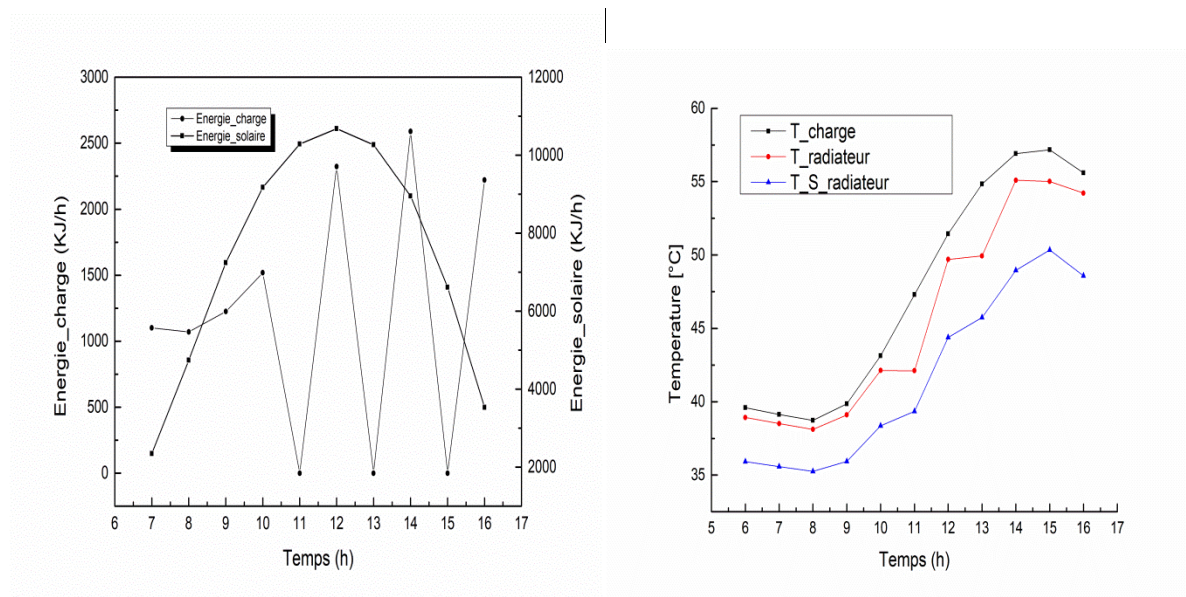


Figure. IV.13 : Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps

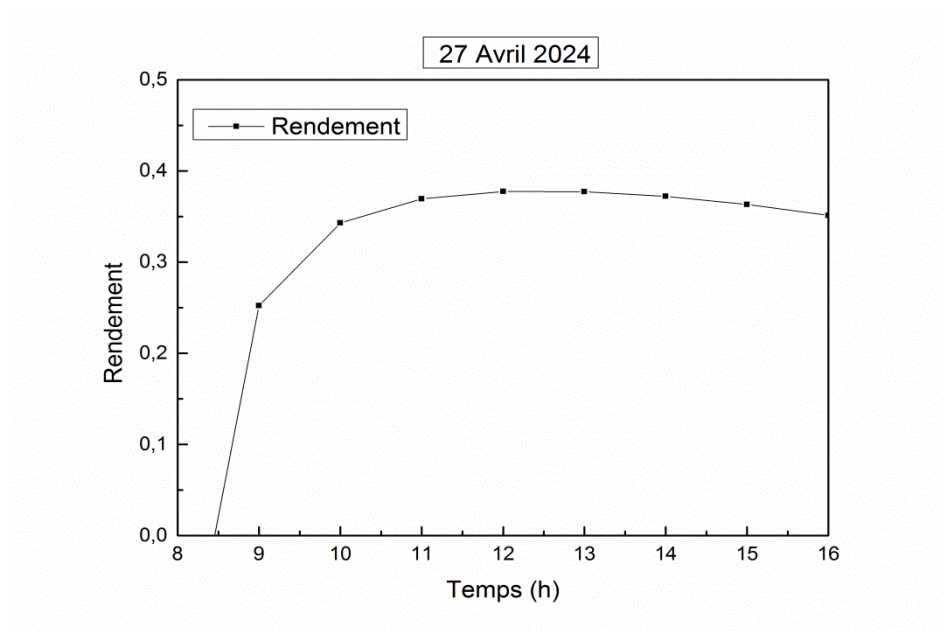


Figure. IV.14 : le rendement instantané en fonction du temps

03/05/2024

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

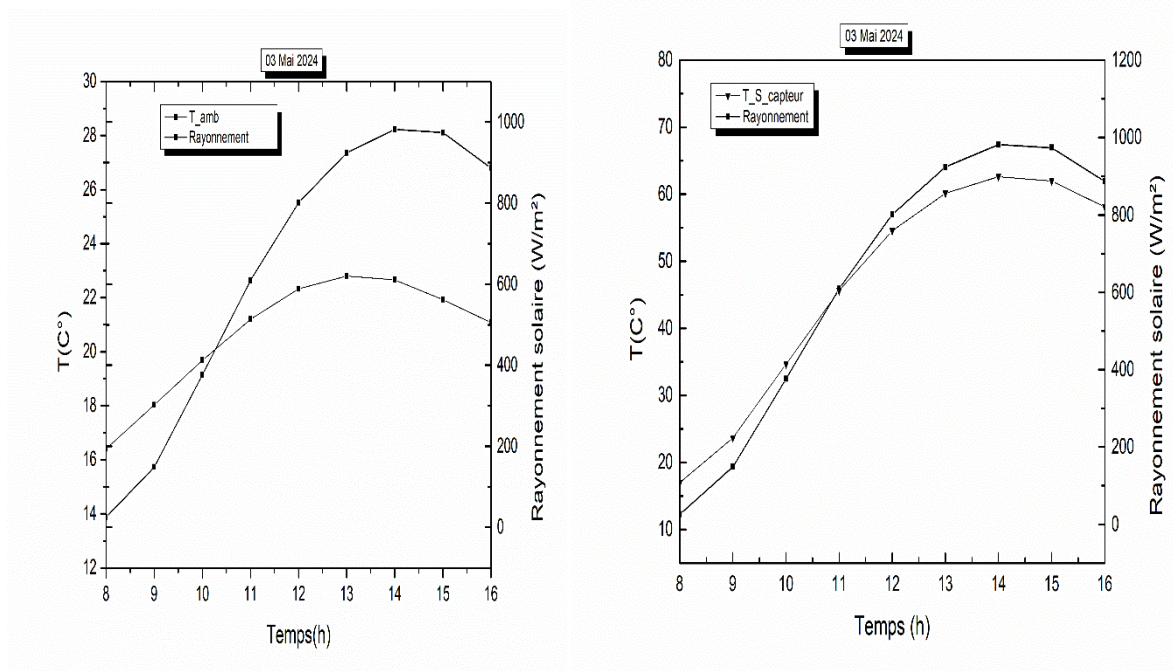


Figure.IV.15 : Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps.

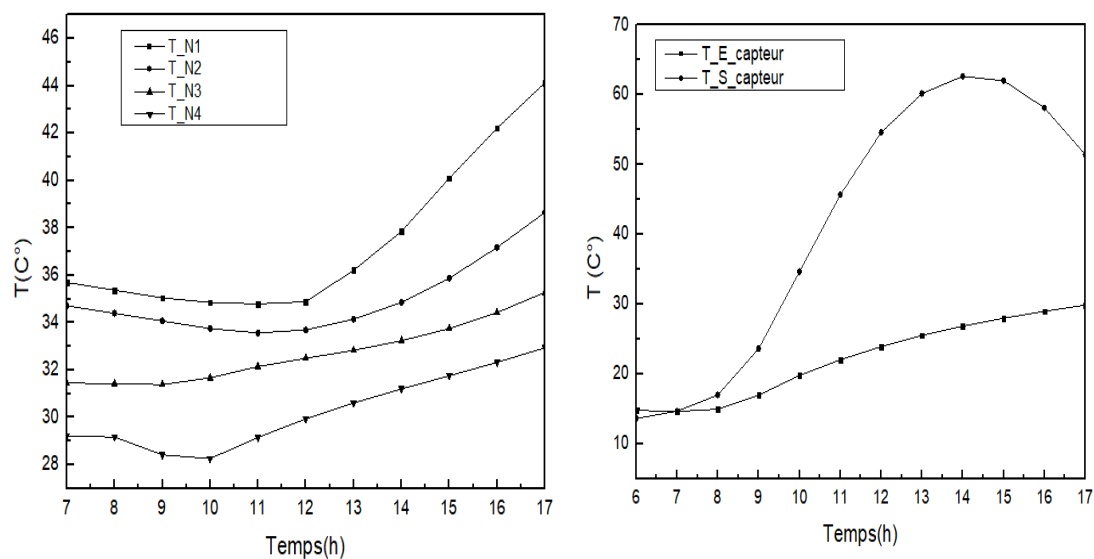


Figure.IV.16 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

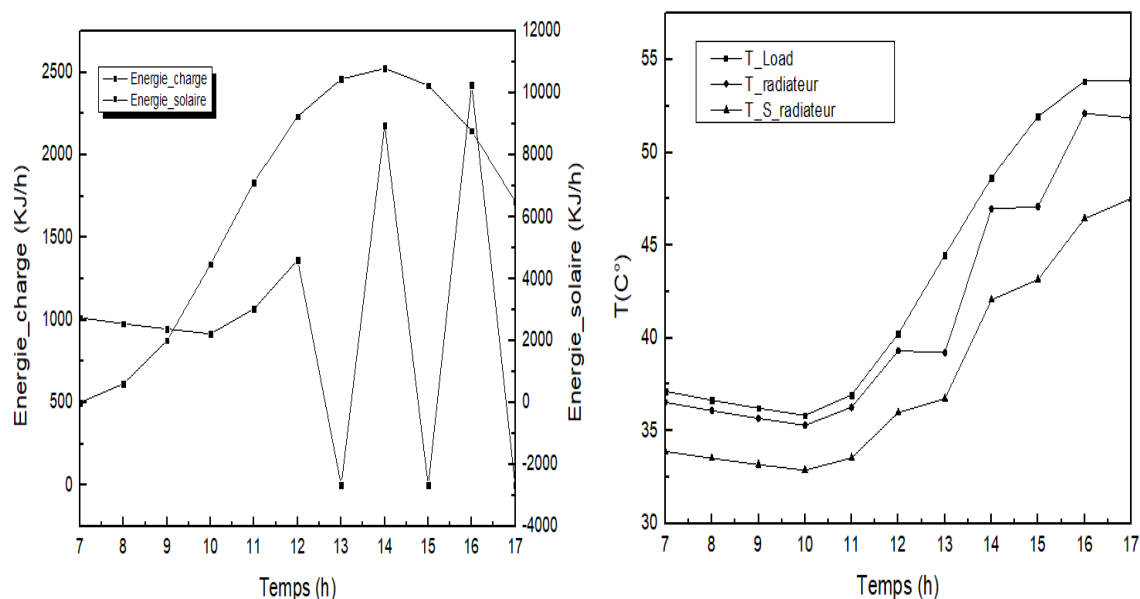


Figure. IV.17: Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps.

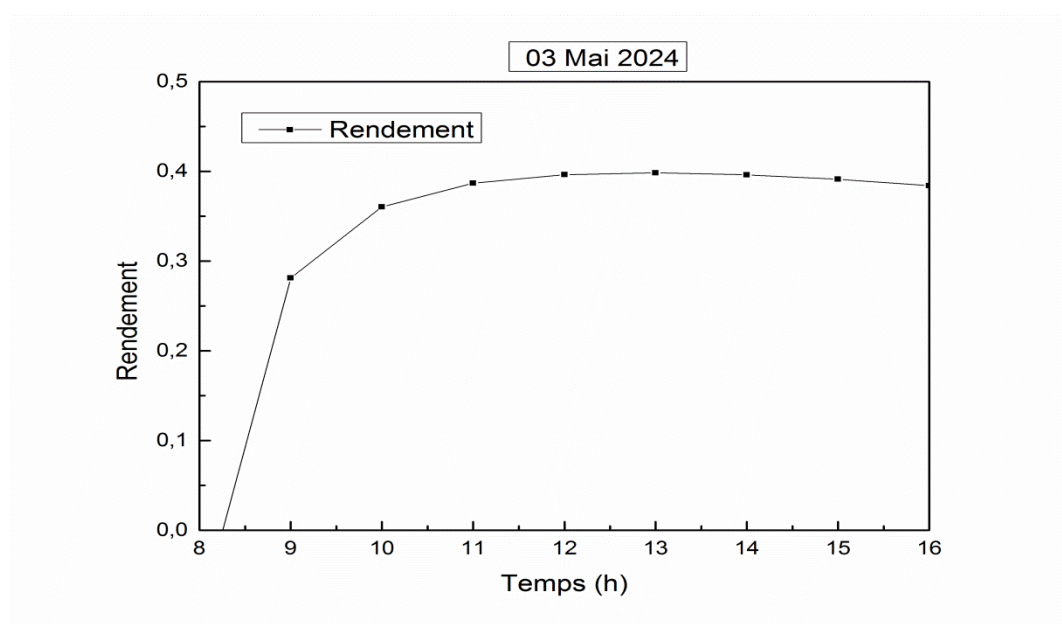


Figure.IV.18 : le rendement instantané en fonction du temps

Le 04/05/2024

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

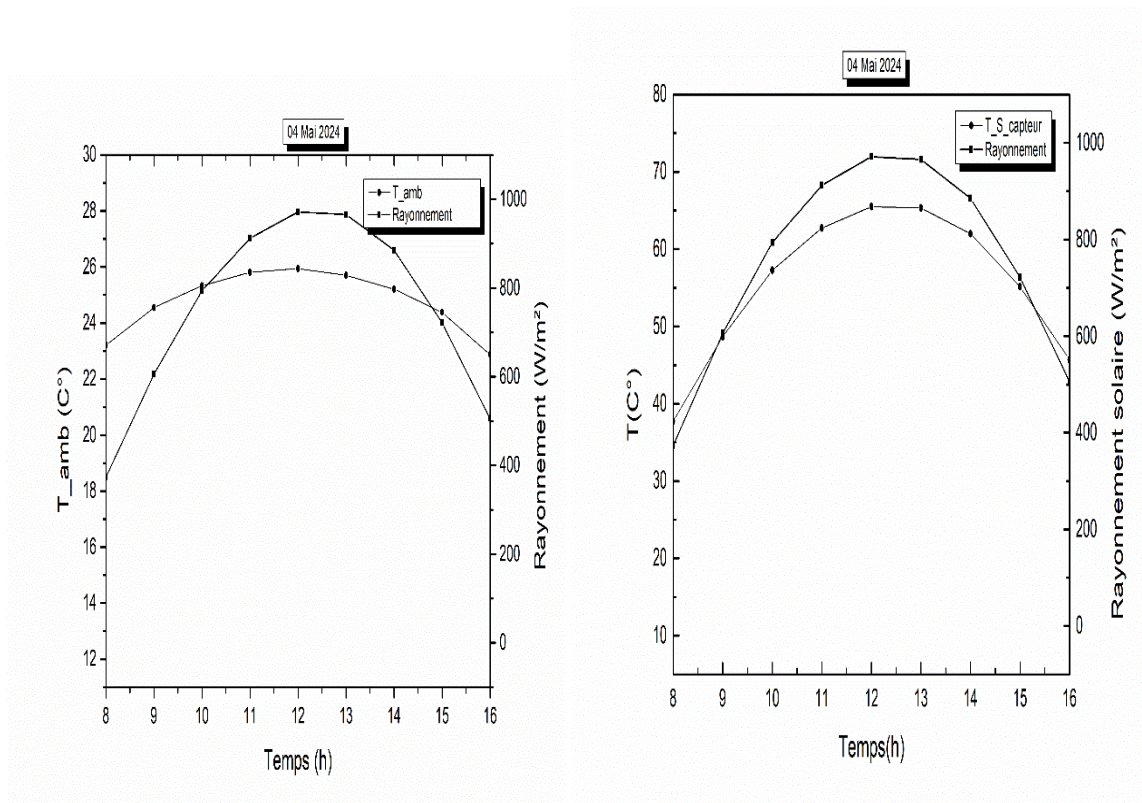


Figure.IV.19 : Les données météorologiques et la température de sortie en fonction du temps

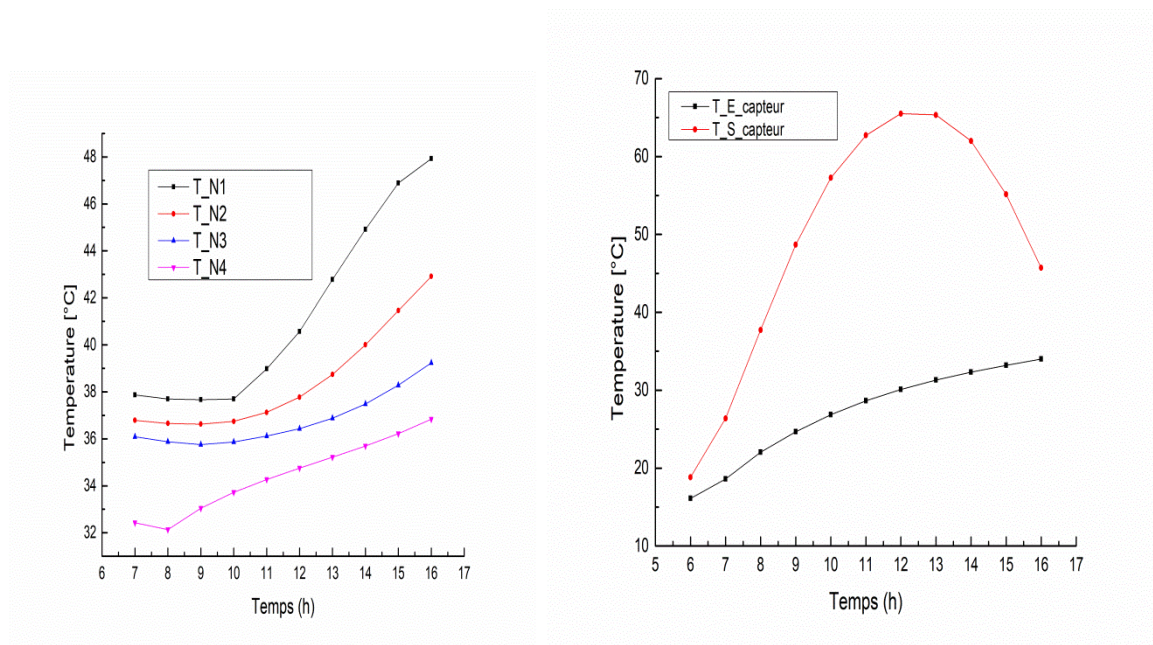


Figure.IV.20 : Les niveaux des températures à l'intérieur de la cuve de stockage et l'entrée et la sortie des capteurs en fonction du temps.

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

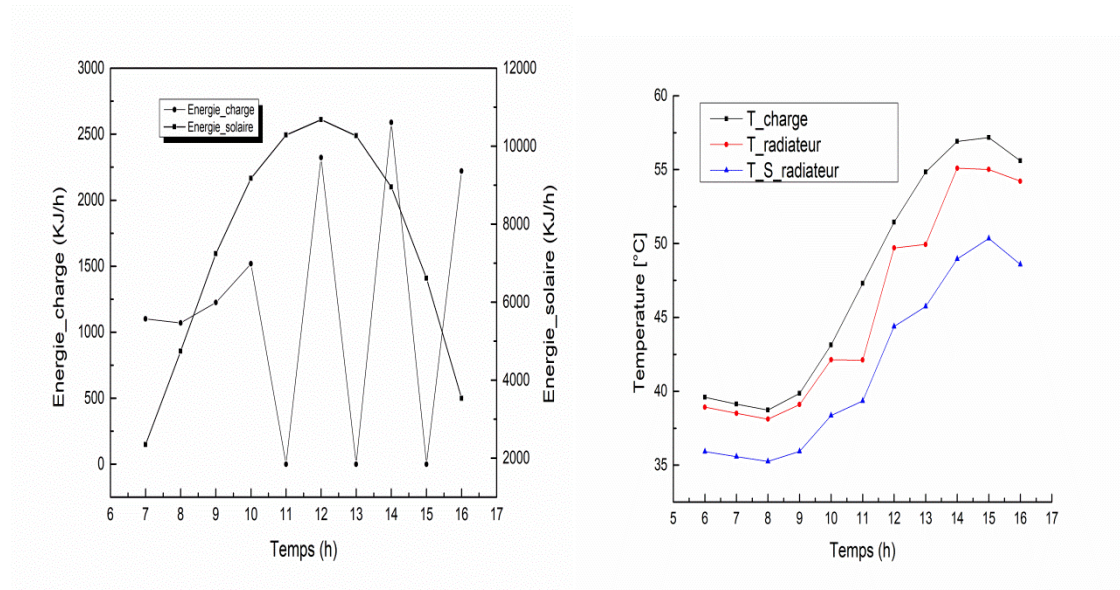


Figure.IV.21 : Les différentes températures de circuits de chauffage en fonction du temps.

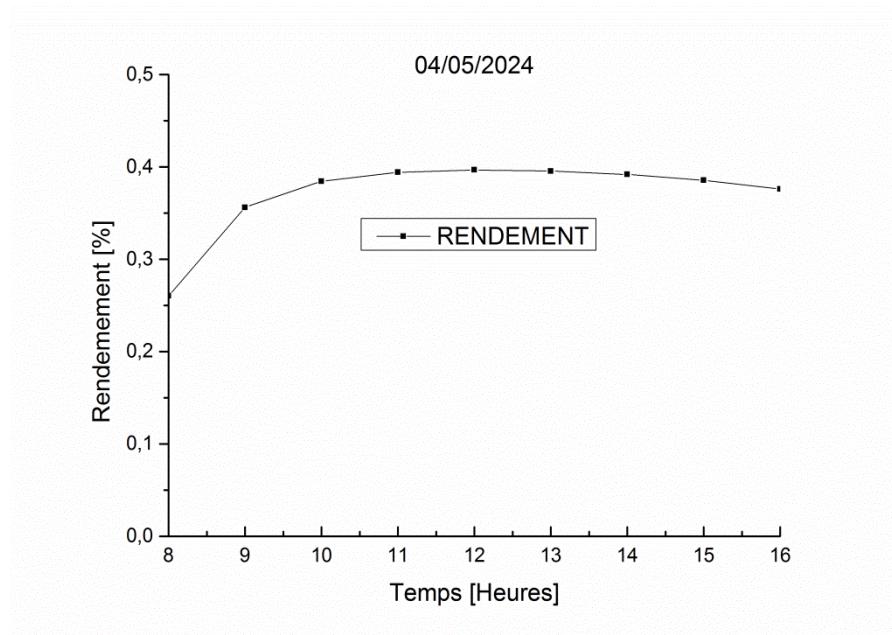


Figure.IV.22 : le rendememnt instantanné en fonction du temps.

D'après les résultats obtenus lors de la simulation, on peut constater que tous les résultats obtenus par la simulation montrent que notre installation donne des meilleures performances. En analysant les courbes des données météorologiques on voit clairement que les valeurs de rayonnement globales ainsi que celles des températures ambiantes sont tous favorable pour installation de ce genre de

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

système, à titre d'exemple des valeurs qui dépassent les 970 W/m^2 et des températures ambiante dépassant les 25°C pour ce site, ces valeurs de données météorologiques indiquent le site de Bou-Ismaïl est très favorable pour installation des systèmes de chauffage collectifs.

En analysant les courbes qui comparent le rayonnement global avec celle de la température de sortie des capteurs, on voit clairement que l'allure des températures de sorties suit celle de l'éclairement globale, alors on peut constater que le choix de site est très important où il faut choisir un site qui possède un gisement solaire et une durée d'insolation importants pour installer ce genre d'installation.

En analysant les températures d'entrées et de sorties des capteurs, toutes les allures obtenues montrent que la sortie est toujours supérieure à celle des entrées avec des valeurs très significatives où l'écart entre les entrées et les sorties dépasse les 40°C , cela indique qu'il y a une énergie importante absorbée par l'eau lors de la circulation à l'intérieur des capteurs, ces résultats montrent que notre modélisation est correcte et que notre système fonctionne très bien.

En analysant les températures obtenues au niveau des nœuds à l'intérieur de la cuve de stockage, on remarque clairement qu'il existe une stratification thermique à l'intérieur de la cuve de stockage. La cuve de stockage est un élément essentiel dans les systèmes de chauffages solaire collectifs car elle alimente le circuit secondaire (circuit de chauffage) en eau chaude, et comme la partie qui alimente les radiateurs en eau chaude se situe en haut de la cuve, alors la stratification au niveau de cette dernière donne un excellent aperçu à notre modélisation, ce qui va permettre à l'installation de fonctionner dans des meilleures conditions.

En analysant les courbes des allers-retours entre la cuve et les radiateurs où nous avons présenté l'énergie de charge qui représente la sortie de l'eau chaude vers les radiateurs, et l'énergie solaire qui représente la sortie des capteurs vers la cuve de stockage. L'allure de l'énergie solaire ou l'énergie thermique absorbée par l'eau qui est sous forme d'une cloche où cette dernière varie en fonction des conditions météorologiques, cela est dû au fait que le circuit primaire fonctionne sans système de régulation. Concernant l'énergie de charge ou bien l'énergie de

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

circuit de chauffage, on observe clairement qu'il existe des fluctuations lors de l'évolution de ce paramètre en fonction de temps, cela est dû que le fait le circuit secondaire fonctionne avec un système de régulation, la régulation fonctionne comme suit : une fois observé une différence de température entre le dernier radiateur et la température Load (Sortie cuve – radiateur), cet écart est fixé entre 8°C à 10°C, le régulateur donne l'ordre à la pompe de circulation du circuit secondaire de faire circuler l'eau, et quand l'écart diminue (enivrent 2°C), la pompe s'arrête, c'est pour cette raison qu'on observe des fluctuations une fois l'écart augmente, et quand la pompe circule et envoie de l'eau au circuit secondaire l'écart diminue et l'énergie augmente, donc les deux énergies représentent l'énergie utile des deux circuits à savoir :

Solaire : Entrée capteur-Sortie capteur

Chauffage (charge) : Sortie cuve – entrée radiateur

Concernant les figures qui représentent une comparaison des paramètres suivants :

- Température de charge : sortie cuve – entrée radiateur
- Température d'entrée de radiateur : entrée du premier radiateur
- Température de sortie de radiateur : Sortie du dernier radiateur

Les fluctuations au niveau de la température d'entrée du premier radiateur indiquent que la pompe est en fonctionnement, cela va mener à une augmentation de la charge (Sortie cuve – entrée radiateur), et une fois la charge diminue on observe une stabilité au niveau de cette courbe (entrée du premier radiateur) et ainsi de suite.

L'allure de la courbe qui représente la température de sortie du dernier radiateur, on voit clairement que cette dernière suit l'allure de celle d'entrée du premier radiateur, cela indique que notre modèle est correct et que le système fonctionne dans des meilleures conditions. Les trois paramètres cités précédemment suivent la même allure, à partir de cela on peut constater que l'installation fonctionne correctement et que notre modélisation et simulation reflète parfaitement la réalité.

Enfin, les courbes des rendements instantanés pour les différentes journées représentatives indiquent des valeurs raisonnables du rendement (dépassants les 40 %), les 60 % perdues sont dus aux pertes thermiques importantes lors d'une

Chapitre 4 : Simulation du projet étudié

grande augmentation des températures pendant le fonctionnement du système, les pertes aussi peuvent être optiques au niveau de la couverture transparente avant la conversion de l'énergie radiative du soleil en énergie thermique.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une modélisation et une simulation sous TRNSYS de notre système. Les résultats de la modélisation obtenus ont permis de déterminer les différentes performances de notre installation ainsi que l'évolution des différents paramètres en fonction du temps, les résultats ont montré également que le caractère intermittent de l'énergie solaire ainsi que les pertes thermiques représentent un inconvénient majeur sur le bon fonctionnement de ce genre d'installation, c'est pour cette raison l'intégration d'un système d'appoint est très nécessaire. Les résultats expérimentaux sont présentés dans le chapitre 5 suivant.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

V.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons tout d'abord faire une brève description du dispositif expérimental étudié, on va présenter l'instrumentation utilisée pendant les tests, et enfin on va présenter les différents résultats expérimentaux obtenus pendant les tests à savoir : les températures d'entrées des capteurs , les températures de sorties , la température au niveau de la cuve de stockage (serpentin ,haut du ballon, bas du ballon), la température de la cuve vers les radiateurs et vice versa , la température des bureaux et celle de la bibliothèque.

V.2.Présentation de l'organisme d'accueil :

Le stage a été effectué à l'unité de développement des équipements solaires UDES qui a été créée le 09 janvier 1988, qui se situe à Bou-Ismaïl wilaya de Tipaza. L'UDES a été intégrée dans le centre de développement des énergies renouvelables CDER.

Les missions principales de l'Unité de Développement des Équipements Solaires sont :

- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables pour la production de la chaleur, l'électricité, le froid et le traitement des eaux ;
- Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes, équipements et des préséries ;
- Etablir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le transfert et la maîtrise de nouvelles technologies ;
- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification, l'homologation et la certification des équipements développés.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figure.V.1 : l'unité de développement des équipements solaires (UDES, CDER).

V.3. Déroulement du processus expérimental :

L'installation est composée d'un système de chauffage solaire thermique destinée à alimenter des radiateurs en eau chaude, les radiateurs sont disposés dans les bureaux des chercheurs au niveau de l'UDES.

Ce système de production d'énergie solaire thermique a été dimensionné pour alimenter sept radiateurs en acier travaillant à basses températures ($50^{\circ}\text{C}/60^{\circ}\text{C}$) et de puissance 1.5 kW, c'est un dispositif hautement technologique qui exploite une ressource naturelle propre, inépuisable et gratuite. Les radiateurs sont installés dans les quatre locaux à chauffer et la bibliothèque.

L'installation est composée de 16 capteurs solaires plans et une cuve de stockage fabriquée à l'atelier mécanique de l'UDES, le système est muni d'une double régulation (contrôle), une pour réguler le système primaire de l'installation (Capteurs solaires + cuve de stockage), et une autre pour réguler le système secondaire de l'installation (radiateurs), un appoint électrique (résistance) est installé en bas de la cuve de stockage, alors l'installation est composée :

- 16 capteurs solaires plans.
- Cuve de stockage ($V=1500$ Litres, $D=90$ cm, $h=2$ m).
- Deux groupes hydrauliques pour assurer une bonne circulation du fluide caloporteur dans le circuit primaire et le circuit secondaire.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Les capteurs sont installés sur la terrasse de l'UDES solaires sont posés sur des structures métalliques avec une inclinaison de 45° et une configuration mixte (Série + parallèle)

La figure ci-dessous représente le schéma synoptique de notre installation qui illustre les différents composants de cette dernière

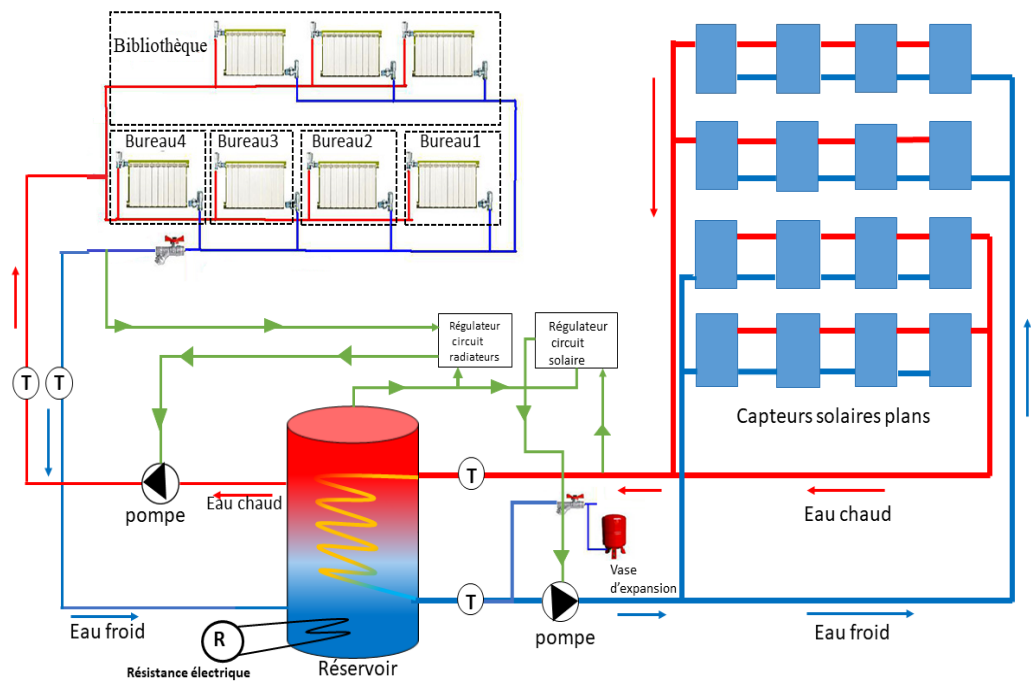


Figure.V.2: Schéma synoptique de l'installation.



Figure.V.3: les capteurs solaires posés sur la terrasse de l'UDES.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figure. V.4 :Système de stockage.

Des conduites entre le champ des capteurs solaires et la cuve de stockage, et aussi entre les radiateurs et la cuve de stockage. La cuve de stockage est reliée par une tuyauterie de $D=25\text{ mm}$ isolé avec l'armaflex



Figure.V.5 : les conduites isolées avec l'armaflex.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Un échangeur thermique en cuivre est introduit dans la partie haute immergé à l'intérieur de la cuve (D=70 cm, h=1.22 m), son rôle est de transférer la quantité de chaleur véhiculée par le HTF circulant dans les capteurs solaires vers l'eau stockée dans la cuve.

- Un appoint électrique est installé au bas de la cuve



Figure.V.6 : la résistance électrique avec son armoire.

L'objectif principal de notre étude était d'étudier les performances thermiques de notre installation, dans ce cadre j'ai réalisé un stage au niveau de l'unité de développement des équipements solaires, Centre de développement des énergies renouvelables, UDES, CDER. A mon arrivée à l'UDES l'installation était à l'arrêt ou nous avons contribué à faire des rénovations afin de rendre l'installation fonctionnelle, dans ce qui suit on va présenter les différents travaux réalisés, au début l'isolation thermique de la cuve de stockage a été renouveler. La première étape de notre travail expérimental était de renouveler l'isolation thermique où nous avons posé la laine de verre de 10 cm d'épaisseur afin de maintenir une température constante à l'intérieur de la cuve.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figure.V.7: l'isolation thermique de la cuve de stockage avant et après le début des travaux.

Au début des travaux on voulait connaître le comportement thermique de notre installation, pour se faire on s'est référé à deux groupes hydrauliques intégré dans l'installation :

Le 1^{er} groupe hydraulique est composé d'une pompe qui assure la circulation du fluide caloporteur, deux indicateurs de températures aller /retour du fluide, les thermomètres avec les cadrans rouge et bleu mesurent respectivement la température des conduits d'eau chaude et froide. Un débitmètre avec son régulation assure un équilibrage du circuit primaire, un capteur de pression est installé afin d'éviter la surpression à l'intérieur des tubes. Un manomètre est utilisé pour mesurer la pression du fluide caloporteur et pour s'assurer que les pressions restent dans les plages de sécuritaires.

- Le circuit secondaire qui représente le circuit de distribution est équipé de :

Un groupe hydraulique ayant les mêmes composants que celui du circuit primaire et sa fonction est d'assurer la circulation de l'eau chaude dans les radiateurs.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figure.V.8 : le débitmètre



Figure.V.9 : Thermomètre et manomètres mesurant la température et la pression.

Le vase d'expansion est un composant essentiel dans notre système, il conçu pour absorber les variations de volume du fluide caloporteur causées par les changements de température.

Un purgeur pour éliminer l'air empoisonné dans les conduites du fluide caloporteur. Notre purgeur est installé au point le plus haut du système, là où l'air est susceptible de s'accumuler.



Figure.V.10 : Le purgeur

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figure.V.11 :Vase d'expansion.

- La soupape d'un capteur plan thermique, également connue sous le nom de soupape de décharge, est un dispositif utilisé dans les systèmes de chauffage solaire pour éviter les surpressions. Elle est conçue de libérer la pression excessive qui pourrait s'accumuler dans le circuit hydraulique thermique.



Figure.V.12 : Soupape de sécurité .

Dans notre installation nous avons deux régulateurs : un régulateur pour le circuit solaire et l'autre pour le réservoir, dans notre étude la variable à contrôler c'est la température.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

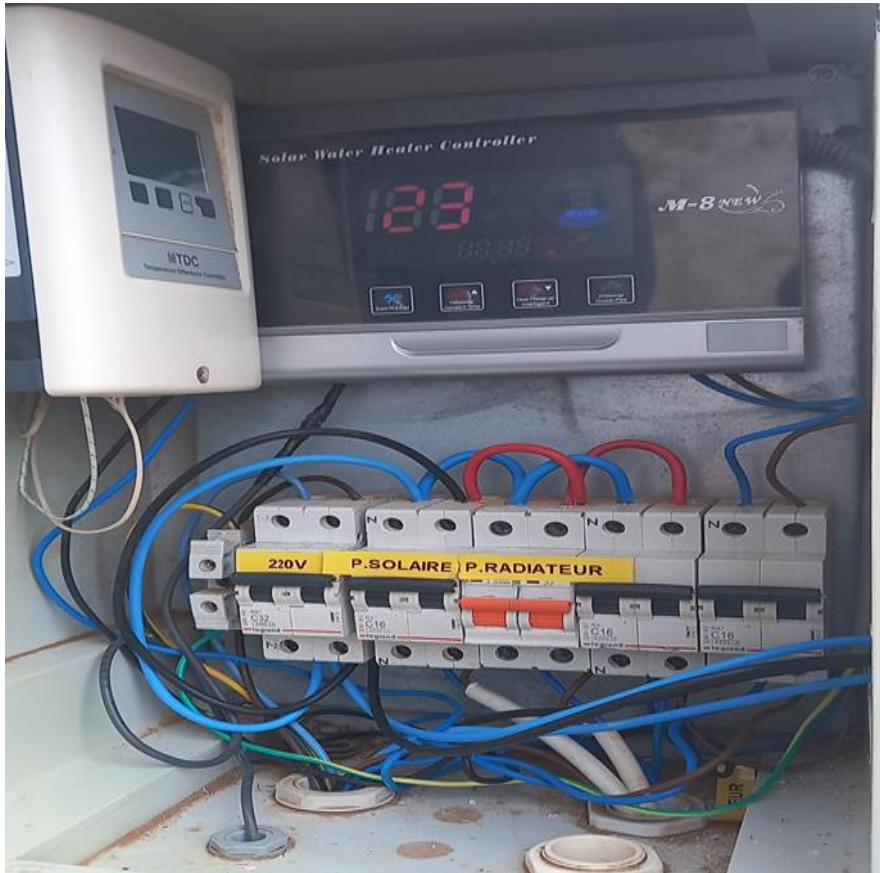


Figure.V.13 : Systèmes de régulation des deux circuits.

Un thermocouple de type K juste à la sortie des capteurs lié au régulateur de circuit solaire, son rôle est d'assurer la température de fonctionnement du circuit solaire, où une valeur de 25 °C a été imposée pour l'arrêt où le déclenchement de la pompe solaire, par exemple dans notre cas si la température est inférieure à 25°C la pompe de circuit solaire s'arrête.

Un autre capteur de température (PT100) est installé à l'intérieur de la cuve de stockage lié au régulateur de la cuve de stockage, si la température au niveau de la cuve est inférieure à 45 °C, la résistance électrique déclenche afin de prendre le relai pour le chauffage de l'eau.

V.4.L'accord des différents instruments de mesures :

- L'accord des thermocouples :

Nous avons accordé les différents thermocouples de types K avec un système d'acquisition situé dans une chambre d'acquisition qui dispose d'un DATALogger qui possède une interface permettant de lier à un PC , et grâce à un logiciel de lecteur qui permis d'afficher les données sous forme d'un fichier Excel CSV.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

La prochaine étape effectuée était la mise en place des thermocouples dans les différents endroits où nous voulons mesurer les températures, cette étape a été suivie d'une protection de toute la tuyauterie de l'installation avec un isolant multicouche.



Figure.V.14 : La mise en place des différents thermocouples

- L'accord du pyranomètre :

Pour mesurer le rayonnement solaire global, un pyranomètre est installé sur une surface inclinée ou il peut capter le rayonnement solaire sans obstruction, ensuite on a connecté le fil du pyranomètre aux entrées appropriées du système d'acquisition, puis on a configuré le système d'action pour lire les signaux du pyranomètre.

Nous avons converti les résultats obtenus de mv en unités de l'éclairement solaire (W/m^2).

Afin d'estimer la vitesse du vent, un anémomètre est mis en place dans notre installation



Figure.V.15 : Le pyromètre et l'anémomètre.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

V.5. Les résultats expérimentaux :

Après avoir réalisé les différents tests des deux circuits (Circuit solaire et circuit de chauffage), nous avons enregistré les différents résultats obtenus pour un pas de temps de 30 minutes de 8h00 jusqu'à 16h00, les résultats constatés sont :

- L'éclairement global
- La température ambiante
- Les températures d'entrées de chaque rangée de capteur
- Les températures de sortie de la deuxième rangée
- La température de la sortie totale
- La température de la cuve de stockage
- Les températures du haut et du bas de la cuve
- Température de sortie de la cuve vers les radiateurs
- Température de sortie des radiateurs vers la cuve de stockage
- La température des différents bureaux ainsi que celle de la température de la bibliothèque

A l'aide de ces résultats on peut calculer les énergies utiles ainsi que les différents rendements, nous avons retenus quatre journées représentatives durant tout le stage à savoir :

27/04/2024 ; 29/04/2024 ; 03/05/2024 ; 04/05/2024 ; ces derniers représentent presque la totalité des journées du stage en terme de rayonnement solaire et de températures ambiante.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Le 27/04/2024 :

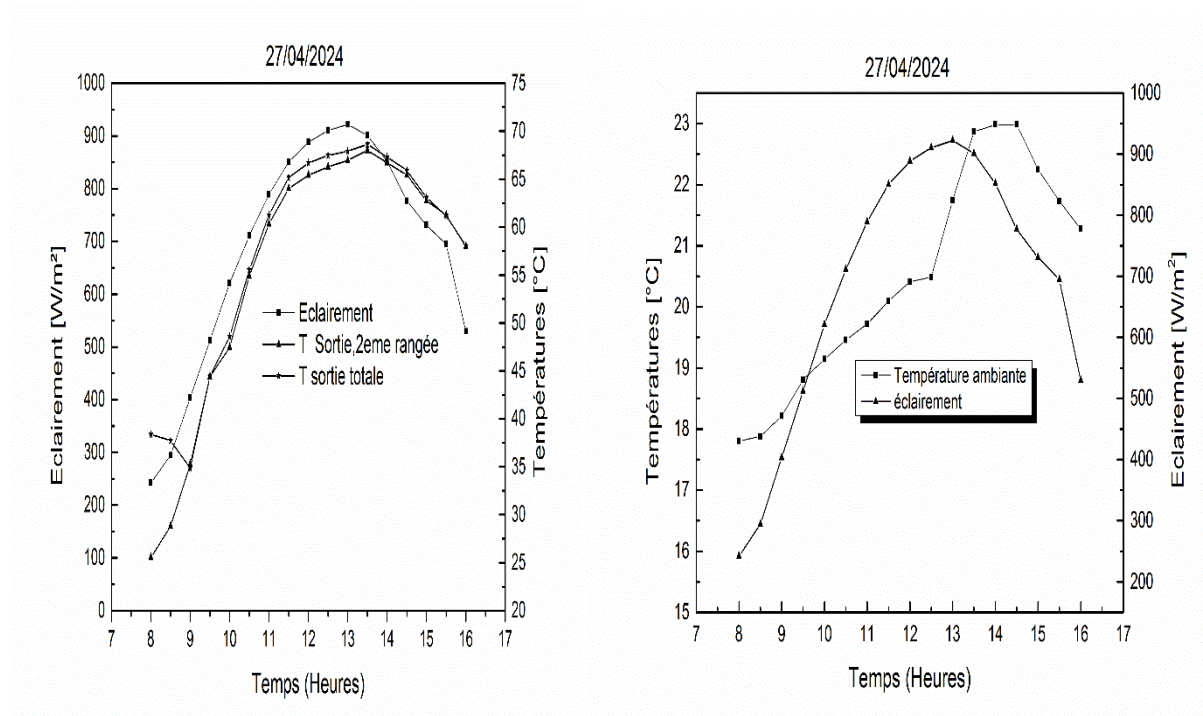


Figure.V.16: Les données météorologique et les températures de sorties en fonction de temps.

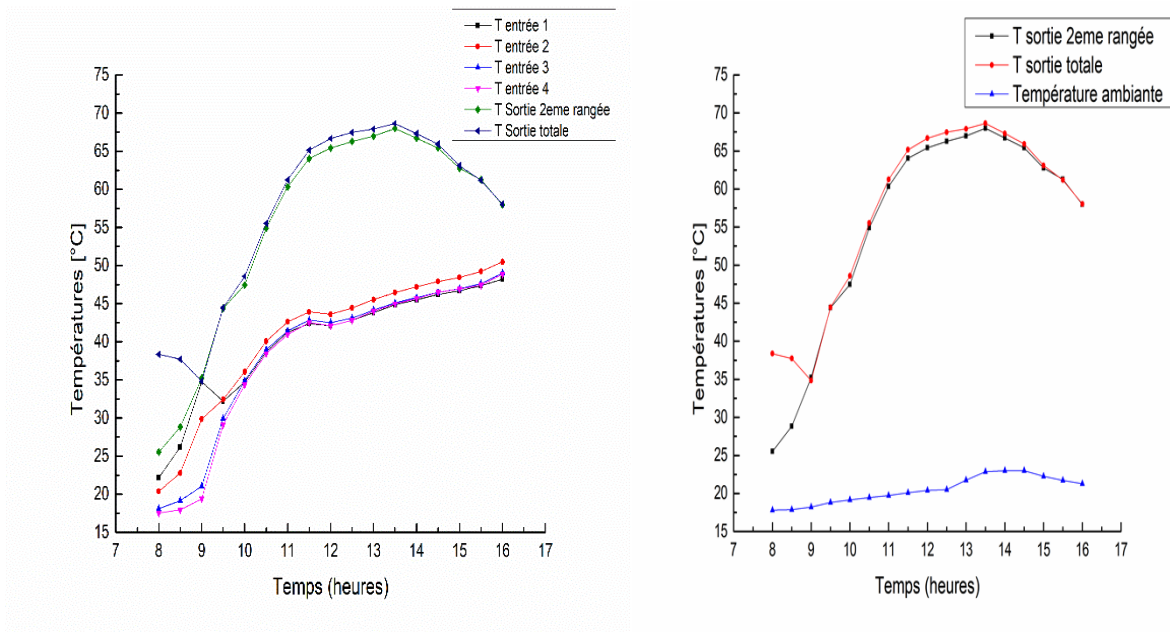


Figure. V.17 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

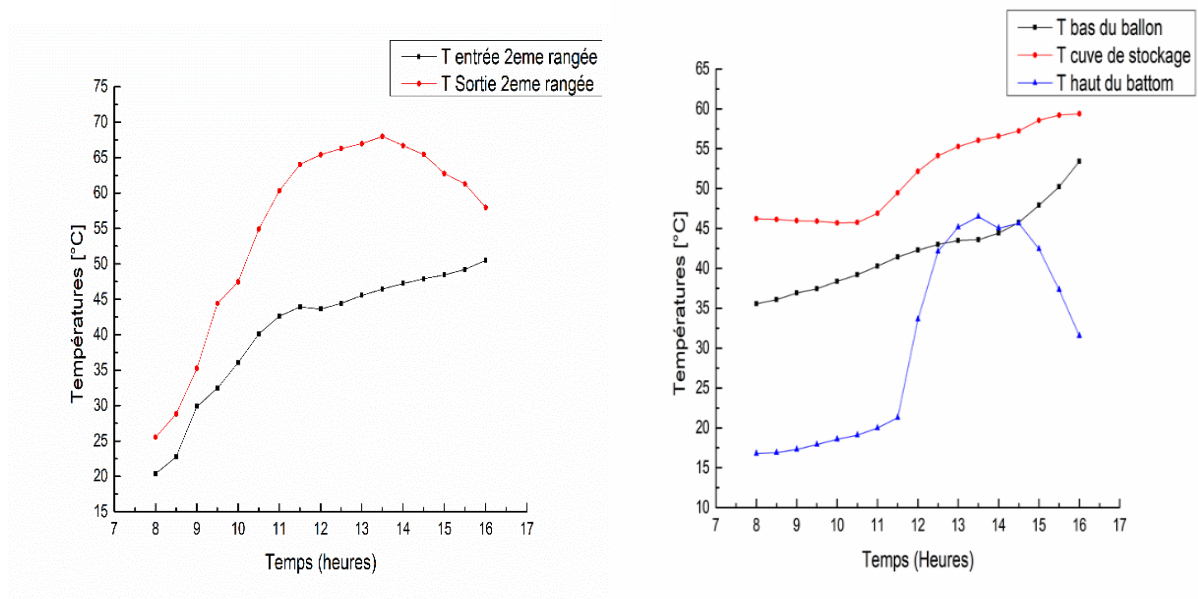


Figure. V.18: les températures au niveau de la cuve de stockage et les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

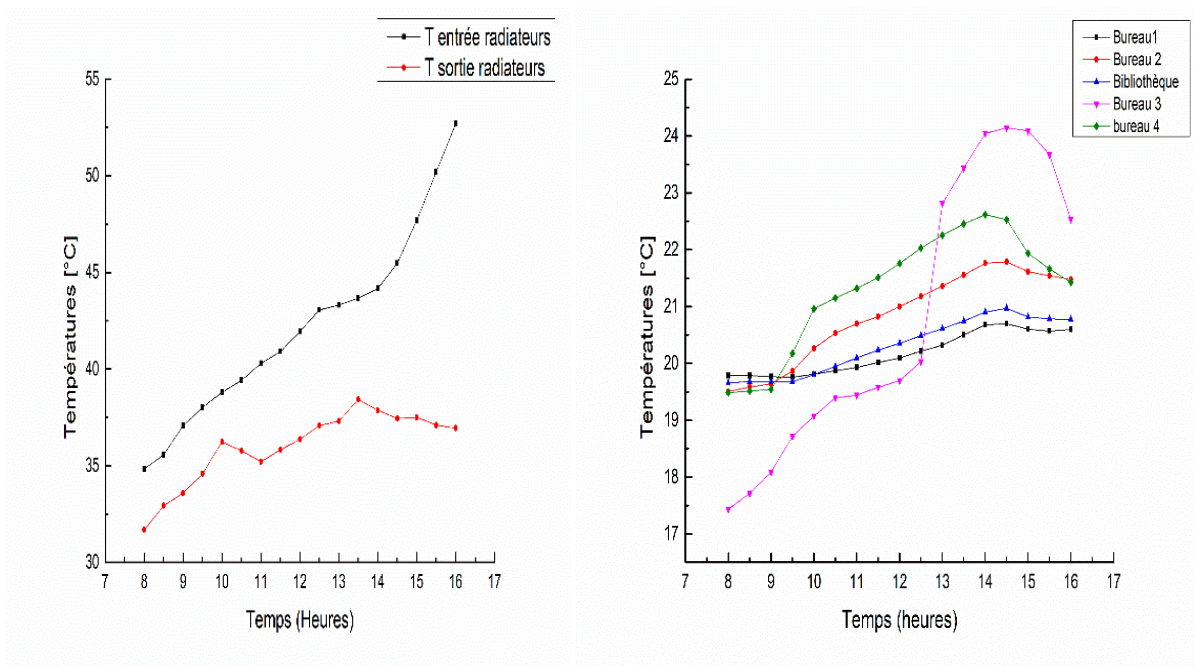


Figure. V.19 : Les températures des différents bureaux et les températures d'entrées et de sorties des radiateurs en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Le 29/05/2024 :

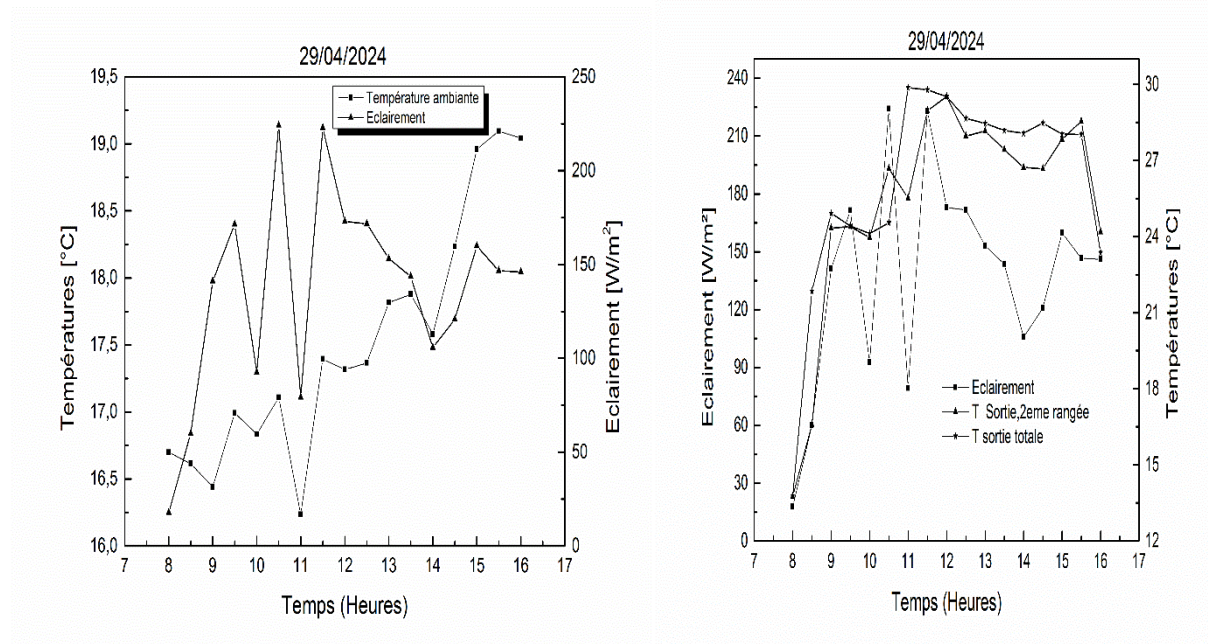


Figure.V.20: Les données météorologique en fonction de temps.

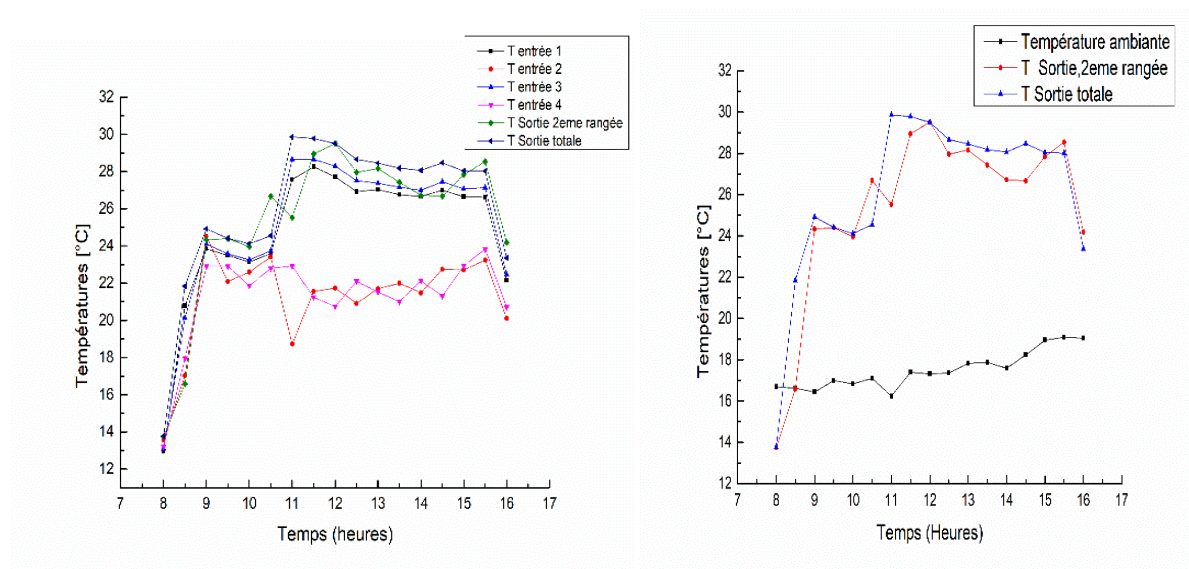


Figure. V.21 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

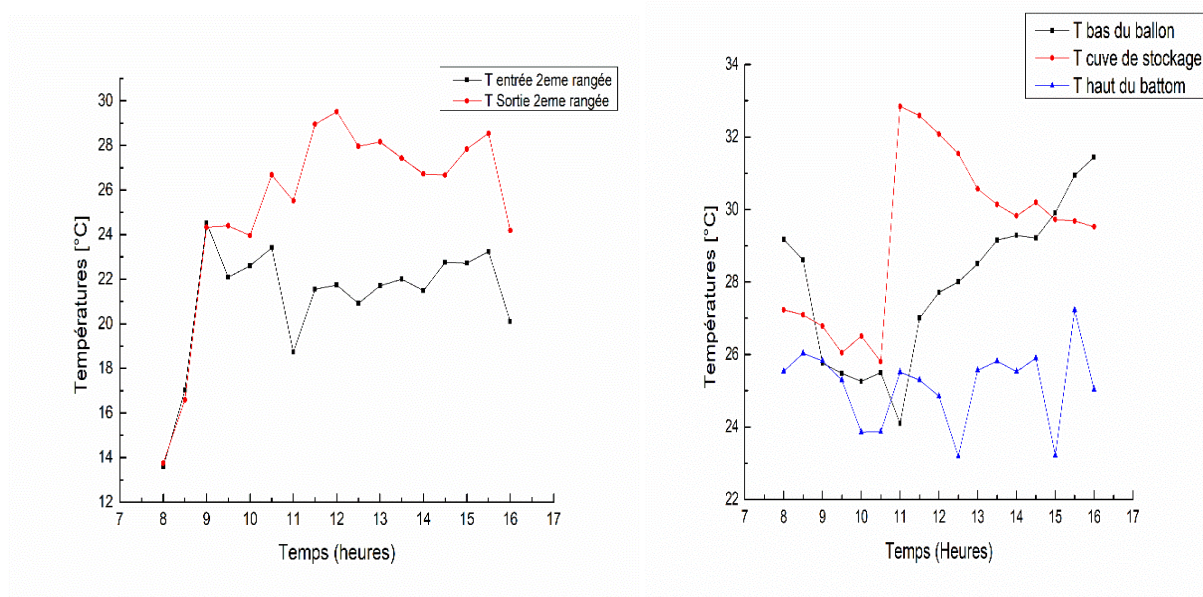


Figure.V.22 : les températures au niveau de la cuve de stockage et les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

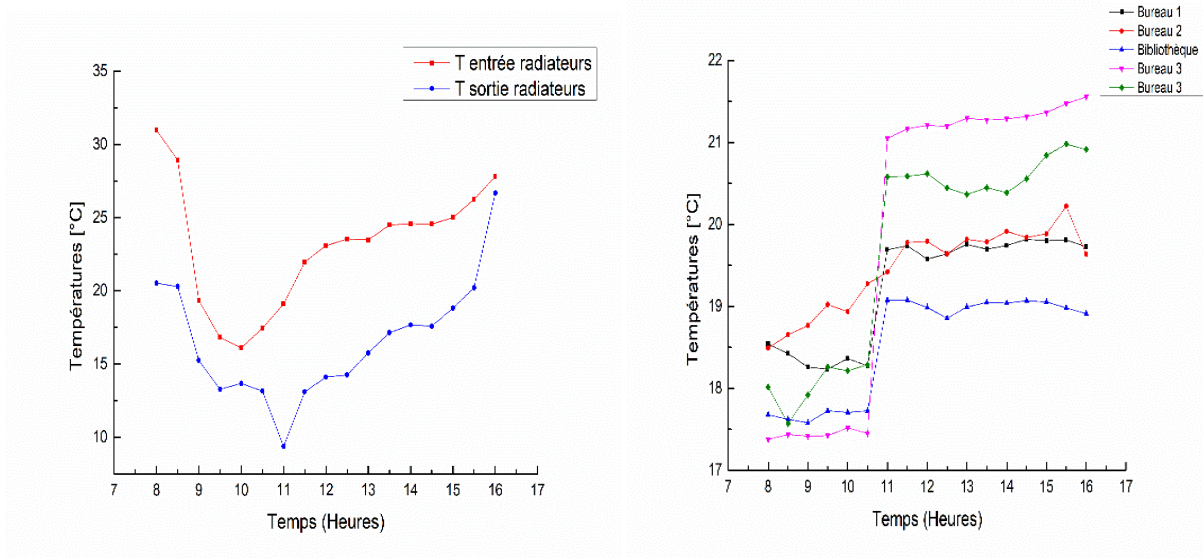


Figure.V.23 : Les températures des différents bureaux et les températures d'entrées et de sorties des radiateurs en fonction de temps.

Le 03/05/2024 :

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

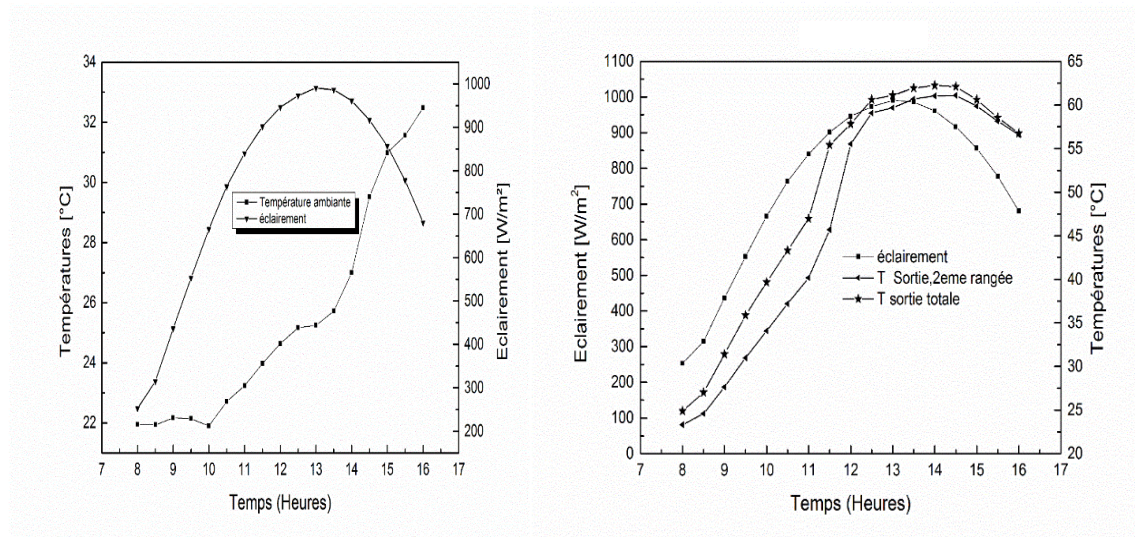


Figure.V.24 : Les données météorologique en fonction de temps.

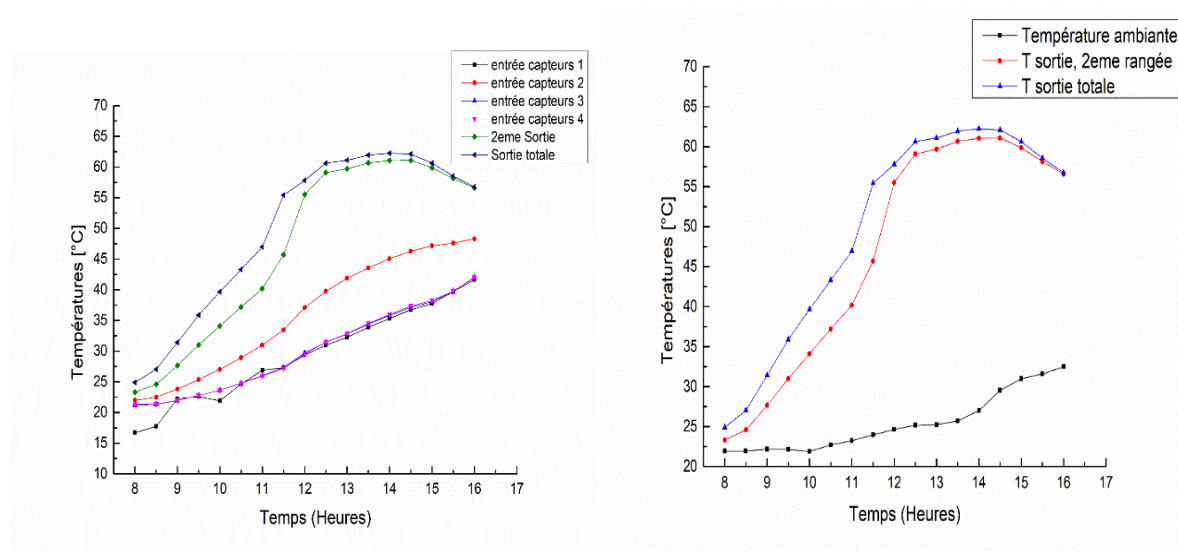
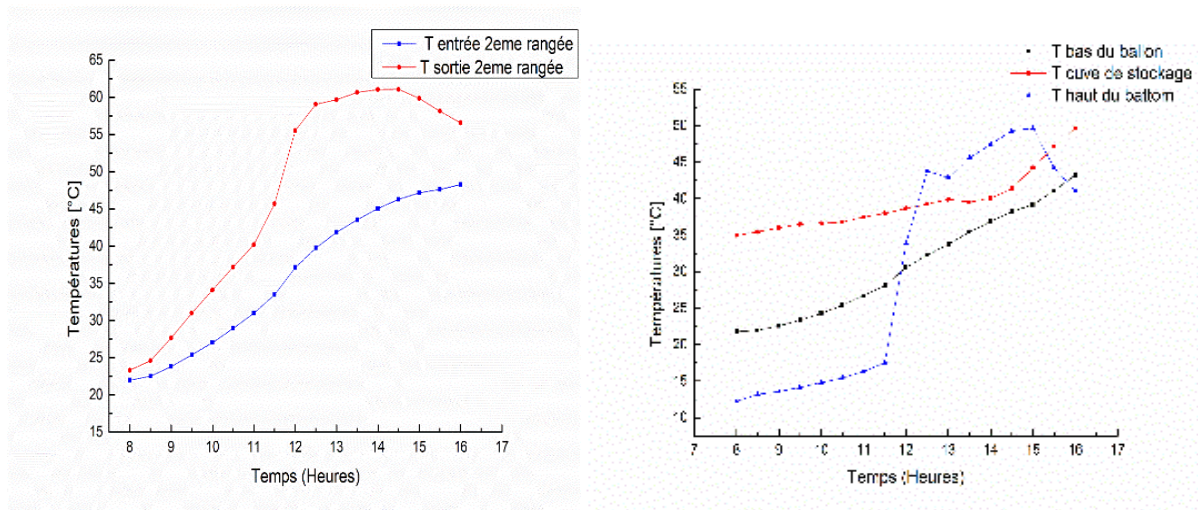


Figure.V.25: Les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale



Figur.V.26 : les températures au niveau de la cuve de stockage et les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

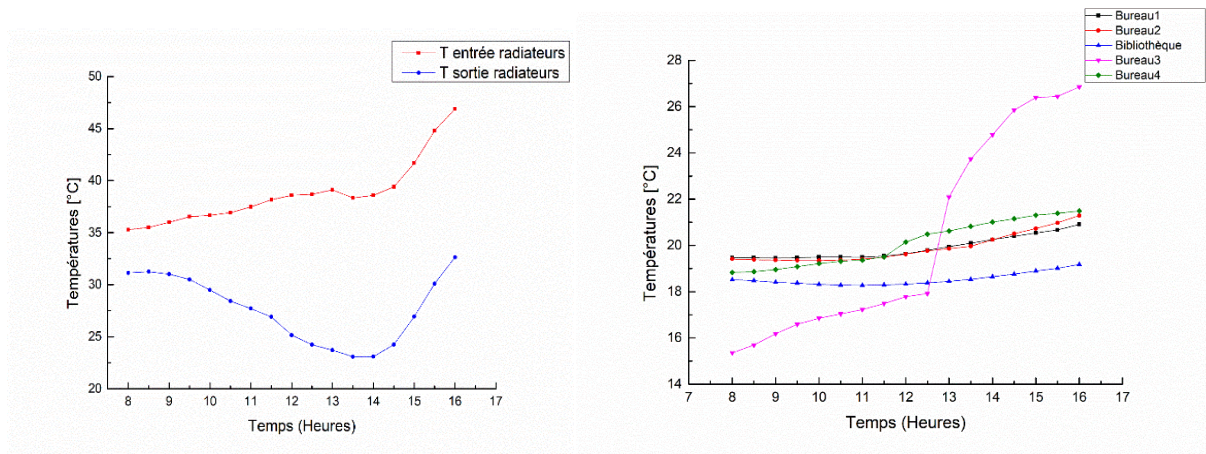


Figure.V.27 : Les températures des différents bureaux et les températures d'entrées et de sorties des radiateurs en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Le 04/05/2024 :

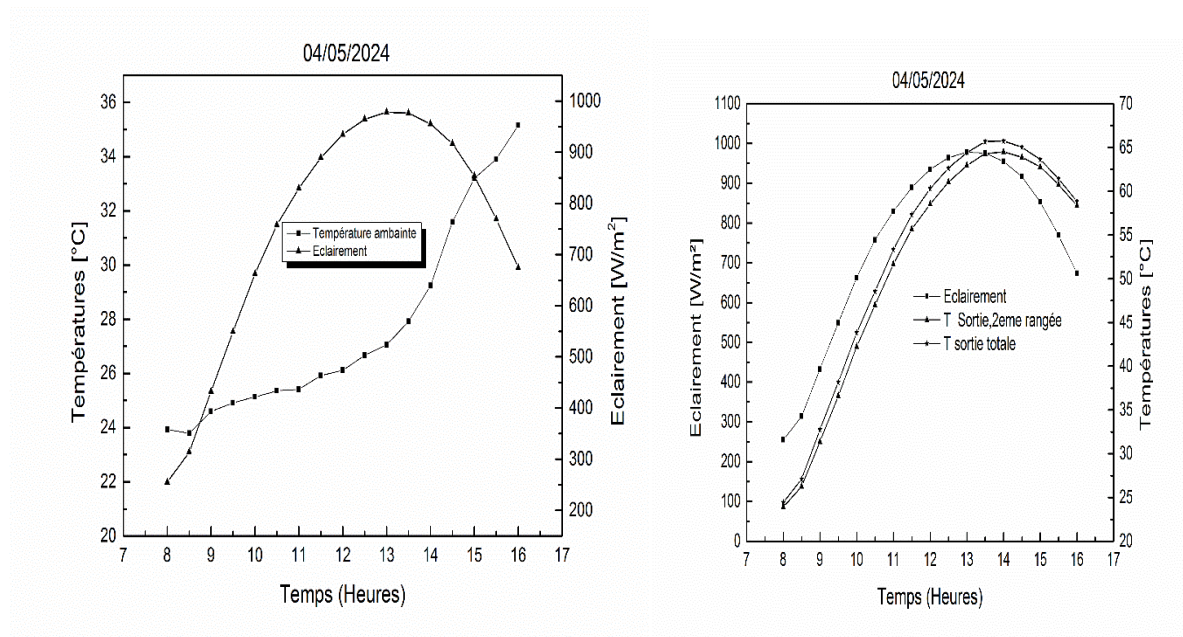


Figure.V.28 : Les données météorologique en fonction de temps.

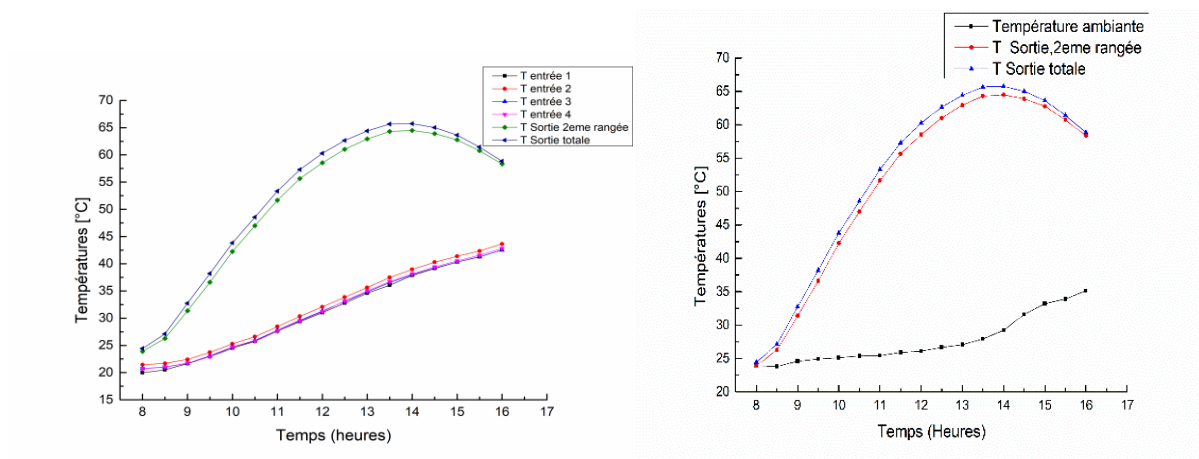


Figure.V.29 : Les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

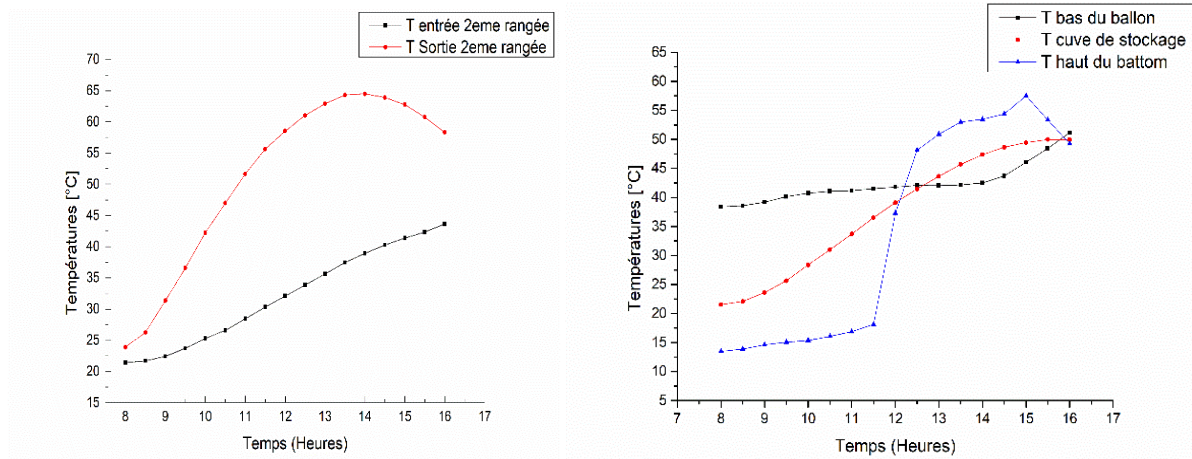


Figure.V.30 : les températures au niveau de la cuve de stockage et les températures d'entrées et de sorties en fonction de temps.

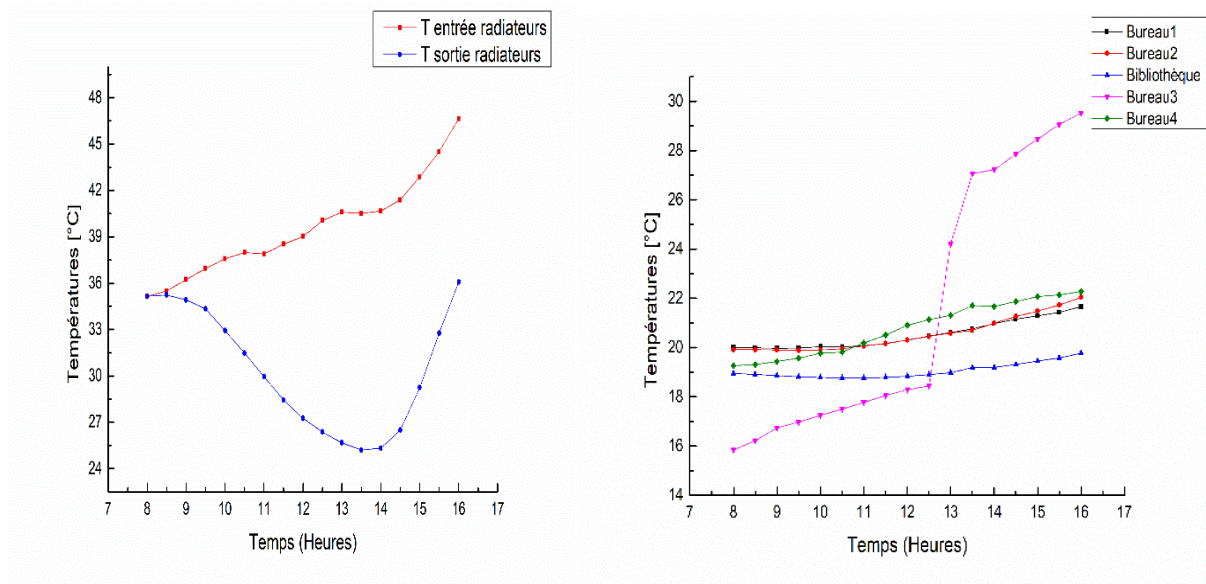


Figure.V.31 : Les températures des différents bureaux et les températures d'entrées et de sorties des radiateurs en fonction de temps.

D'après les résultats obtenus lors des tests, il est clair que la plus part des températures mesurées varient en fonction des conditions météorologiques à savoir : l'éclairement direct et la température ambiante, en analysant les résultats obtenus pour l'éclairement solaire mesuré par un pyranomètre les valeurs obtenus pour le site de Bou-Ismaïl sont favorable à installer ce genre d'application (chauffage solaires collectif), avec des valeurs très significatives qui atteints les 1000 W/m^2 pour la journée la plus favorable pendant les tests (04/05/2024), avec une température ambiante qui atteints $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$, cela nous a motivé à étudier ce genre d'applications solaires thermiques qui peuvent facilement remplacer les systèmes de

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

chauffages conventionnel. En analysant les différentes températures du circuit primaire où notre installation possède quatre entrées pour les quatre séries des capteurs, les valeurs d'entrées sont très significatives, cela est bien apparent dans l'écart obtenu entre les différentes entrées (2°C), cela signifie que l'installation fonctionne très bien et que le circuit solaire avec son système de régulation sont en très bon état, prenant la journée la plus défavorable (29/04/2024) où l'écart entre les entrées est important (10°C). En analysant les deux sorties obtenus (sortie rangée 2 et sortie totale), il est à noter que pour les trois journées favorables, l'écart est presque nul entre les deux sorties, cette conception de maintenir deux sorties dans l'installation est de tester les deux sorties afin de voir le comportement thermique en termes de pertes dans le long des tuyauteries. D'après les entrées et les sorties de notre système, on peut constater que les pertes thermiques au niveau du circuit solaire sont très bien maîtrisées ce qui donne un très bon aperçu de notre installation.

D'après les résultats obtenus pour la cuve de stockage on voit clairement qu'il existe une stratification thermique à l'intérieur de la cuve (le haut, au niveau du serpentin, et le bas), avec des valeurs de 52°C , 48°C et 35°C respectivement, cela est due à une différence de densité entre les trois niveaux de l'eau à l'intérieur du ballon, ces valeurs permettent d'avoir un fonctionnement idéal de notre installation où la sortie de l'eau chaude pour alimenter les radiateurs est située dans la partie haute de la cuve, et le retour des radiateurs vers la cuve est situé dans la partie basse. Le bon fonctionnement de la cuve de stockage permet d'avoir de bonnes performances thermiques et permet aussi d'assurer une température de consigne qui satisfait la demande de notre installation, il est à noter que la capacité de maintenir la chaleur à l'intérieur de la cuve est très grande (10°C de diminution de température durant toute la nuit, 60°C vers 50°C), cela revient à une très bonne isolation thermique ainsi que le circuit solaire fonctionne très bien.

Le circuit de chauffage ou le circuit secondaire est alimenté par la cuve de stockage, on voit clairement un écart presque constant pour les trois journées favorables (10°C), avec 46°C et 36°C pour l'entrée et la sortie des radiateurs de la journée la plus favorable, et 10°C d'écart également pour la journée la plus défavorable avec 25°C et 19°C , ces niveaux de température que nous avons obtenus lors des tests sont très significatifs, où la température à l'entrée des radiateurs doit être comprise entre 40 et 50°C , ce qui est conforme avec les résultats expérimentaux obtenus, ou on peut obtenir la température du confort (23°C) à l'intérieur des locaux à chauffer plus facilement.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Notre système est destiné à alimenter en eau chaude un circuit de chauffage qui contient des tuyauteries et des radiateurs, ces derniers sont utilisés pour chauffer nos locaux.

D'après les températures mesurées obtenus dans les différents locaux, on a enregistré une variation entre 20 et 24 °C pour les journées représentatives du stage, ces valeurs sont très significatives où la température du confort a été obtenue largement, ces valeurs donnent un excellent aperçu à notre système de production d'énergie thermique pour le chauffage des locaux, où le système d'appoint n'a pas été utilisé à part dans des journées très défavorables (29/04/2024). Il est à noter que la température obtenue pour la bibliothèque est toujours inférieure à celles des bureaux car sa superficie est plus grande. On constate alors que notre système peut satisfaire la demande en chauffage pendant la saison hivernale, ce qui confirme que le dimensionnement qui a été réalisé au par avant est correct.

Calcul des performances :

Afin d'étudier le comportement thermique de notre installation nous avons calculé les différentes performances de notre installation, elles concernent : l'énergie utile de chaque circuit ainsi que le rendement.

Le 27/04/2024 :

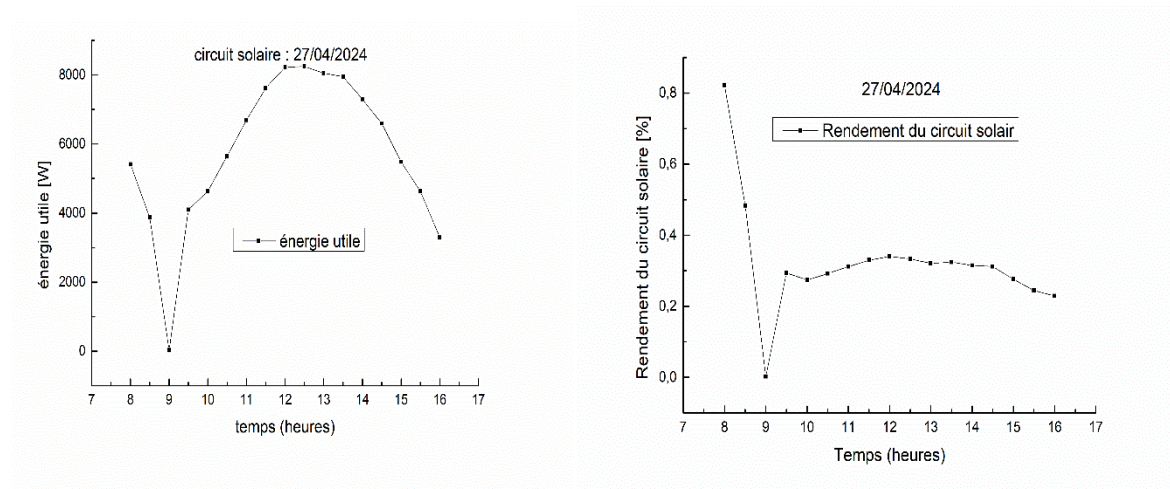


Figure.V.32: Les performances pour le circuit solaire.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

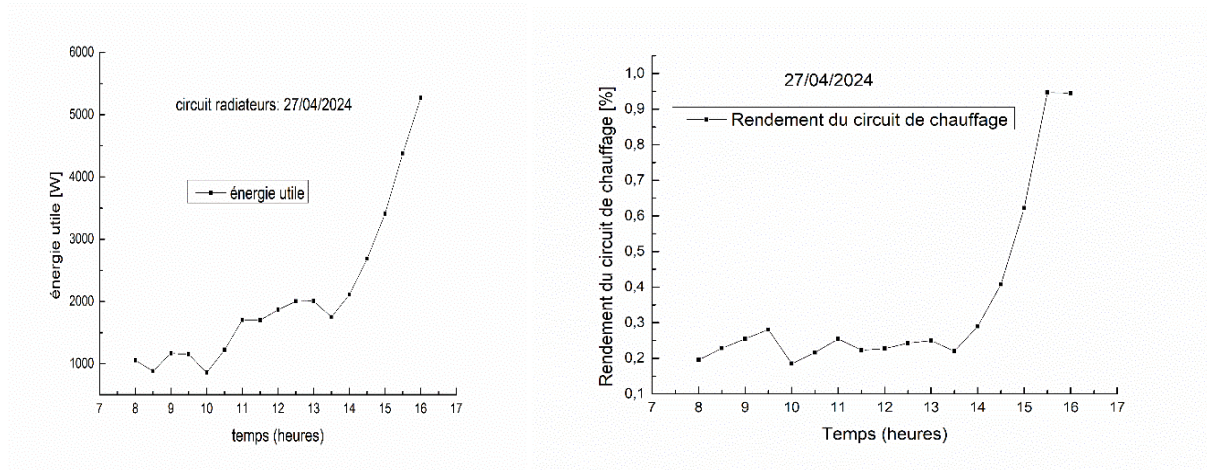


Figure.V.33 : Les performances pour le circuit du chauffage

Le 29/04/2024 :

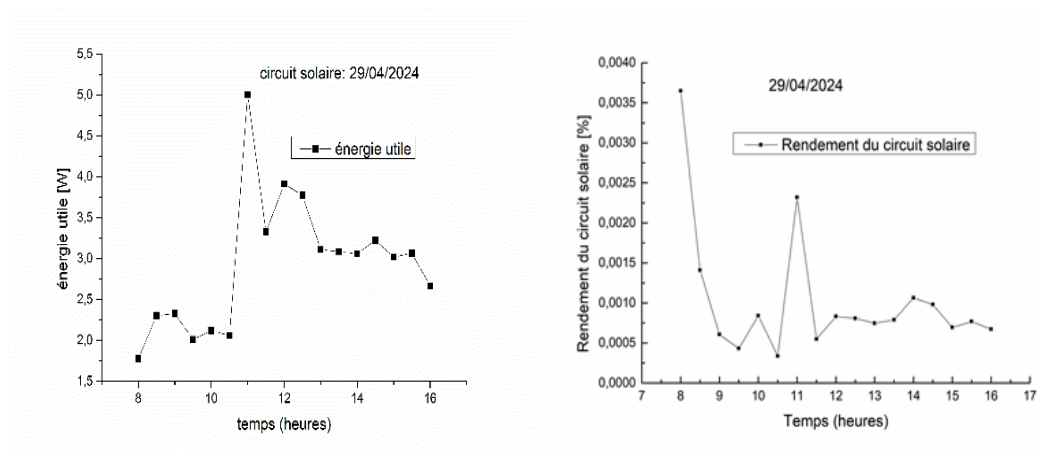


Figure.V.34 : Les performances pour le circuit solaire

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

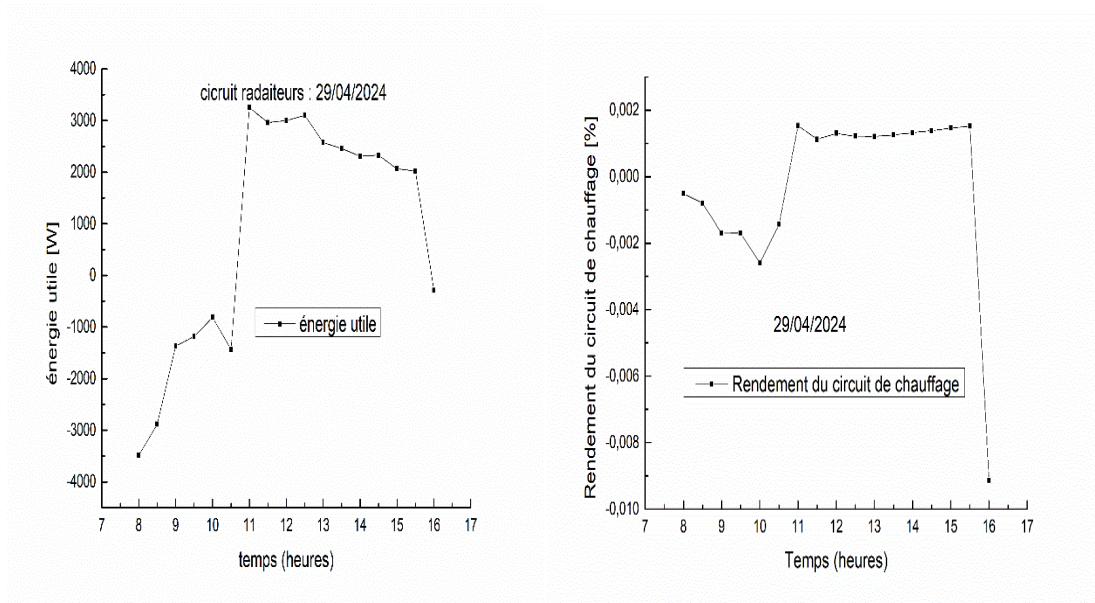


Figure.V.35 : Les performances pour le circuit du chauffage

Le 03/05/2024 :

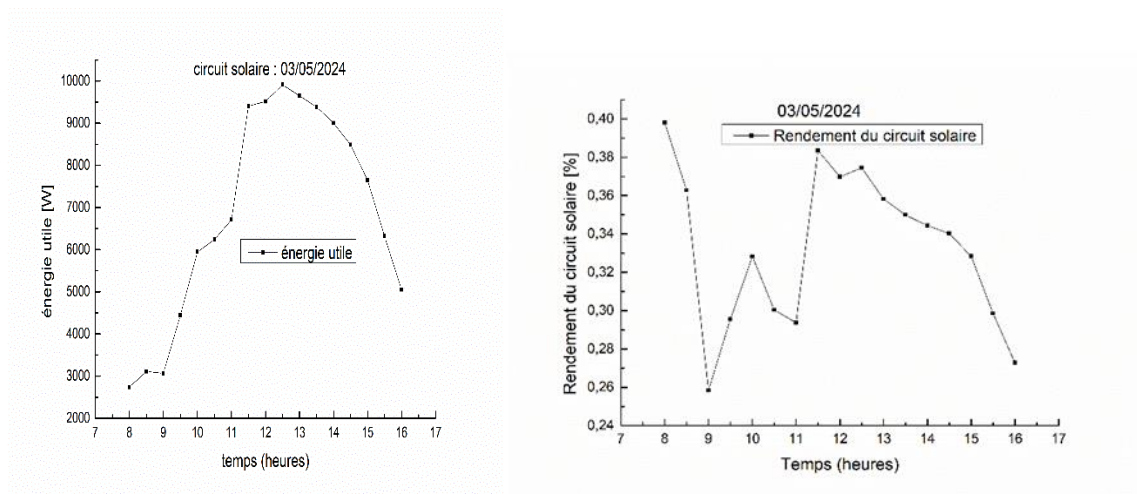


Figure.V.36 : Les performances pour le circuit solaire

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

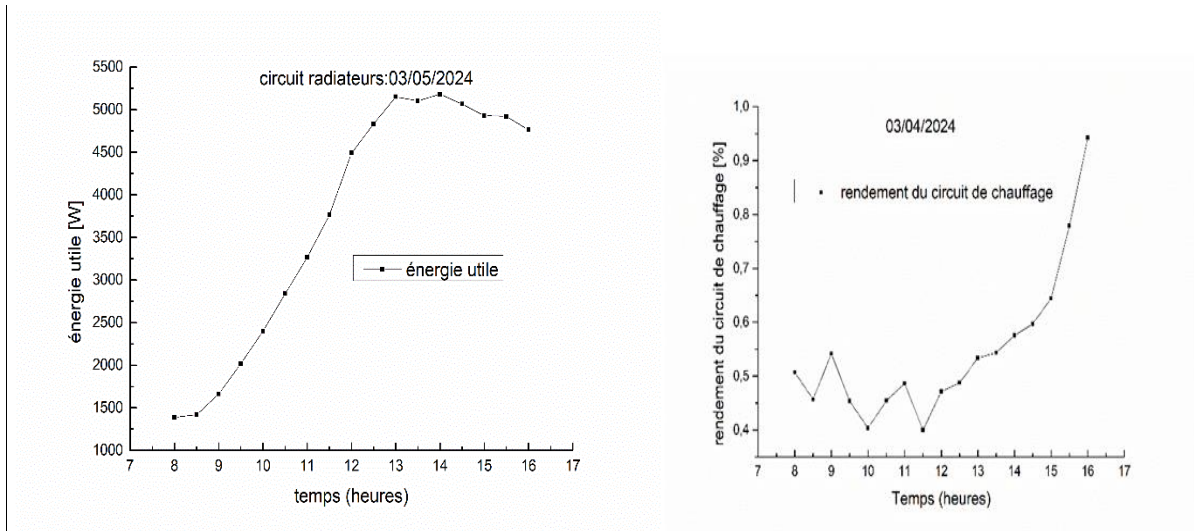


Figure.V.37 : Les performances pour le circuit du chauffage

Le 04/05/2024 :

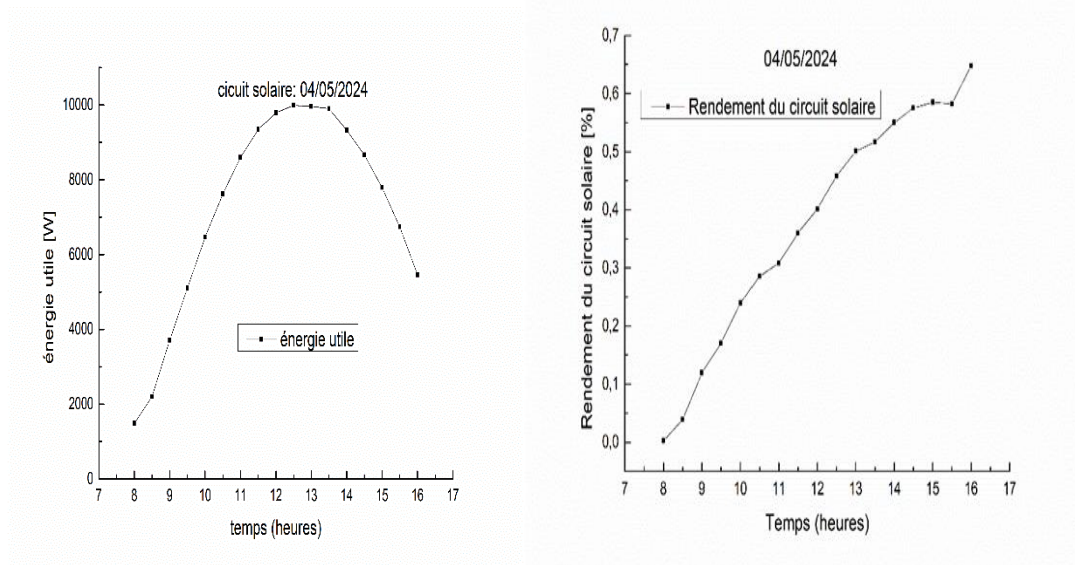


Figure.V.38 : Les performances pour le circuit solaire

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

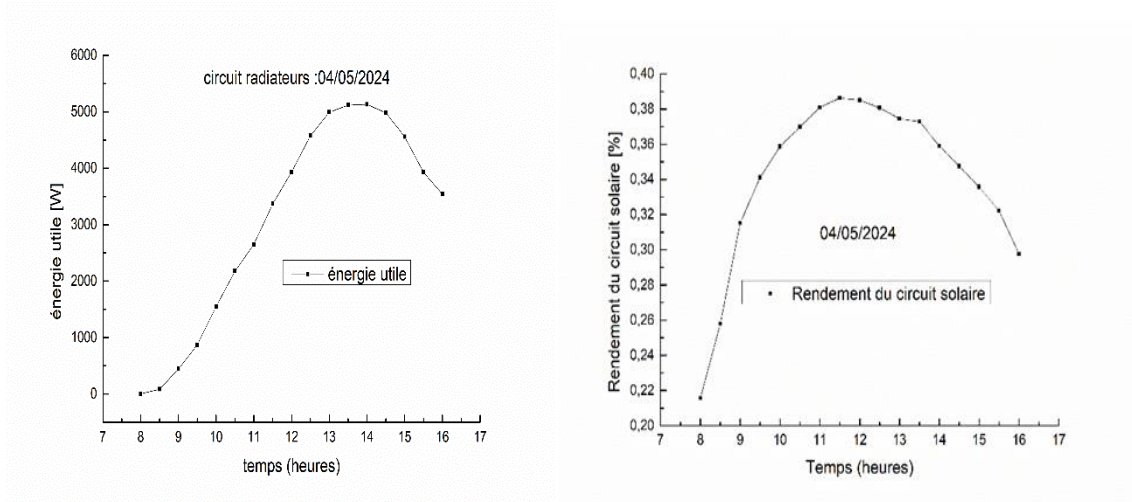


Figure.V.39 : Les performances pour le circuit du chauffage

En analysant les différentes performances obtenus pour quatre journées représentatives du stage, on voit très bien que toutes les performances obtenus suivent les mêmes allures que celle des valeurs mesurées, pour la journée la plus favorable par exemple on a un rendement maximum qui atteint 60% vers 13h, cette valeur indique que l'installation solaire pendant cette journée a 40 % de pertes (entre les pertes optiques et les pertes thermiques), on peut citer un autre exemple de la journée la plus défavorable où le rendement de circuit solaire atteint 0.4 %, à partir de cela on confirme l'importance des conditions météorologiques dans ce genre d'installation.

En analysant les différentes performances obtenus pour le circuit de chauffage, on constate que les résultats obtenus suivent les mêmes allures que celles obtenus pour le circuit solaire avec une valeur du rendement maximum dépassant les 63 %.

Les performances obtenus pour notre installation donnent un excellent aperçu sur le fonctionnement de notre installation, où des valeurs significatives ont été obtenus car le système d'appoint n'a pas été utilisé qu'aux journées très défavorables.

Validation des résultats :

Afin de valider les résultats de la simulation, nous avons repris quelques paramètres trouvés et les comparés avec les résultats expérimentaux, ces paramètres concernent:

- Les températures de sorties totales et rangée 2 (Expérimentale)
- Température de sortie des capteurs (Simulation)

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

- Température de bas de la cuve (Expérimentale)
- Température de sortie de dernier radiateur (Simulation)

Les résultats obtenus sont illustrés dans figures ci-dessous:

Le 27/04/2024

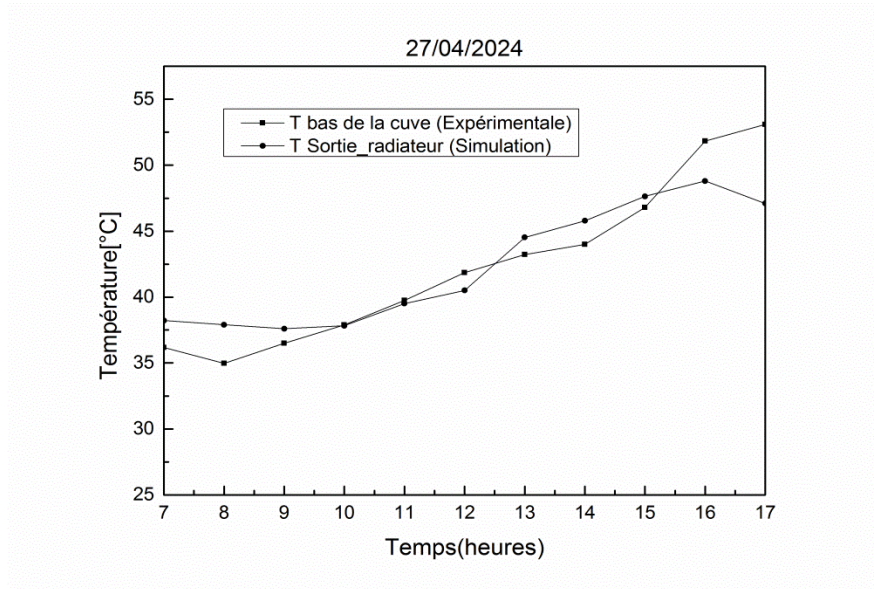


Figure.V.40 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

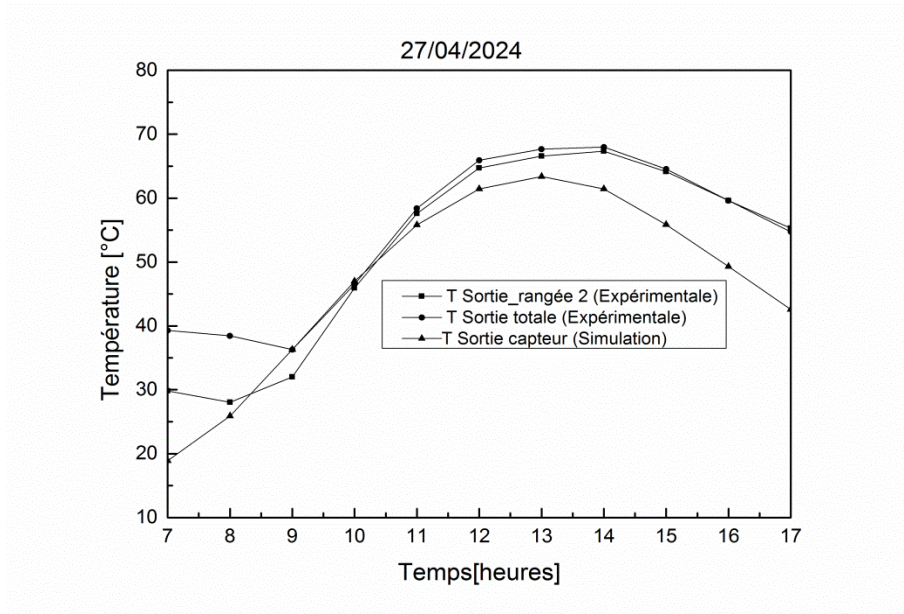


Figure.V.41 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

Le 03/05/2024

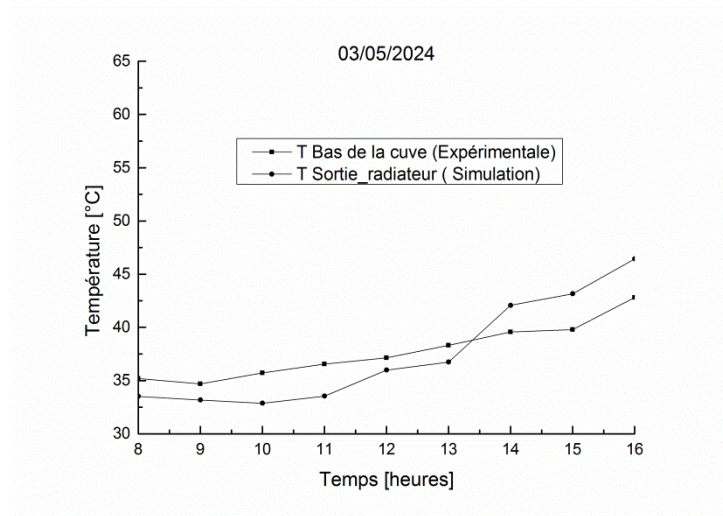


Figure.V.42 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

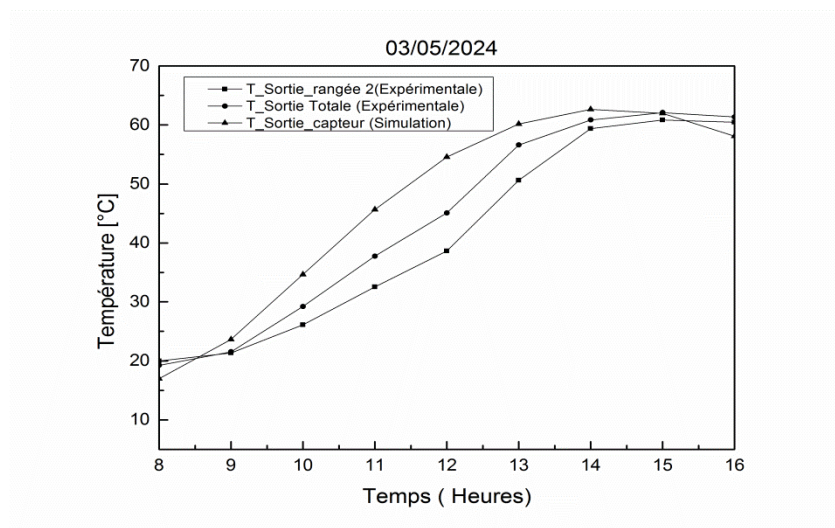


Figure.V.43 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

Le 04/05/2024

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

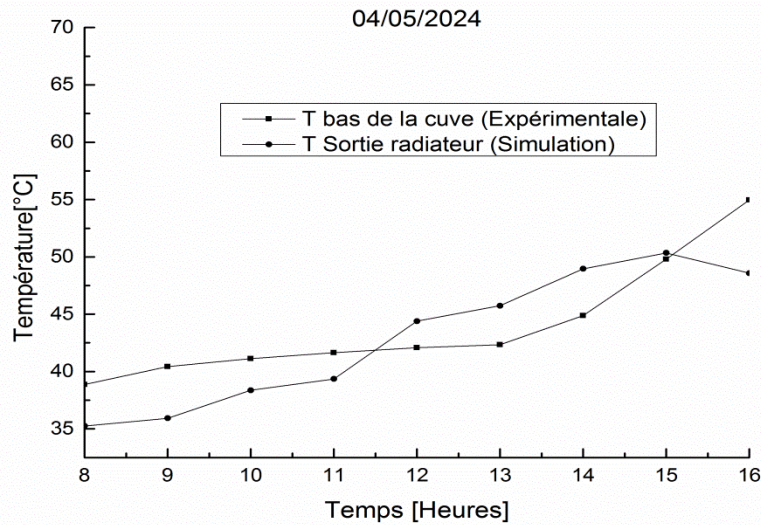


Figure.V.44 : Comparaison entre la température du bas de la cuve mesurée et celle de sortie des radiateurs calculée

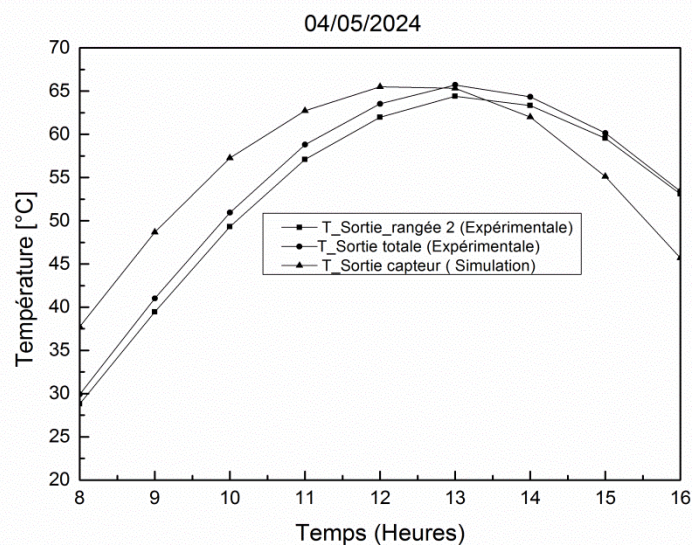


Figure.V.45 : Comparaison entre les températures de sorties des capteurs mesurées et celle calculée.

Sur ces courbes apparaît les performances théoriques et les performances expérimentales. On peut remarquer le temps de préchauffage de l'installation, (jusqu'à 10h environ), avant d'avoir des valeurs qui reflètent la réalité. On voit bien que l'inertie thermique joue un rôle important sur les performances de notre système, cela apparaît dans les résultats obtenus au début de fonctionnement de l'installation, et ce n'est qu'à partir de 10h qu'on a des valeurs qui reflètent la

Chapitre 5 : Analyse Expérimentale

réalité. D'après le calcul d'erreur qui ne dépasse pas les 10 %, on peut valider les résultats de simulation trouvés, ce qui donne un excellent aperçu pour notre système.

Conclusion :

Les résultats issus des expérimentations ont permis de suivre l'évolution des performances de notre installation solaire notamment l'énergie utile et le rendement. La problématique majeure sur le fonctionnement de ce genre d'installation reste sa totale dépendance aux aléas météorologiques (passage de nuages, temps pluvieux).

L'évolution en fonction du temps des énergies utiles et des rendements montre des valeurs significatives qui varient entre 1000 et 9000 W . L'évolution du rendement journalier en fonction du temps montre des valeurs significatives qui varient entre 5 et 60 %.

Nous pouvons ainsi conclure que le modèle théorique utilisé explique bien les phénomènes physiques de notre système et valide les résultats expérimentaux obtenus.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de mémoire consistait à étudier les performances thermique d'une installation de chauffage collectif utilisée pour le chauffage des locaux (quatre bureaux et la une bibliothèque) et cela a travers une étude théorique et une validation expérimentale, d'un système situé à l'unité de développement des équipements solaires (UDES, CDER).

Pour atteindre cette objectif, cette étude a fait appel à plusieurs disciplines que nous avons présentées selon la démarche suivante :

Le rayonnement solaire est l'acteur principal de cette étude, a fait l'objet de la première partie du chapitre 1. Quelques définitions des paramètres astronomiques. Dans la 2eme partie les différentes applications de l'énergie solaire thermique, et plus en détail le chauffe-eau solaire.

Après avoir dressé dans le chapitre 2 une synthèse bibliographique sur l'état de l'art des systèmes de chauffage collectifs, on a constaté que plusieurs chercheurs et entreprises s'intéressent à cette technologie, vu à ses avantages, ainsi que son faible cout de réalisation par rapport au système conventionnel (chaudière à gaz).

C'est pourquoi on a fait une modélisation théorique dans le chapitre 3, cette dernière a permet de prédire le comportement thermique d'un chauffe-eau solaire ainsi que ses différentes performances.

Dans le chapitre 4, nous avons présenté les résultats de la modélisation et de simulations obtenus et leurs interprétations, ou une étude de performances a été réalisé afin de prédire le comportement thermique de notre installation, cette dernière permettant de déterminer les différentes températures à savoir : Températures d'entrées et de sorties des capteurs, les températures au niveau de la cuve de stockage, et les valeurs des énergies utiles et des rendements Enfin, des résultats très concluants ont été trouvés, qui sont très conformes avec les différents travaux effectués dans ce domaine.

Dans le but d'enrichir bien notre travail, une étude expérimentale a été présentée dans le chapitre 5,

L'analyse expérimentale a été réalisée sur notre installation solaire situé à l'UDES, où nous avons montré et décrit notre système solaire. L'implantation, les caractéristiques techniques et géométriques, l'instrumentation utilisée pendant les tests, et le déroulement du processus expérimentale pour évaluer les performances du système. Cette étude expérimentale a permis de valider le modèle théorique, et de caractériser notre installation, les résultats obtenus sont très satisfaisants et concluants.

Cette étude vise à promouvoir la production d'eau chaude solaire en Algérie. Il est souhaité que l'État soutienne ces initiatives via des subventions et des crédits, favorisant ainsi la création d'un marché pour les chauffe-eau solaires et éventuellement rivaliser avec les pays.

Bien que les chauffe-eau solaires soient largement utilisés et performants dans de nombreux pays, leur développement en Algérie est limité par le faible coût des énergies non renouvelables, malgré des conditions climatiques favorables. L'adoption de ces systèmes permettrait de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de réaliser des économies importantes et de préserver les ressources naturelles pour un développement durable.

A travers cette étude très enrichissante on peut constater que ces systèmes représentent une excellente alternative aux autres systèmes de chauffage conventionnelles à conditions d'intégrer un système d'appoint soit électrique ou bien à gaz.

Perspectives

D'après l'étude effectuée dans ce mémoire sur l'installation de chauffage solaire collective, et en analysant les différents résultats obtenus durant tout ce travail, nous sommes arrivés à constater que les problématiques majeures sur le fonctionnement l'installation solaire restent sa totale dépendance aux aléas météorologiques (passage de nuages, temps pluvieux), et aux différentes pertes thermiques. Pour cette raison nous proposons comme perspectives dans des futurs projets afin d'améliorer les performances de :

- Intégrer au système une chaudière à gaz murale juste à côté de la cuve de stockage pour chauffer l'eau en absence du soleil et la nuit, cette solution peut être une

alternative à l'appoint électrique car la résistance est soumise aux conditions climatiques extérieures et donc une durée de vie plus courte.

- Améliorer l'isolation thermique des capteurs et de la cuve en intégrant des isolants plus performants permettant de maintenir la température de l'eau chaude pendant une grande durée de temps.

Références bibliographiques.

- [1] J.M Chassériau, conversion thermique du rayonnement solaire, Dunod 1984.
- [2] R. Bernard, G. Menguy, M. Schwartz, le rayonnement solaire conversion thermique et application, technique et documentation. Paris 1979.
- [3] Gisement solaire_Alain Ricaud_Jan-2010.doc.
- [4] Hani Beltagy, Cours E-LEARNING Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, département de génie mécanique Transition énergétique, <https://teleensm.ummtto.dz/course/info.php?id=776>
- [5] Sarbu I., Sebarchievici C., Solar heating and cooling systems: Fundamentals, experiments and applications, Elsevier, Oxford, UK, 2017.
- [6] ASHRAE handbook, HVAC applications, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, Atlanta, GA, USA, 2015.
- [7] Kacan E., Ulgen K., Energy and exergy analysis of solar combisystems, International Journal of Exergy, vol. 14, pp. 364-387, 2014.
- [8] Sarbu I., Sebarchievici C., Ground-source heat pumps: Fundamentals, experiments and applications, Elsevier, Oxford, UK, 2015.
- [9] Mohammed Dhiya-Eddine Sarmouk , Arezki Smaili ,Hachimi Fellouah , Abdelatif Merabtine , Experimental and numerical investigations of a solar space heating system based on design of experiments method, Solar Energy 216 (2021) 396–410.
- [10] Sami Awani , Ridha Chargui ,Bourhan Tashtoush , Experimental and numerical evaluation of a new design of a solar thermosyphon water heating system with phase change material, Journal of Energy Storage 41 (2021) 102948.
- [11] Abdellatif Zairi ,Abderrahmane Mejedoub Mokhtari, Sayeh Menhoudj, Yamna Hammoub, Karim Dehina , Mohammed-Hichem Benzaama , Study of the energy performance of a combined system: Solar thermal collector – Storage

tank – Floor heating, for the heating needs of a room in Maghreb climate, Energy & Buildings 252 (2021) 111395.

[12] Mohamed Krarouch ,Amine Allouhi, Hassan Hamdi, Abdelkader Outzourhit,

Energy, exergy, environment and techno-economic analysis of hybrid solar-biomass systems for space heating and hot water supply: Case study of a Hammam building, Renewable Energy 222 (2024) 119941.

[13] Imad Ait Laasri , Mouatassim Charai , Mohamed Oualid Mghazli , Abdelkader Outzourhit , Energy performance assessment of a novel enhanced solar thermal system with topology optimized latent heat thermal energy storage unit for domestic water heating, Renewable Energy 224 (2024) 120189.

[14] Muhammad Arsalan, Muhammad Abid , Muzaffar Ali , Javed Akhter , Rubeena Kousar , Juliana Hj Zaini ,Experimental development, techno-economic and environmental analysis of a hybrid solar space heating system in a subtropical climate, Energy Reports 10 (2023) 3020–3034.

[15] F. Sahnounea, M. Madanib, M. Zelmatc, M. Belhamela, Comparative study between solar and conventional heating - Economic study and environmental impact, Energy Procedia 50 (2014) 841 – 852.

[16] KACI Karim, "Effet de l'angle d'incidence modifié sur les performances d'un capteur solaire plan", mémoire de magister, université de Blida 1, 2010

[17] Energie solaire « calculs et optimisation ». Jacques BERNARD, INSA de Toulouse, ISBN, 2-7298-1897-9, Aout 2004

[18] Energie solaire « calculs et optimisation ». Jacques BERNARD, INSA de Toulouse, ISBN, 2-7298-1897-9, Aout 2004

[19] Thèse doctorat « étude thermo-énergétique d'un échangeur de chaleur à plaque et joints »par Amine Ali NEHARI (2009).

[20] Technique de l'ingénieur « traité énergétique » B2340.

- [21] Energie solaire « calculs et optimisation ». Jacques BERNARD, INSA de Toulouse, ISBN, 2-7298-1897-9, Aout 2004
- [22] Energie solaire « calculs et optimisation ». Jacques BERNARD, INSA de Toulouse, ISBN, 2-7298-1897-9, Aout 2004
- [23] Chauffage solaire de l'habitat T. Cabrel et Daniel. Roux.
- [24] Thermique solaire Yves Jeannot octobre 2003.
- [25] KACI Karim, "Effet de l'angle d'incidence modifié sur les performances d'un capteur solaire plan", mémoire de magister, université de Blida 1, 2010
- [26] KACI Karim, "Effet de l'angle d'incidence modifié sur les performances d'un capteur solaire plan", mémoire de magister, université de Blida 1, 2010