



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

N° d'enregistrement

.../.../...

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence

Domaine: *Sciences et Technologies*

Filière : *Energies Renouvelables*

Spécialité : *Energies Renouvelables et Environnement*

Thème

**Etude des capteurs solaires plans destinés à la production
d'eau chaude sanitaire**

Présenté par :

ABDELBAKI Brahim Elkhail

BOUKHOULDA Omar El Farouk

Soutenue publiquement le : 14/06/2026

Devant le jury composé de :

SELLAH Mourad

Maître de conférences B

Univ. Ghardaïa

Président

MOSBAH Said

Maître de conférences B

Univ. Ghardaïa

Examineur

CHENINI Nadir

Attaché de Recherche

UARER Ghardaïa

Encadreur

Année universitaire 2025/2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Louange à Allah, qui nous a guidés et soutenus tout au long de notre parcours universitaire et a rendu ce travail possible.

Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre encadreur **CHENINI Nadir**, à Mr **BENGHENIA Mohammed**, pour leurs précieux conseils, leur disponibilité et leurs accompagnements rigoureux tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études. Leur contribution a été essentielle pour arriver à ce mémoire.

Nous exprimons également notre profonde gratitude aux membres du jury d'examen, qui ont bien voulu accepter d'évaluer ce travail, ainsi qu'à tous les enseignants de la faculté des sciences et de la technologie de l'université de Ghardaïa, pour les connaissances, le savoir-faire et l'expertise qu'ils ont partagées avec nous.

Enfin, nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents pour leur soutien moral et matériel tout au long de notre parcours.

Résumé

Cette étude évalue la performance thermique d'un capteur solaire de surface (CSTPE) installé sur le site de l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa, dans le Sahara algérien, caractérisé par une lumière solaire abondante et des amplitudes thermiques saisonnières prononcées. L'objectif est d'analyser le comportement du système en conditions réelles de fonctionnement et d'identifier les paramètres influençant sa performance. Un dispositif expérimental complet a été mis en place, comprenant un capteur cuivre de 1.65 m², un circuit hydraulique à boucle fermée, des thermocouples de type K, un pyranomètre, un débitmètre et un enregistreur de données TESTO 176 T4. L'angle d'inclinaison du capteur a été ajusté mensuellement (de 22.29° en avril à 54.74° en décembre) afin d'optimiser la collecte du rayonnement solaire. Les résultats montrent que la température de l'absorbeur atteint 93 °C, avec une température de sortie d'eau d'environ 52 °C et un gradient thermique moyen de 15 °C entre l'entrée et la sortie. Le rendement thermique maximal atteint 29.05 % pour un débit de 50 L/h, avec une corrélation élevée ($R^2 = 0.8197$) et une faible erreur quadratique moyenne (RMSE = 0.92 °C). Un modèle de régression linéaire multiple a été établi pour prédire la température à la sortie, l'isolation du réservoir améliore considérablement le maintien de la température la nuit. Ces résultats confirment la viabilité de la CSTPE pour la production d'eau chaude sanitaire dans le climat saharien et ouvrent la voie à l'optimisation des paramètres de conception et de régulation.

Mots-clés : performance, capteur solaire, Sahara, inclinaison, rayonnement solaire, absorbeur, température de sortie.

ملخص

تقيم هذه الدراسة الأداء الحراري لمجمع شمسي سطحي مثبت في موقع وحدة أبحاث الطاقة المتجددة التطبيقية (URAER) في غرداية، بالصحراء الجزائرية، وهي منطقة تتميز بوفرة أشعة الشمس وتقلبات درجات الحرارة الموسمية الواضحة. يهدف البحث إلى تحليل سلوك النظام في ظل ظروف التشغيل الفعلية وتحديد العوامل المؤثرة على أدائه. تم تنفيذ إعداد تجريبي متكامل، يشمل مجعًا نحاسيًا بمساحة 1.65 متر مربع، ودائرة هيدروليكية مغلقة، ومزدوجات حرارية من النوع K، ومقياس إشعاع شمسي، ومقياس تدفق، وجهاز تسجيل بيانات TESTO 176 T4. تم تعديل زاوية ميل المجمع شهريًا (من 22.29 درجة في أبريل إلى 54.74 درجة في ديسمبر) لتحسين جمع الإشعاع الشمسي. تُظهر النتائج أن درجة حرارة الممتص تصل إلى 93 درجة مئوية، مع درجة حرارة مخرج الماء حوالي 52 درجة مئوية، ومتوسط تدرج حراري قدره 15 درجة مئوية بين المدخل والمخرج. تصل الكفاءة الحرارية القصوى إلى 29.05% عند معدل تدفق 50 لترًا/ساعة، مع معامل ارتباط عالٍ

($R^2 = 0.8197$) وخطأ متوسط تربيعي منخفض ($RMSE = 0.92$ درجة مئوية). تم تطوير نموذج انحدار خطي متعدد للتنبؤ بدرجة حرارة المخرج؛ وقد حسن عزل الخزان بشكل ملحوظ من الحفاظ على درجة الحرارة طوال الليل. تؤكد هذه النتائج جدوى استخدام الطاقة الشمسية الحرارية لإنتاج الماء الساخن للاستخدام المنزلي في مناخ الصحراء الكبرى، وتمهد الطريق لتحسين معايير التصميم والتحكم.

الكلمات المفتاحية: الأداء، مستشعر الطاقة الشمسية، الصحراء، الميل، الإشعاع الشمسي، الممتص، درجة حرارة الخرج.

Abstract

This study evaluates the thermal performance of a surface solar collector (CSTPE) installed at the Renewable Energy Applied Research Unit (URAER) site in Ghardaïa, in the Algerian Sahara, an area characterized by abundant sunlight and pronounced seasonal temperature variations. The objective is to analyze the system's behavior under real operating conditions and identify the parameters influencing its performance. A complete experimental setup was implemented, including a 1.65 m² copper collector, a closed-loop hydraulic circuit, type K thermocouples, a pyranometer, a flow meter, and a TESTO 176 T4 data logger. The collector's tilt angle was adjusted monthly (from 22.29° in April to 54.74° in December) to optimize solar radiation collection. The results show that the absorber temperature reaches 93°C, with a water outlet temperature of approximately 52°C and an average temperature gradient of 15°C between the inlet and outlet. The maximum thermal efficiency reaches 29.05% at a flow rate of 50 L/h, with a high correlation ($R^2 = 0.8197$) and a low root mean square error ($RMSE = 0.92^\circ\text{C}$). A multiple linear regression model was developed to predict the outlet temperature; the tank insulation significantly improves temperature maintenance overnight. These results confirm the viability of solar thermal power (CSTPE) for domestic hot water production in the Saharan climate and pave the way for optimizing design and control parameters.

Keywords: performance, solar sensor, Sahara, tilt, solar radiation, absorber, output temperature.

SOMMAIRE

Remercîment.....	I
Abstract.....	II
Sommaire.....	IV
Liste des figures.....	VI
Liste des tables.....	VII
Liste des abréviation.....	VIII
Introduction Générale	2

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

Introduction.....	4
1.1. Présentation du site expérimental.....	4
1.1.1. Situation géographique.....	4
1.1.2. Données climatiques de la zone d'étude.....	5
1.1.2.1. Rayonnement solaire	6
1.1.2.2. Température de l'air.....	6
1.1.2.3. Humidité relative	6
1.1.2.4. Vitesse du vent	6
1.1.3. Paramètres géométriques et orientation influant sur le rendement énergétique..	8
1.1.3.1.L'angle d'incidence (β).....	8
1.1.3.2.L'angle d'inclinaison (α).....	9
1.1.3.3.Déclinaison solaire (δ).....	9
1.2.Description du capteur solaire thermique plan à eau étudié.....	9
1.2.1. Configuration et matériaux du capteur	9
1.2.2. Synthèse des composants.....	11
1.2.3. Principe du circuit hydraulique en boucle fermée	12
1.2.4. Support métallique et réglage de l'inclinaison.....	12
1.2.5. Amélioration technique et performance du système.....	13
1.3 Équipements et instruments de mesure	13
1.3.1 STC_1000 Régulateur de température.....	13
1.3.2 Enregistreur de données TESTO 176 T4.....	14

1.3.3	Pyranomètre.....	15
1.3.4	Pompe de circulation.....	15
1.3.5	Débitmètre à eau	15
1.4	Acquisition et de traitement des données.....	17
1.4.1	Déroulement de la phase expérimentale.....	18
1.4.2	Comportement thermique nocturne et isolation.....	19
	Conclusion.....	19

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

2. 1	Effet de l'angle d'inclinaison du capteur sur la production de ECS.....	21
2. 2	Analyse des résultats obtenus.....	24
2. 3	Métriques de performance conventionnelles	29
2.4	Calcule de rendement	31
	Conclusion générale	33
	Références bibliographiques.....	34

Liste des figures

Figure 1-1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa.....	5
Figure 1-2 : Evolution de l'irradiation solaire globale horizontale au cours de l'année	6
Figure 1-3 : Variation mensuelle des paramètres climatiques dans la région d'étude.....	7
Figure 1-4 : Variation mensuelle des paramètres climatiques dans la région de Ghardaïa.....	8
Figure 1-5 : Paramètres angulaires d'un capteur : incidence et inclinaison.....	9
Figure 1-6 : les composantes du CSTPE.....	10
Figure 1-7 : Photo montre le capteur.....	11
Figure 1-8 : STC-1000 régulateur de température.....	13
Figure 1-9 : Thermomètre TESTO 176 T4.....	14
Figure 1-10 : la pompe de circulation.....	15
Figure 1-11 : Débitmètre pour eau.....	16
Figure 1-12 : montre le prototype CSTPE.....	16
Figure 1-13 : Schéma de principe du système de mesure des températures sur le CSTPE.....	18
Figure 2-1 : de capteur montre les points de mesure de température (entré, sortie, collecteur et réservoir d'eau)	22
Figure 2-2 : photos explique l'angle d'inclinaison optimal du capteur solaire pour les mois février (à droite) et avril (à gauche)	23
Figure 2-3 : Evolution temporelle des températures de l'air ambiant, de l'absorbeur et du fluide (entrée/sortie) pour la journée du 20/02/2026.....	24
Figure 2-4 : Evolution temporelle des températures de l'air ambiant, de l'absorbeur et du fluide (entrée/sortie) pour la journée du 23 Février 2026.....	25
Figure 2-5 : variations des températures d'entrée, de sortie, du capteur et du stockage pour la journée du 23 et 24 février 2026.....	26
Figure 2-6 : variations des températures d'entrée, de sortie, du capteur et du stockage pour les différents jours.....	27
Figure 2-7 : Comparaison des profils de température de sortie (mesurée vs. estimée) en fonction des points démesure.....	30
Figure 2-8 : Comparaison de la performance du modèle prédictif, valeurs mesurées et estimées du Température de sortie.....	30
Figure 2-9 : Évolution temporelle du rendement thermique du capteur solaire (25/02/2026).....	31

Liste des tables

Tableau 1-1 : Composants du CSTPE.....	11
Tableau 1-2 : Angles d'inclinaison mensuels et dimensions associés à la structure de support....	12
Tableau 1-3 : Principe de fonctionnement du STC-1000.....	14
Tableau 2-1 : liste détaillée des composants et coûts de fabrication du CSTPE.....	24
Tableau 2-2 : Résultats statistiques obtenus pour les différents débits d'eau	27
Tableau 2-3 : présentation des paramètres enregistrés pendant la période de stage.....	28
Tableau 2-4 : paramètres statistiques d'évaluation de la performance d'un modèle prédictif.....	29

Liste des abréviations

Abréviation	Désignation
CSTPE	Capteur solaire thermique plan à eau
Cov ($\hat{T}$, T)	Covariance entre les valeurs prédites et observées ($^{\circ}\text{C}^2$)
ECS	Eau Chaude Sanitaire
GHI	Irradiation horizontale globale (W/m^2)
RMSE	Racine de l'erreur quadratique moyenne ($^{\circ}\text{C}$)
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables
Var(T)	Variance des valeurs observées ($^{\circ}\text{C}^2$)
Var($\hat{T}$)	Variance des valeurs prédites ($^{\circ}\text{C}^2$)

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
D	Distance horizontale de la base du support	m
H	Hauteur verticale du bord supérieur du capteur	m
$\dot{m}$	Débit massique du fluide caloporteur	kg/s
n	Nombre d'échantillons / de points de mesure	-
N	Numéro du jour de l'année (à partir du 1er janvier)	-
Q	Débit volumique d'eau	L/h
r	Coefficient de corrélation	-
R	Coefficient d'absorption relatif	%
R^2	Coefficient de détermination	-
S	Surface de l'absorbeur du capteur	m^2
T	Température	$^{\circ}\text{C}$
t	Temps	min
$\hat{T}$	Température prédite	$^{\circ}\text{C}$
T absorbeur	Température de l'absorbeur (plaque en cuivre)	$^{\circ}\text{C}$
T entrée	Température de l'eau à l'entrée du capteur	$^{\circ}\text{C}$
T sortie	Température de l'eau à la sortie du capteur	$^{\circ}\text{C}$
T réservoir	Température de l'eau dans le réservoir de stockage	$^{\circ}\text{C}$

Introduction générale

Introduction générale

Les capteurs solaires thermiques plans à eau (CSTPE) représentent une technologie prometteuse pour la production d'eau chaude sanitaire, en particulier dans les régions très ensoleillées. De nombreuses études ont caractérisé les performances de ces systèmes sous diverses conditions climatiques, en se concentrant sur l'influence des paramètres d'orientation et d'inclinaison sur l'efficacité énergétique. Cependant, l'évaluation de ces dispositifs dans le contexte spécifique du climat saharien, caractérisé par des amplitudes thermiques saisonnières prononcées et un rayonnement solaire exceptionnel. En particulier, l'effet combiné des ajustements mensuels de l'angle d'inclinaison et des propriétés thermophysiques locales sur l'efficacité globale du système n'a pas été systématiquement quantifié. La présente étude vise à évaluer les performances thermiques d'un CSTPE installé sur le site de l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa, en Algérie. Pour ce faire, une méthodologie expérimentale basée sur des mesures de terrain a été mise en place, incluant l'instrumentation complète du dispositif (thermomètre, thermocouples, pyranomètre, débitmètre) et un système d'acquisition de données automatisé. L'objectif est de fournir une analyse fiable du comportement thermique du système dans des conditions réelles de fonctionnement et d'identifier les paramètres critiques influençant ses performances.

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

Introduction

Ce chapitre présente la méthodologie expérimentale utilisée pour évaluer les performances thermiques d'un capteur solaire thermique à eau de surface installé sur le site URAER à Ghardaïa. La description détaillée du dispositif expérimental, comprenant la constitution du capteur, les instruments de mesure et le système d'acquisition des données, est exposée successivement. Les grandeurs physiques surveillées, telles que les températures en différents points du circuit, le rayonnement solaire et le débit d'eau, sont identifiées avec précision. Les conditions de fonctionnement, en particulier les ajustements mensuels de l'angle d'inclinaison du capteur, sont également expliquées. L'objectif de cette phase expérimentale est de fournir des résultats fiables pour analyser le comportement thermique du système dans des conditions réelles de fonctionnement.

1.1 Présentation du site expérimental

1.1.1 Situation géographique :

Le site de Ghardaïa est situé dans le centre de l'Algérie, à 600 km au sud d'Alger (32.29° N, 3.40° E), à une altitude de 463 m. La zone d'étude environnante s'étend entre les longitudes 2.2° – 5.0° E et les latitudes 31.8° – 33.0° N.

La wilaya de Ghardaïa est située dans la partie centrale du nord du Sahara algérien et couvre une superficie de 21 352.58 km². Il est limité par les limites administratives suivantes :

- au nord, par la wilaya de Laghouat et Djelfa ;
- à l'est, par la wilaya d'Ouargla ;
- au sud, par la wilaya d'El Menia ;
- à l'ouest, par la wilaya d'El Bayadh.

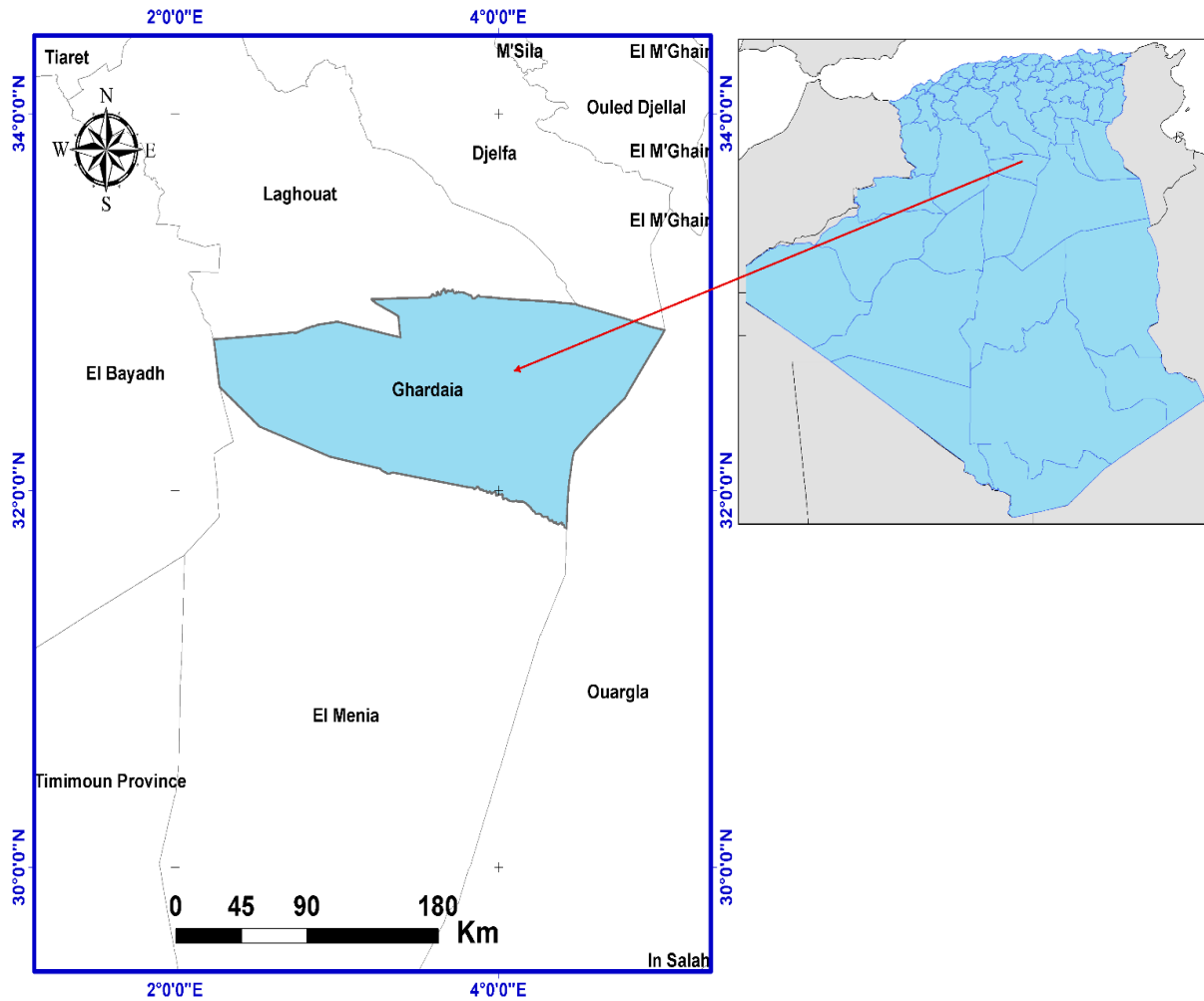


Figure 1-1 : Situation géographique de la wilaya de Ghardaïa.

Le site expérimental retenu est l'Unité de recherche appliquée aux énergies renouvelables (URAER) à Ghardaïa, une infrastructure offrant des avantages considérables pour cette étude. Il fournit un capteur solaire thermique plan à eau (CSTPE) fonctionnel, une station radiométrique opérationnelle pour la mesure précise du rayonnement solaire et un système complet d'acquisition de données. La méthodologie, basée sur des mesures de terrain, garantit la fiabilité et la représentativité des résultats dans le contexte saharien local.

1.1.2 Données climatiques de la zone d'étude :

La figure ci-dessous montre l'évolution mensuelle des principaux paramètres climatiques de Ghardaïa (Sahara algérien du nord). L'analyse de ces données met en évidence un climat aride, avec de fortes spécificités thermiques et énergétiques.

1.1.2.1 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire horizontal journalier présente un potentiel énergétique exceptionnel, oscillant entre 3.5 kWh/m²/jour en décembre et une valeur maximale de 7.8 kWh/m²/jour pendant les mois de juin et juillet. Cet ensoleillement abondant tout au long de l'année et surtout en hiver, justifie pleinement l'utilisation de l'énergie solaire thermique pour le chauffage de l'eau.

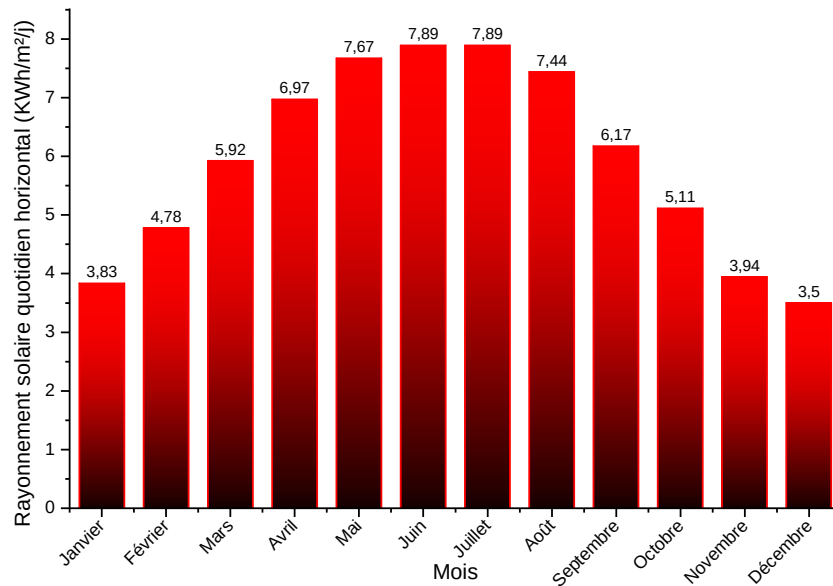


Figure 1-2 : Evolution de l'irradiation solaire globale horizontale au cours de l'année [1].

1.1.2.2 Température de l'air :

La courbe de température révèle une amplitude thermique annuelle significative, allant de 11 °C en janvier à un maximum de 33 °C en juillet-août. Cette variation saisonnière prononcée est typique des climats désertiques continentaux, avec des hivers relativement frais et des étés extrêmement chauds.

1.1.2.3 Humidité relative :

L'humidité relative montre une tendance inverse avec la température, atteignant son maximum en décembre (environ 58%) et son minimum en juillet (environ 24%).

1.1.2.4 Vitesse du vent :

Cette variable atteint son maximum au printemps, avec 4.7 m/s en avril. Son minimum est enregistré à l'automne, avec 3.1 m/s en octobre. La variation saisonnière du vent est donc clairement marquée.

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

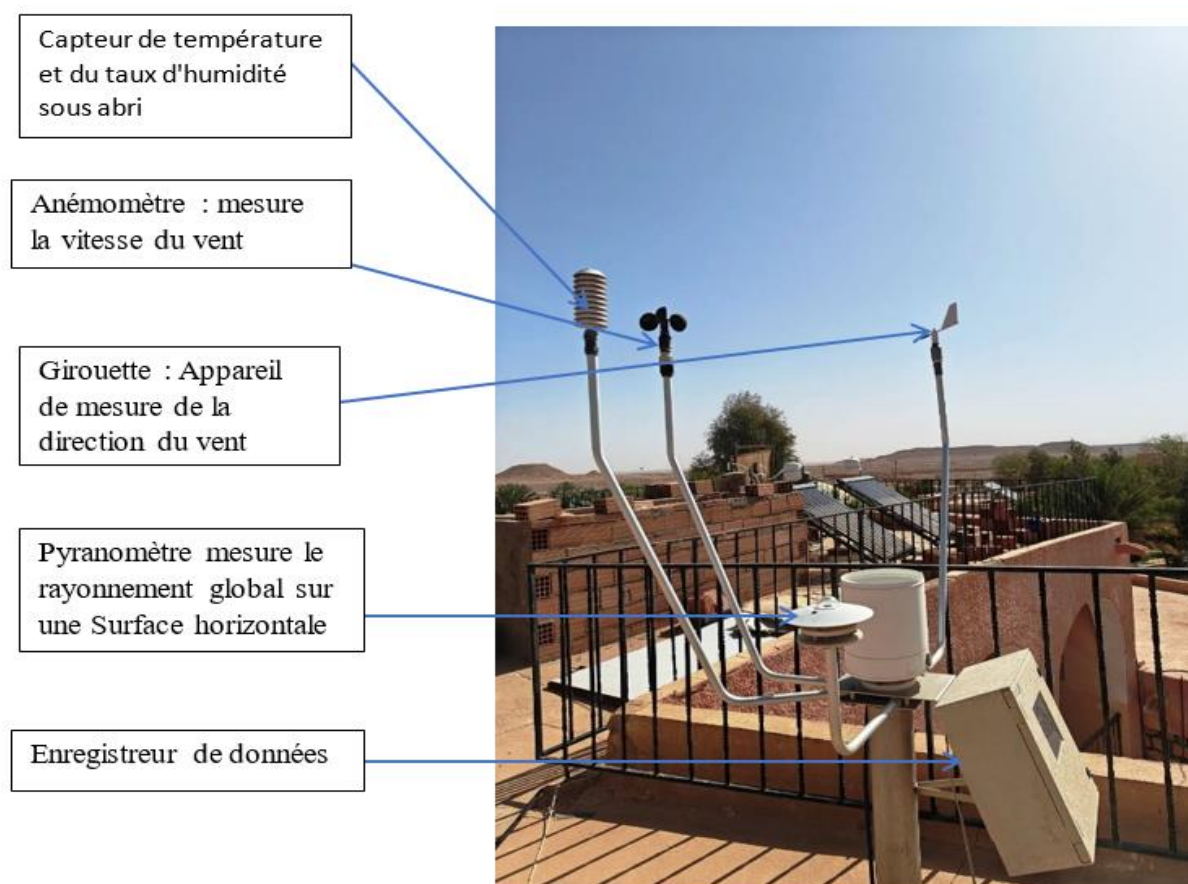


Figure 1-3 : Variation mensuelle des paramètres climatiques dans la région d'étude.

Les données utilisées pour les graphiques climatiques proviennent de la source Retscreen [1]. Ils ont été choisis en raison de leur couverture temporelle, qui s'étend sur plus de 23 ans, à partir des relevés mensuels.

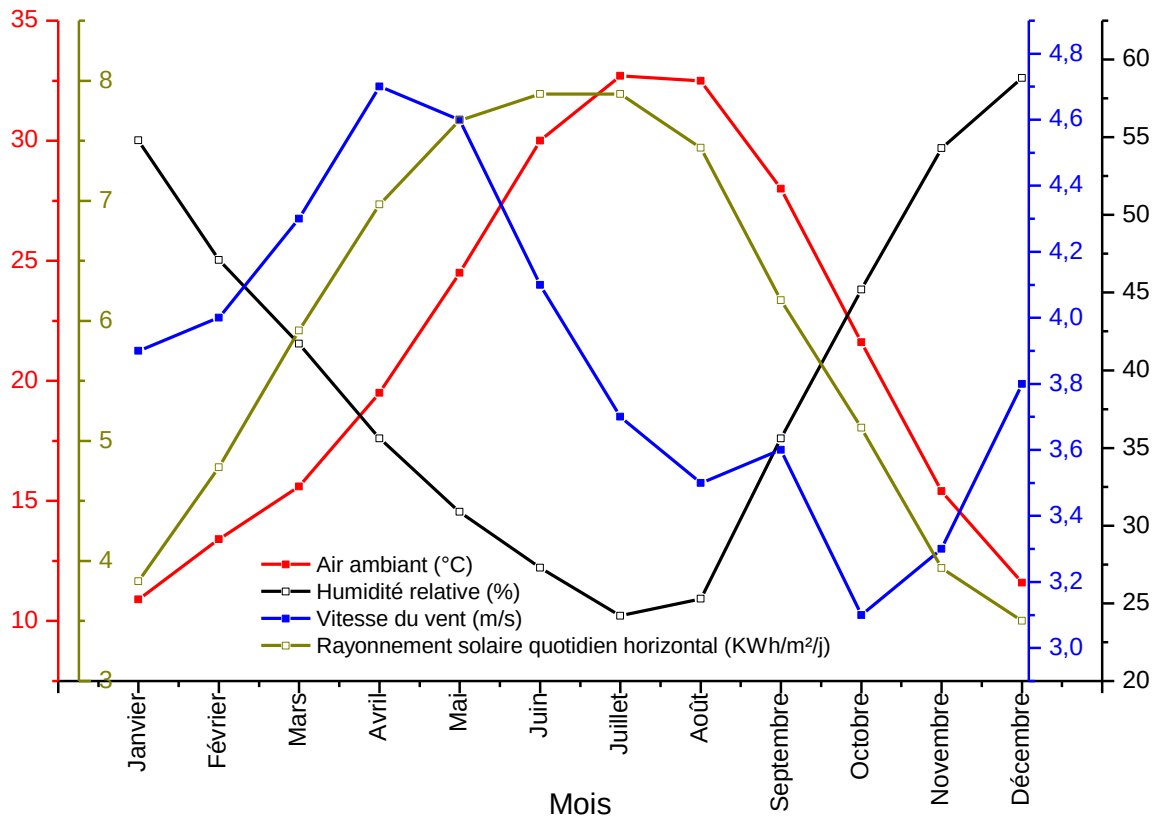


Figure 1-4 : Variation mensuelle des paramètres climatiques dans la région de Ghardaïa.

1.1.3 Paramètres géométriques et orientation influant sur le rendement énergétique :

La performance d'un capteur dépend de son orientation par rapport au sud, de son angle d'inclinaison, de la durée de l'ensoleillement quotidien et de l'environnement proche (ombrage, obstacles). Ces paramètres géométriques, essentiels pour une bonne captation solaire, permettent d'optimiser le rendement énergétique tout au long de l'année lorsqu'ils sont bien définis. Ainsi :

1.1.3.1 L'angle d'incidence (β)

L'angle d'incidence est un facteur essentiel pour déterminer l'efficacité et la productivité du capteur solaire, car sa valeur optimale est de 90° , ce qui assure une verticalité maximale du rayonnement. Cet angle affecte directement la surface exposée au flux solaire. Il est calculé à l'aide de l'équation suivante [2] :

$$R = 100 * \sin(\beta) \quad (1-1)$$

Où R est le coefficient d'absorption relatif, qui est le rapport du rayonnement incident perpendiculaire à la surface du capteur (exprimé en pourcentage).

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

1.1.3.2 L'angle d'inclinaison (α)

L'angle d'inclinaison fait référence à l'angle entre le plan du capteur solaire thermique et le plan horizontal. La variable optimale dépend de la période de l'année, car elle suit les changements d'altitude du soleil : moins pendant les mois d'été et plus en hiver. Cette différence est donnée par la relation suivante :

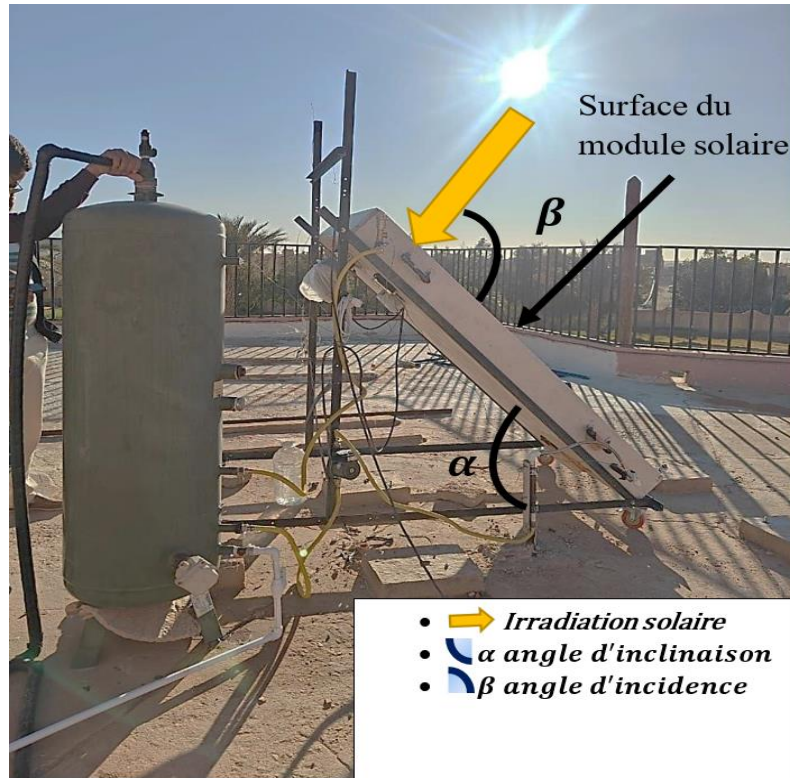


Figure 1-5 : Paramètres angulaires d'un capteur : incidence et inclinaison.

1.1.3.3 Déclinaison solaire (δ)

C'est la latitude solaire qui varie au fil des saisons. Il détermine la hauteur du soleil dans le ciel, influençant directement l'angle d'incidence et donc l'efficacité des capteurs [2].

$$\delta = 0.33 - 22.18 * \cos(N * \pi / 180) - 0.35 * \cos(2 * N * \pi / 180) - 0.14 * \cos\left(3 * N * \frac{\pi}{180}\right) + 3.787 * \sin\left(N * \frac{\pi}{180}\right) + 0.032 * \sin\left(2 * N * \frac{\pi}{180}\right) + 0.072 * \sin\left(3 * N * \frac{\pi}{180}\right) \quad (1-2)$$

N : numéro de jour de l'année à partir du 1 janvier.

1.2 Description du capteur solaire thermique plan à eau étudié :

1.2.1 Configuration et matériaux du capteur :

Le capteur solaire thermique plan à eau (CSTPE) est constitué d'un assemblage de cinq matériaux aux fonctions complémentaires, comme le détaille la figure 1-6. De l'extérieur, on distingue

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

successivement : un vitrage en verre trempé transparent assurant l'effet de serre ; un cadre en bois constituant la structure porteuse ; une plaque de cuivre jouant le rôle d'adsorbeur pour capter le rayonnement solaire ; une couche de polystyrène assurant l'isolation thermique arrière ; et enfin, un fond en contreplaqué servant de base de support et de rigidification de l'ensemble.

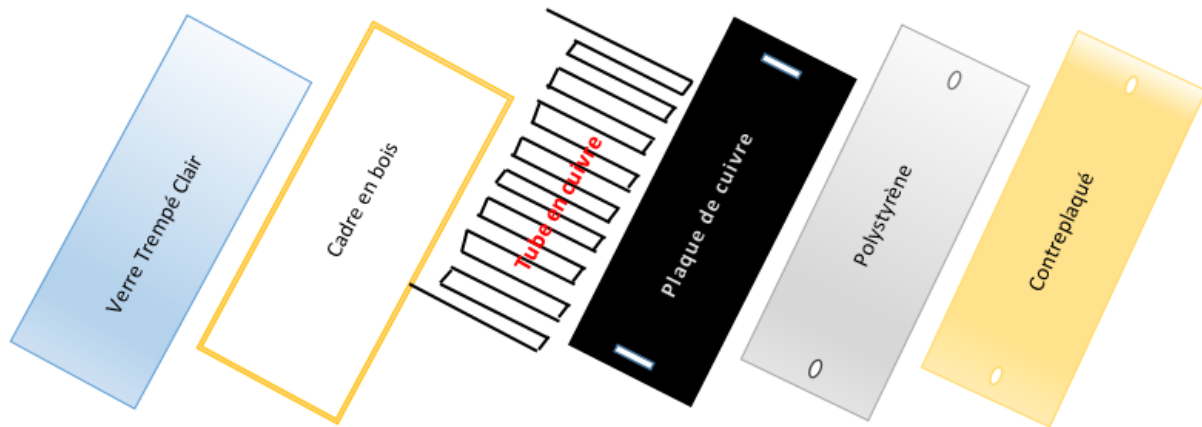


Figure 1-6 : les composantes du CSTPE.

Le capteur solaire thermique plan à eau (CSTPE) transforme le rayonnement solaire en chaleur pour chauffer l'eau qui circule dans un circuit fermé à circulation forcée.

Cette efficacité et cette simplicité font du capteur solaire thermique de surface un choix idéal dans les régions très ensoleillées comme la Ghardaïa, où l'irradiation globales journalières moyennes mensuelles mesurées 5800 kWh/m²/j. L'irradiation mesurée, varie significativement d'un mois à l'autre. La température annuelle moyenne de l'air ambiant est de 21.3 °C, tandis que la moyenne hivernale est de 12 °C.

Le capteur est basé sur une structure en bois de 3 cm d'épaisseur, 181 cm de long et 91 cm de large. Cette structure assure un support mécanique solide pour divers composants et réduit les pertes de chaleur grâce à ses propriétés isolantes.

Le circuit hydraulique est constitué d'un tube de cuivre de 19 mètres de long et 16 mm de diamètre, disposé en zigzag sur toute la surface du capteur. Ce tube reçoit un revêtement noir mat pour augmenter l'absorption du rayonnement solaire. Le cuivre a été choisi pour sa bonne conductivité thermique, assurant un transfert de chaleur rapide et efficace vers l'eau en circulation.

Sous le tube de cuivre, une plaque absorbante en cuivre recouverte de noir recouvre toute la surface du capteur. Ce panneau améliore l'efficacité thermique en captant le maximum d'énergie

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

solaire et en la transférant au fluide caloporteur. Une plaque de polystyrène de 3 cm d'épaisseur est placée sous la plaque absorbante pour empêcher le transfert de chaleur vers l'arrière du capteur. Enfin, le panneau en bois disposé à l'arrière forme une couche supplémentaire d'isolation, réduisant les pertes de chaleur vers l'extérieur. La circulation du fluide est assurée par une pompe, tandis qu'un débitmètre maintient et contrôle le débit dans le circuit hydraulique.



Figure 1-7 : Photo montre le capteur CSTPE .

1.2.2 Synthèse des composants

Le tableau ci-dessous présente les différents composants du capteur solaire installé sur le site de l'UARER.

Tableau 1-1 : Composants du CSTPE

Couche	Matériau	Fonction
1. Couvercle supérieur	Verre trempé transparent	Permet le passage du rayonnement solaire, effet de serre
2. Cadre	Bois	Support structurel
3. Absorbeur	Plaque en cuivre noire	Absorption du rayonnement et transfert de chaleur
4. Isolation	Polystyrène	Réduction des pertes thermiques vers le bas
5. Base	Contreplaqué	Support structurel du capteur

1.2.3 Principe du circuit hydraulique en boucle fermée :

Le système fonctionne selon le principe de la boucle fermée : l'eau circule indépendamment de l'eau dans le réservoir de stockage. Il est absorbé par le fond du réservoir, passe à travers le capteur où il est chauffé, puis retourne dans le réservoir en insérant une bobine placée à l'intérieur. La chaleur est ensuite transférée par échange de chaleur à l'eau dans le réservoir, sans aucun mélange entre les deux liquides. Le transfert de chaleur se produit selon trois mécanismes principaux :

- Absorption de l'énergie solaire par une surface noire ;
- Conduction thermique, qui transfère la chaleur de la plaque de cuivre au tube ;
- Convection, qui transfère la chaleur du tube à l'eau en circulation.

1.2.4 Support métallique et réglage de l'inclinaison

Un support métallique en angle d'acier (4cm × 4cm) est conçu et construit pour le placement du capteur solaire thermique. La longueur de chaque élément d'angle a été déterminée mensuellement dans le but d'améliorer la collecte du rayonnement solaire, comme indiqué dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1-2 : Angles d'inclinaison mensuels et dimensions associés à la structure de support

Mois	L'angle d'inclinaison (°) [2]	Hauteur(H) (cm)	Distance(D) (cm)
Octobre	42.45	126.82	138.64
Novembre	51.30	146.64	117.48
Décembre	54.74	153.42	108.47
Janvier	52.29	148.65	114.93
Février	44.43	131.53	134.18
Mars	33.58	103.92	156.54
Avril	22.29	71.26	173.85

Les mesures effectuées montrent que la hauteur du Soleil ainsi que les paramètres géométriques d'incidence (hauteur H et distance D) varient avec les saisons. Ces différences modifient la quantité d'énergie solaire que le capteur capte réellement. Le réglage de l'inclinaison du capteur en fonction de ces paramètres améliore ses performances, en particulier durant la période hivernale.

1.2.5 Amélioration technique et performance du système

L'amélioration des performances du système dépend de plusieurs dispositions techniques :

- Le couvercle en verre transparent réduit la perte de chaleur due au réchauffement climatique.
- Matériaux isolants haute performance couvrant les surfaces latérales et arrière.
- Ajustez l'angle d'inclinaison en fonction de la latitude du site d'installation.

Le capteur solaire thermique est une solution adaptée à la production d'eau chaude sanitaire, notamment dans les zones très ensoleillées comme à Ghardaïa (Algérie). Orienté au sud et conçu selon l'optimisation thermique en tenant compte des changements saisonniers de l'angle solaire, cet appareil atteint des performances thermiques maximales.

Ainsi, il contribue à réduire la consommation d'énergie traditionnelle et encourage l'utilisation des énergies renouvelables.

1.3 Équipements et instruments de mesure :

Dans cette étude expérimentale, plusieurs instruments de mesure et de contrôle ont été utilisés pour assurer un suivi précis des performances thermiques du système.

1.3.1 STC_1000 Régulateur de température

Le STC-1000 est un régulateur de température programmable qui commande la mise en marche de la pompe lorsque dès que la température atteint 40 °C, assurant ainsi un fonctionnement automatique et stable du système.



Figure 1-8 : STC-1000 régulateur de température.

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

Lorsque la température du capteur dépasse la valeur de consigne, l'appareil alimente la pompe ; dans le cas contraire, il en interrompt l'alimentation. Cette régulation optimise le transfert thermique et réduit la consommation énergétique.

Tableau 1-3 : Principe de fonctionnement du STC-1000

Condition	Action du STC_1000	État du Pompe
$T_{\text{capteur}} > T_{\text{consigne}}$	Fermeture du relais	ON
$T_{\text{capteur}} < T_{\text{consigne}}$	Ouverture du relais	OFF

1.3.2 Enregistreur de données TESTO 176 T4

Un enregistreur de température TESTO 176 T4 avec quatre entrées pour thermocouples de type K est utilisé pour l'acquisition des températures. Les capteurs sont répartis comme suit :

- Entrée 1 : réservoir ;
- Entrée 2 : entrée du capteur ;
- Entrée 3 : sortie du capteur ;
- Entrée 4 : plaque de cuivre.



Figure 1-9 : Thermomètre TESTO 176 T4.

1.3.3 Pyranomètre

L'acquisition des données de rayonnement solaire est réalisée par un pyranomètre à la station radiométrique **URAER** (**Fig. 1-3**). Ce dispositif permet un suivi précis de l'ensoleillement sur le site expérimental de Ghardaïa avec un pas de temps de dix minutes. Ces mesures radiométriques sont essentielles pour corrélérer les apports solaires avec la performance thermique de **CSTPE**.

1.3.4 Pompe de circulation

La pompe électrique force la circulation de l'eau dans un circuit fermé, assurant le transfert continu du fluide caloporteur à travers le capteur solaire.



Figure 1-10 : la pompe de circulation.

1.3.5 Débitmètre à eau

Installé verticalement dans le circuit fermé, le débitmètre permet une lecture directe et précise du débit de l'eau circulant entre le réservoir d'eau et le **CSTPE**. Cette configuration assure une stabilisation du fluide, assurant ainsi la fiabilité des mesures nécessaires à la surveillance du comportement hydraulique du système. Cet appareil est essentiel pour ajuster avec précision la quantité d'eau injectée dans le réseau expérimental.

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie



Figure 1-11 : Débitmètre pour eau.



Figure 1-12 : montre le prototype CSTPE.

1.4 Acquisition et de traitement des données :

Le dispositif expérimental comprend une chaîne de mesure complète dédiée à l'analyse des paramètres physiques régissant le fonctionnement du système. Cette architecture repose sur trois piliers technologiques : une instrumentation de précision (thermocouples et débitmètre de type K), un enregistreur de données (TESTO 176 T4) et un système de contrôle automatisé (STC-1000).

La surveillance thermique est assurée par un réseau de thermocouples de type K stratégiquement positionnés en différents points du circuit. Les signaux analogiques générés sont automatiquement convertis et archivés par l'enregistreur de données TESTO 176 T4, garantissant ainsi la traçabilité des mesures. En même temps, le dispositif de commande contrôle les composants dynamiques, notamment la pompe de circulation, selon des seuils de température prédéfinis. Ce système de régulation assure non seulement la protection de l'installation, mais aussi la stabilité des conditions expérimentales.

L'utilisation des données collectées permet d'atteindre les objectifs analytiques suivants :

- ✓ Analyse temporelle : étude de l'évolution dynamique des profils de température.
- ✓ Évaluation de l'efficacité : Déterminer la performance thermique intrinsèque du capteur solaire.
- ✓ Caractérisation systémique : modélisation du comportement général d'une installation.
- ✓ Bilan de puissance : Calcul précis du gradient thermique (ΔT) entre l'entrée et la sortie du capteur.

Chapitre 1 : Dispositif expérimental et méthodologie

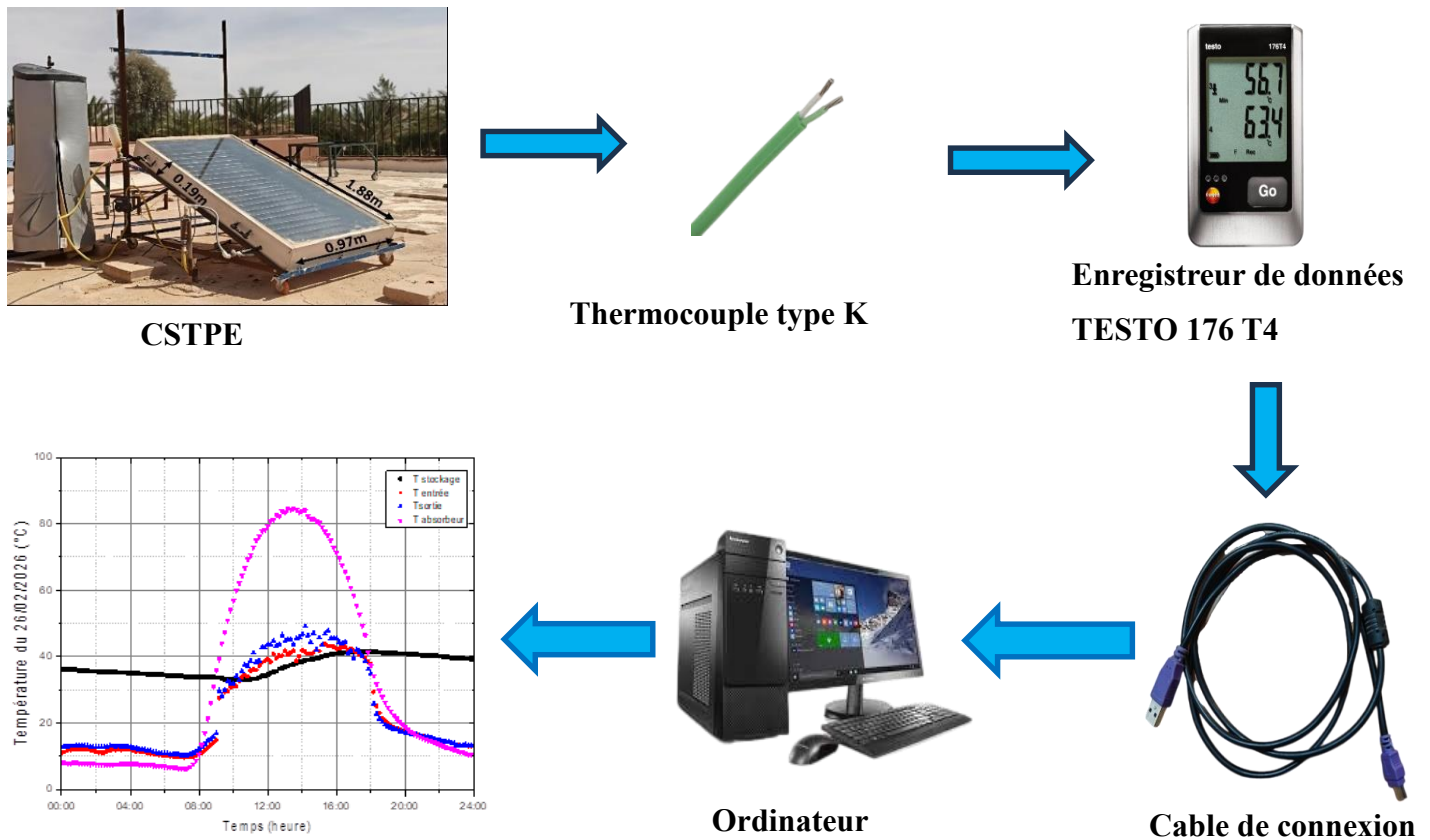


Figure 1-13 : Schéma de principe du système de mesure des températures sur le CSTPE.

1.4.1 Déroulement de la phase expérimentale

La phase expérimentale a débuté au mois de février. Dans un premier temps, un support métallique destiné à la fixation du capteur solaire a été réalisé et installé afin d'assurer la stabilité de l'ensemble du système en fonctionnement et de résister aux conditions extérieures. Avant la mise en place du capteur, des calculs relatifs aux angles d'inclinaison adaptés à chaque mois de l'année ont été effectués, en tenant compte de la variation de la position du soleil selon les saisons. L'objectif était de choisir l'orientation la plus favorable pour capter le maximum de rayonnement solaire et obtenir un rendement thermique optimal.

Après l'achèvement de l'installation, la partie pratique de l'étude a été menée à l'aide de plusieurs instruments de mesure et de contrôle afin de suivre le comportement du système et d'évaluer ses performances thermiques dans des conditions réelles de fonctionnement. L'appareil principal utilisé est l'enregistreur de données TESTO 176 T4, choisi pour sa précision de mesure et sa capacité à enregistrer automatiquement les données à intervalles réguliers, ce qui a facilité le suivi quotidien ainsi que l'exploitation des résultats.

1.4.2 Comportement thermique nocturne et isolation

L'étude a également porté sur le comportement thermique du réservoir durant la période nocturne, afin de vérifier sa capacité à conserver la chaleur accumulée pendant la journée et de déterminer l'importance des pertes thermiques au cours du temps. Cet aspect est essentiel, car il reflète l'efficacité de l'isolation thermique du réservoir ainsi que la possibilité d'utiliser l'eau chaude en dehors des périodes d'ensoleillement.

Conclusion

Le positionnement stratégique des capteurs aux quatre points clés du circuit a permis une surveillance précise de la température, de jour comme de nuit. Les ajustements mensuels de l'angle d'inclinaison, calculés en fonction de la hauteur solaire, ont optimisé la collecte du rayonnement tout au long de la période d'étude. Les données recueillies ont montré une bonne stabilité du système et une réponse adaptée aux variations saisonnières de l'ensoleillement. Ces résultats nous permettent d'envisager, dans les chapitres suivants, une évaluation quantitative de la performance thermique et l'identification des axes d'amélioration possibles.

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

2.1 Effet de l'angle d'inclinaison du capteur sur la production d'ECS :

La production d'un capteur solaire plat est étroitement liée aux conditions météorologiques locales, qui déterminent la quantité d'énergie thermique récupérable pour produire de l'eau chaude sanitaire. Le rayonnement solaire global, en particulier lors des transitions saisonnières telles que le printemps, affecte directement l'élévation de température du fluide caloporteur circulant dans l'absorbeur. Pendant ce temps, la température ambiante et la vitesse du vent jouent un rôle crucial dans les pertes thermiques du capteur dues à la convection et au rayonnement. Une analyse minutieuse de ces facteurs climatiques permet d'optimiser la taille de l'installation et d'assurer une couverture stable des besoins en eau chaude, même pendant les jours d'hiver où les radiations sont les plus fréquentes.

Une étude expérimentale menée au sein de l'UARER Ghardaïa durant la période hivernale, a permis de faire un bilan concret des performances thermiques du système en conditions climatiques réelles. En effectuant des mesures de température régulières à l'entrée et à la sortie du capteur, ainsi qu'au niveau de l'absorbeur et du réservoir de stockage, il est possible de suivre avec précision le développement du transfert de chaleur. Ces données expérimentales, collectées à intervalles réguliers, sont essentielles pour calculer l'énergie utile récupérée par un fluide caloporteur. Par conséquent, l'analyse de ces paramètres permet de déterminer avec précision la production instantanée et le rendement global du capteur solaire à eau de surface. Cette approche confirme la capacité de l'appareil à fournir une quantité suffisante d'eau chaude sanitaire, même lorsque les températures extérieures sont basses.

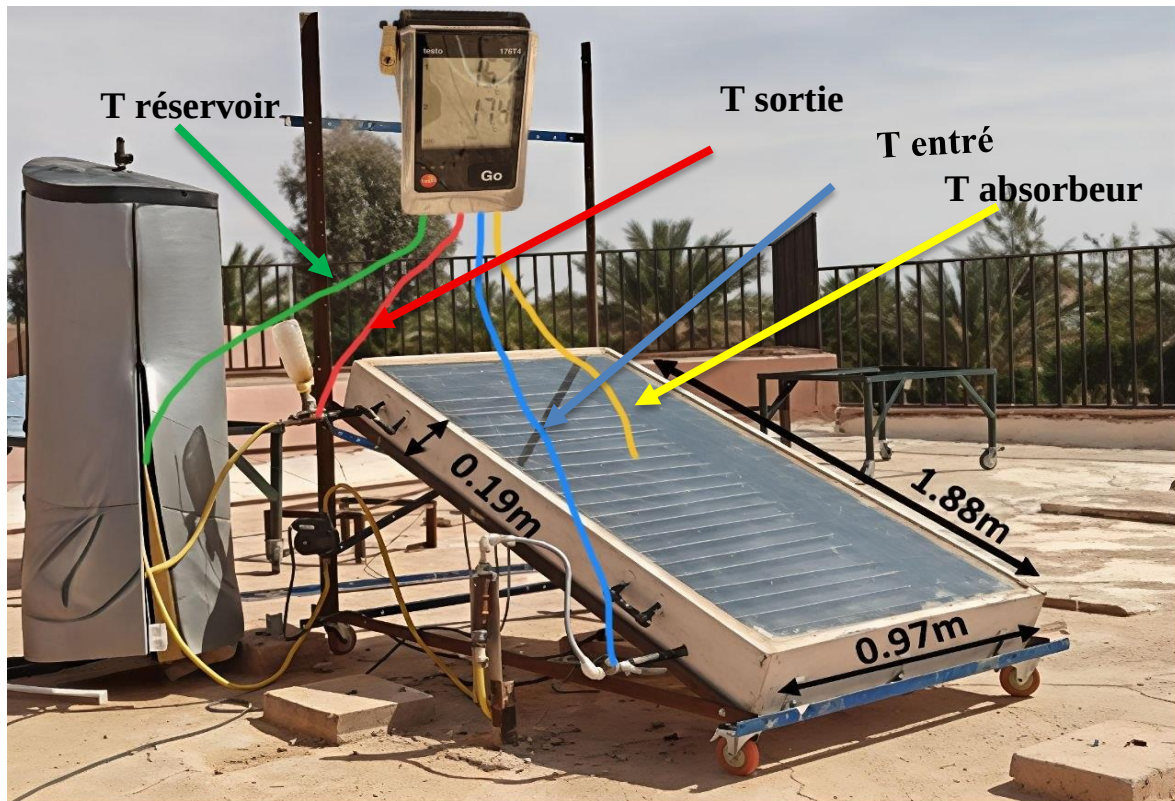


Figure 2-1 : Photo de capteur montre les points de mesure de température (entré, sortie, absorbeur et réservoir d'eau).

L'ajustement de l'angle d'inclinaison est un critère essentiel pour maximiser la collecte directe du rayonnement solaire tout au long de l'année. Comme le montrent les images expérimentales, l'inclinaison optimale du capteur varie fortement en fonction de la position apparente du Soleil dans le ciel de Ghardaïa. En février, lorsque le Soleil est plus bas sur l'horizon, une inclinaison plus raide de 44.43° est nécessaire pour que les rayons frappent l'absorbeur presque perpendiculairement. À l'inverse, en avril, le lever du soleil vers l'azimut nécessite de réduire cet angle à 22.29° pour maintenir une efficacité de conversion maximale. Cet ajustement saisonnier de l'angle d'inclinaison améliore l'apport de chaleur et compense les différences de course du soleil, assurant ainsi des performances constantes du chauffe-eau solaire.

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats



Figure 2-2 : photos explique l'angle d'inclinaison optimal du capteur solaire pour les mois février (à droite) et avril (à gauche).

Ces différences angulaires affectent directement la configuration spatiale de capteur solaire thermique plan à eau, la hauteur verticale du bord supérieur allant de 71.26 cm à 153.42 cm, tandis que la projection de la distance horizontale au sol varie de 108.47 cm à 173.85 cm. Cette optimisation dimensionnelle garantit une adaptation précise de la structure aux besoins en énergie solaire saisonnière du site URAER.

Afin de mener l'étude théorique et d'évaluer la faisabilité économique du projet, la phase de réalisation physique a été initiée au sein de l'URAER à Ghardaïa. Cette étape nécessite une sélection minutieuse des composants qui s'adaptent aux contraintes thermiques de l'environnement désertique, tout en optimisant les coûts de fabrication. Les désignations suivantes combinent tous les matériaux, équipements de mesure et accessoires de plomberie nécessaires pour assembler le prototype du capteur solaire thermique plan. Le tableau ci-dessous présente donc l'estimation détaillée, en précisant les descriptions, quantités et prix unitaires pour chaque composant du système.

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

Tableau 2-1 : liste détaillée des composants et leurs prix du CSTPE.

N°	Désignation des articles	Quantité	Prix unitaire	Montant
01	Bois de 3cm de 6m	1	450 .00	2700.00
02	Plaque de cuivre de 1 mm 1*2m	1	7 000.00	7 000.00
03	Pompe à eau	1	2 000.00	2 000.00
04	Robinsets d'arrêt	2	600.00	1 200.00
05	Polystyrène	1	700.00	700.00
06	Verre trempée claire 4mm 0.91*1.81 m	1	7 000.00	7 000.00
07	Peinture noire Mat 500 ml	1	350.00	350.00
08	Contreplaqué de 1 cm 1*2 m	1	650.00	650.00
09	Tube en cuivre de 16 mm de 19m	1	800.00	15 200.00
10	Purgeur	1	950.00	950.00
11	Flexible 60cm 15/15	4	750.00	3 000.00
12	Structure métallique 40*40 mm de 6m	2	1 550.00	3 100.00
13	Te	1	150.00	150.00
14	Colle silicone	1	350.00	350.00
15	STC-1000 régulateur de température	1	2 500.00	2 500.00
			TOTAL	46 850.00

2.2 Analyse des résultats obtenus

L'analyse expérimentale est basée sur l'observation temporelle des grandeurs thermiques et radiatives d'un CSTPE. Les figures 1 et 2 illustrent la réponse du système aux conditions météorologiques hivernales à Ghardaïa.

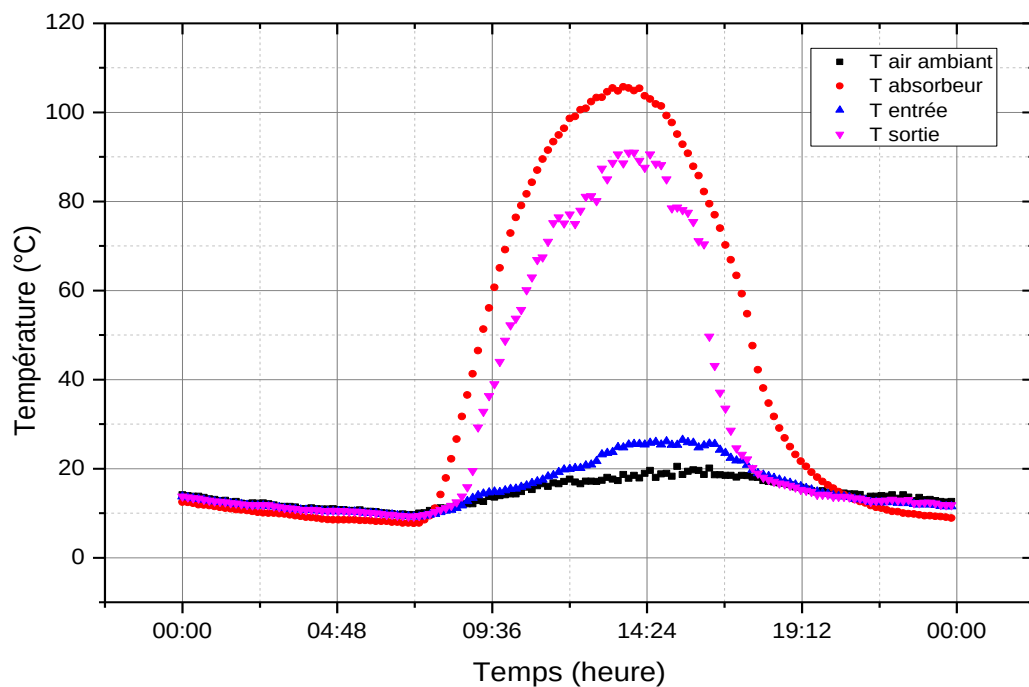


Figure 2-3 : Evolution temporelle des températures de l'air ambiant, de l'absorbeur et du fluide (entrée/sortie) pour la journée du 20/02/2026.

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

La figure 2-3 montre la thermodynamique du système pour le 20 février, mettant en évidence la corrélation étroite entre la lumière du soleil et les performances des capteurs. Dès 8 heures du matin, il y a une augmentation très rapide de la température de la plaque absorbante, qui atteint un pic notable de 105 °C autour de 14:00, reflétant sa capacité d'absorption sélective élevée. Ce flux de chaleur est transféré efficacement au fluide caloporteur, dont la température de sortie atteint un pic d'environ 90 °C tout en suivant strictement la courbe d'absorption. Le gradient thermique important maintenu entre l'entrée et la sortie du collecteur confirme l'efficacité du transfert de chaleur par convection au liquide. Enfin, la convergence de toutes les mesures vers la température ambiante pendant la phase nocturne démontre la perte naturelle de chaleur du prototype vers son environnement immédiat.

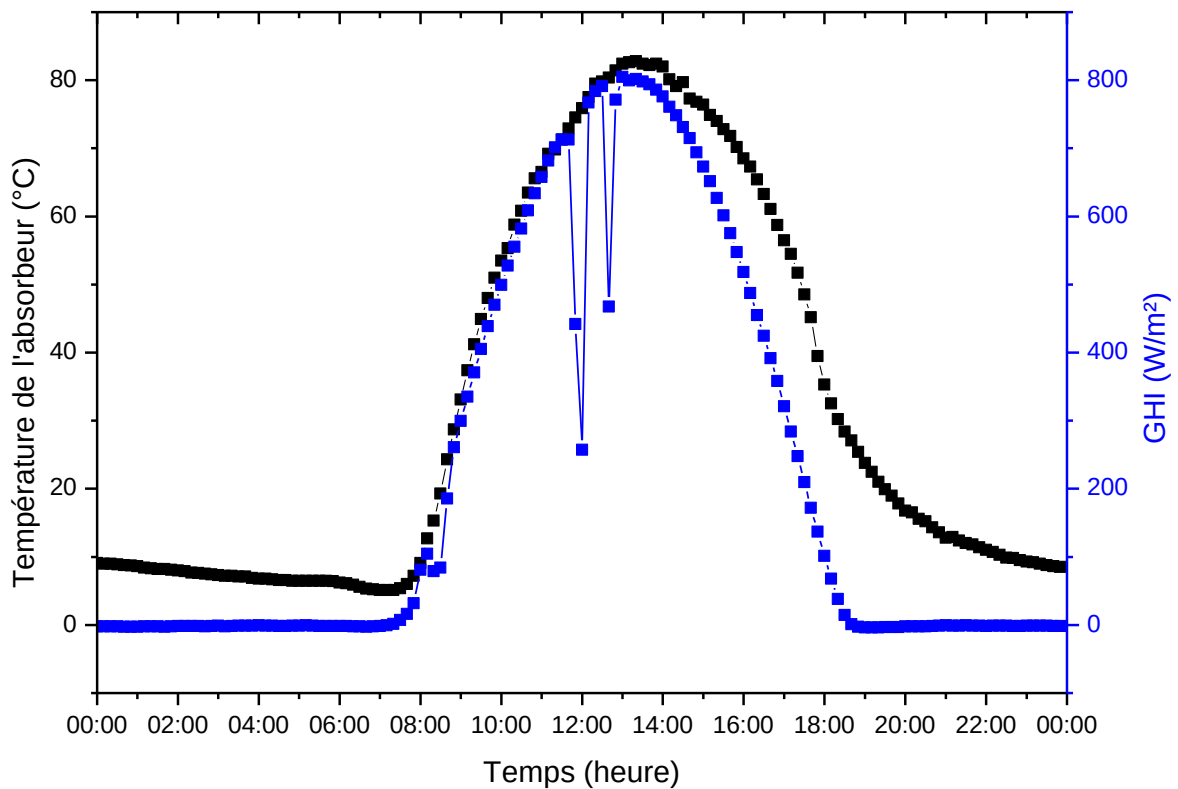


Figure 2-4 : Evolution temporelle des températures de l'air ambiant, de l'absorbeur et du fluide (entrée/sortie) pour la journée du 23 Février 2026

La figure 2-4 met en évidence la relation directe entre l'intensité totale de l'éclairage horizontal (GHI) et la réponse thermique de l'absorbeur le 23 février. On observe que la température de la plaque est étroitement contrôlée par le flux solaire, avec un pic thermique d'environ 83 °C coïncidant précisément avec le pic de rayonnement à 800 W/m². Cette dépendance devient plus prononcée lors des périodes d'instabilité radiative enregistrées entre 11h00 et 13h00, lorsque le passage des bancs de nuages provoque des fluctuations immédiates de la température de

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

l'absorbeur. Cette interaction instantanée avec les changements de densité d'écoulement met en évidence la faible inertie thermique de la plaque absorbante ainsi que sa grande sensibilité aux changements atmosphériques locaux caractéristiques de la région de Ghardaïa.

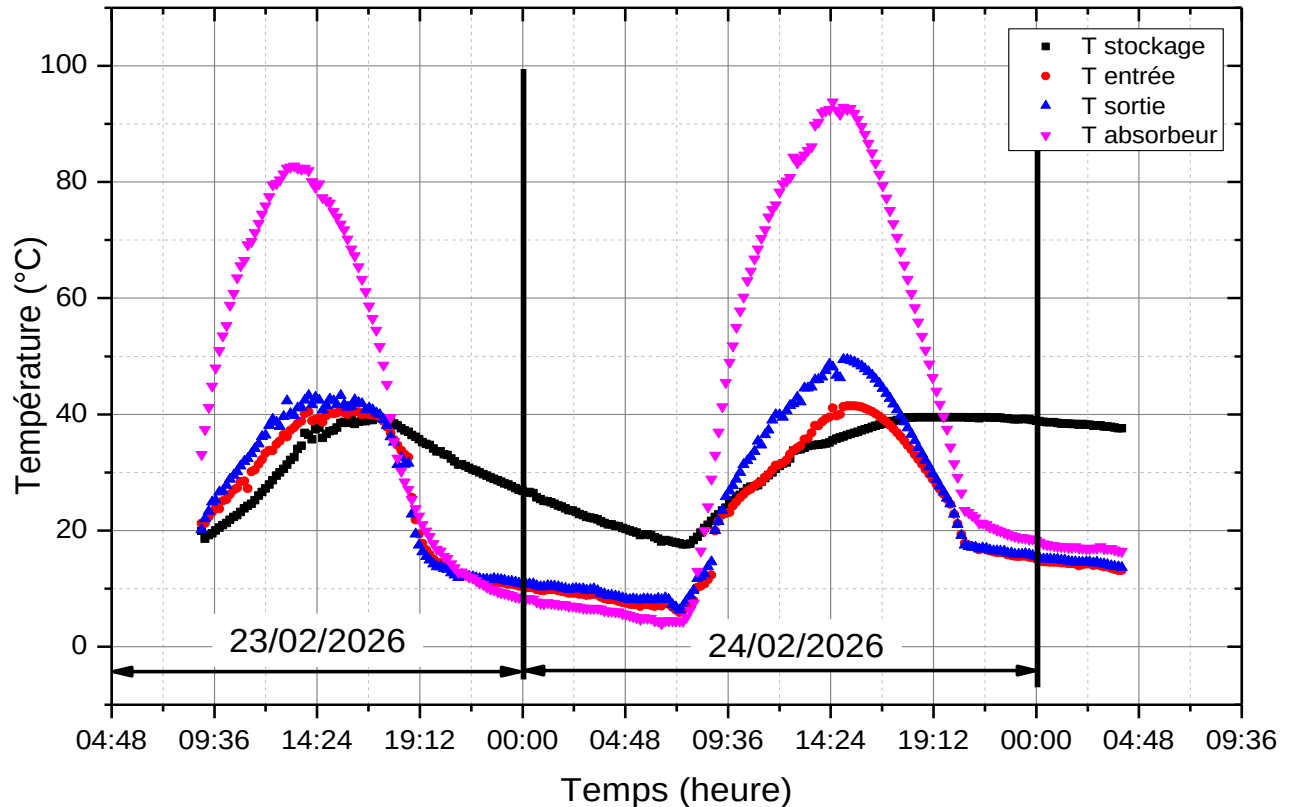


Figure 2-5 : variations des températures d'entrée, de sortie, de l'absorbeur et du stockage pour la journée du 23 et 24 février 2026.

L'analyse de la figure 2-5 nous permet de comparer l'effet de l'isolation sur les performances thermiques du système au cours des 23 et 24 février. Le 23 février, le réservoir d'eau fonctionne sans isolation, ce qui entraîne une baisse notable de la température de stockage dès que le rayonnement solaire diminue. À l'inverse, pendant le 24 février, l'ajout d'isolant réduit considérablement les pertes de chaleur dans l'environnement. Cette différence expérimentale démontre l'efficacité de la coque isolante pour maintenir l'eau à une température exploitable pendant longtemps.

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

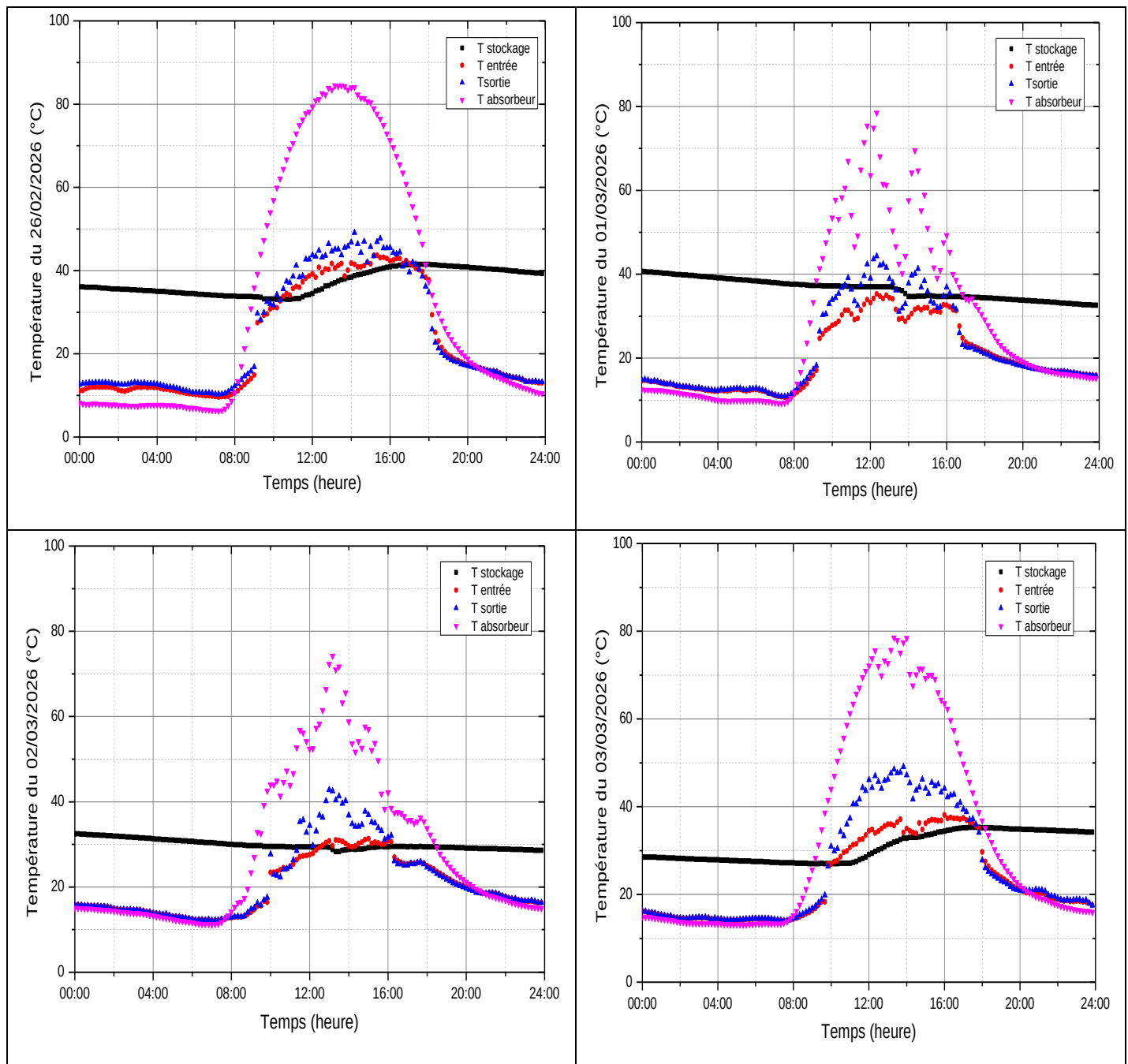


Figure 2-6 : variations des températures d'entrée, de sortie, de l'absorbeur et du stockage pour les différents jours.

Tableau 2-2 : Résultats statistiques obtenus pour les différents débits d'eau

	Q= 50 L/h (25 février 2026)	Q= 80 L/h (26 Février au 08 Mars 2026)
R²	0.8197	0.6282
r	0.9054	0.7926
RMSE (°C)	0.92	4.0232

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

Le prototype du CSTPE, installé sur un toit horizontal avec une inclinaison du collecteur de 46° en février et couvrant 1.65 m², a capté le rayonnement solaire incident à l'URAER à Ghardaïa. L'eau sortant du collecteur à 52 °C, sous un débit de 50 à 130 L/h, permet un transfert de chaleur efficace destiné à la production d'eau chaude sanitaire (ECS).

Des campagnes de mesures qui ont duré plusieurs jours confirment la présence d'un gradient de température de 15 °C entre les entrées et les sorties des capteurs le 3 mars 2026. Ces résultats confirment la validité des performances du prototype pour les applications de production d'eau chaude sanitaire (ECS) en milieu résidentiel sous climat sec.

Les données enregistrées par les quatre thermocouples placés (dans le réservoir, au centre de l'absorbeur, à l'entrée et à la sortie) sont représentées dans le tableau suivant.

Tableau 2-3 : présentation des paramètres enregistrés pendant la période de stage

	T réservoir	T entrée	T Absorbeur	T sortie	GHI	T air	T absorbeur jours
Min	18.6	13.9	23.4	14.8	0	8.93	71.52
Moyenne	34.92	34.94	64.98	36.82	256.31	16.32	80.83
Max	43.5	45.3	93.80	52	1006.24	27.26	86.54

Durant la période allant du 19 février au 8 avril 2026, entre 09 h 00 et 17 h 00, les mesures enregistrées montrent une température moyenne de l'air de 19.14 °C. Pendant ce même intervalle, la température moyenne de l'absorbeur atteint 64.98 °C, traduisant une élévation thermique importante due au rayonnement solaire. La température moyenne de sortie d'eau du capteur s'établit, quant à elle, à 36.82 °C, ce qui confirme la capacité du système à transférer efficacement la chaleur vers le fluide caloporteur.

L'étude expérimentale met en évidence un bon accord entre les valeurs mesurées et prédites, avec des performances qui varient selon le débit d'eau imposé au système. Pour un débit de 50 L/h, les résultats montrent une corrélation élevée ($R^2 = 0.8197$), un coefficient de corrélation élevé ($r = 0.9054$) et une faible erreur quadratique moyenne ($RMSE = 0.92^\circ\text{C}$), ce qui reflète un comportement global stable du capteur. D'autre part, à 80 L/h, la qualité de l'ajustement diminue significativement ($R^2 = 0.6282$; $r = 0.7926$), tandis que l'erreur augmente ($RMSE = 4.0232^\circ\text{C}$), ce qui suggère une performance moins régulière du système à cette vitesse. Ce qui indique que ce taux est le plus favorable au fonctionnement du système. De plus, les volumes d'eau contenus dans les différentes parties du circuit (2.7 L dans le tube du CSTPE, 0.8 L dans le serpentin du réservoir de stockage et 0.4 L dans la tuyauterie de raccordement) montrent que la capacité thermique du système est répartie entre plusieurs éléments, qui influencent directement son inertie thermique et sa réponse dynamique.

Calcul de la température de sortie par régression linéaire multiple :

$$T_{sortie} = 1.85 + 0.72 * T_{entrée} + 0.15 * T_{absorbeur} \quad (2-1)$$

2.3 Métriques de performance conventionnelles :

L'évaluation de la performance des modèles prédictifs est basée sur trois composantes fondamentales de l'erreur : le biais, la variance et la corrélation. Ces paramètres permettent de quantifier la précision et la robustesse des outils de prévision [3]. Parmi les indicateurs statistiques les plus couramment utilisés figurent [4] :

✓ **L'erreur quadratique moyenne (RMSE)**, qui permet de mesurer l'écart entre les valeurs prédites $\hat{T}_i$ et les valeurs observées (T_i) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (T_i - \hat{T}_i)^2} \quad (2-2)$$

✓ Coefficient de corrélation (r), qui évalue la force de la relation linéaire entre les variables :

$$r = \frac{(Cov(\hat{T}, T))^2}{Var(T) * Var(\hat{T})} \quad (2-3)$$

✓ Coefficient de détermination (R^2) :

$$R^2 = 1 - \frac{Var(\hat{T} - T)}{Var(T)} \quad (2-4)$$

Le tableau suivant résume les indicateurs statistiques calculés pour évaluer la précision du modèle prédictif : le coefficient de détermination (R^2) atteint 0.7966, le coefficient de corrélation (r) est de 0.8925 et l'erreur quadratique moyenne (RMSE) est de 3.27 °C pour un échantillon (n) de 1226 mesures. Ces métriques permettent de quantifier la fiabilité des simulations thermiques réalisées dans le cadre de l'étude de CSTPE.

Tableau 2-4 : paramètres statistiques d'évaluation de la performance d'un modèle prédictif.

Indicateurs statistiques	Valeur
R^2	0.7966
r	0.8925
RMSE (°C)	3.27

L'évaluation de la précision du modèle de prédiction de température en sortie est démontrée par la comparaison des données expérimentales et de simulation. Le premier graphique (Fig.2-7)

Chapitre 2 : Étude des Performances et Analyse des Résultats

montre l'évolution temporelle des profils de température, où l'on observe une superposition presque parfaite entre les courbes mesurées et estimées. Cette cohérence est confirmée par le diagramme de corrélation adjacent, qui montre la distribution des points de mesure étroitement alignés le long de la ligne de régression (Fig. 2-8). Les résultats démontrent statistiquement la capacité du modèle à reproduire avec précision les variations thermiques du système CSTPE. L'erreur quadratique moyenne de 3.27°C , calculée sur un échantillon de 1226 points, montre une grande précision malgré d'importantes fluctuations cycliques dues au climat sec de Ghardaïa.

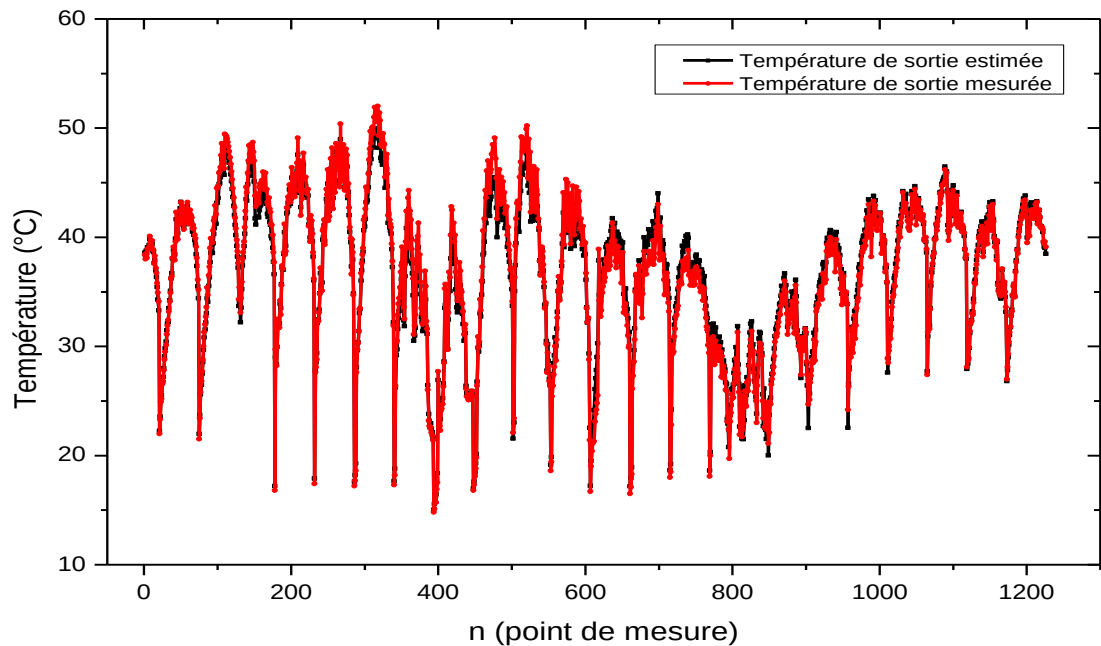


Figure 2-7 : Comparaison des profils de température de sortie (mesurée vs. estimée) en fonction des points de mesure.

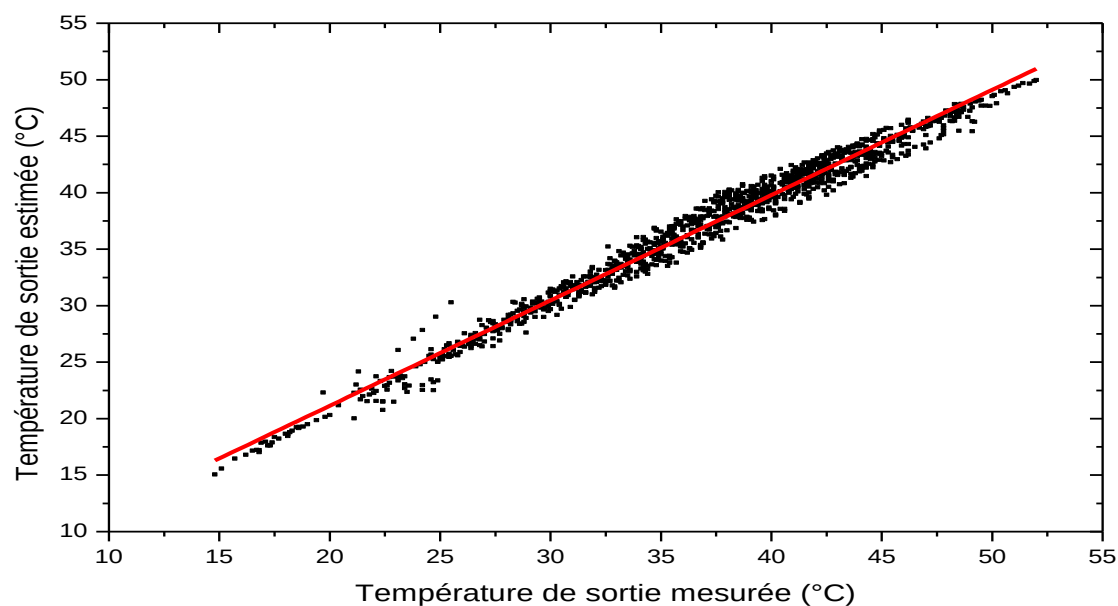


Figure 2-8 : Comparaison de la performance du modèle prédictif, valeurs mesurées et estimées du Température de sortie.

2.4 Calcule de rendement

Calcule de rendement par pas de temps (η_i) :

Pour chaque point de mesure i (correspondant à un intervalle $\Delta t=10$ min), le rendement instantané :

$$\eta_i = \frac{\dot{m} \cdot C_p \cdot (T_{\text{sortie},i} - T_{\text{entrée},i})}{GHI_i \cdot S_{\text{absorbeur}}} \quad (2-5)$$

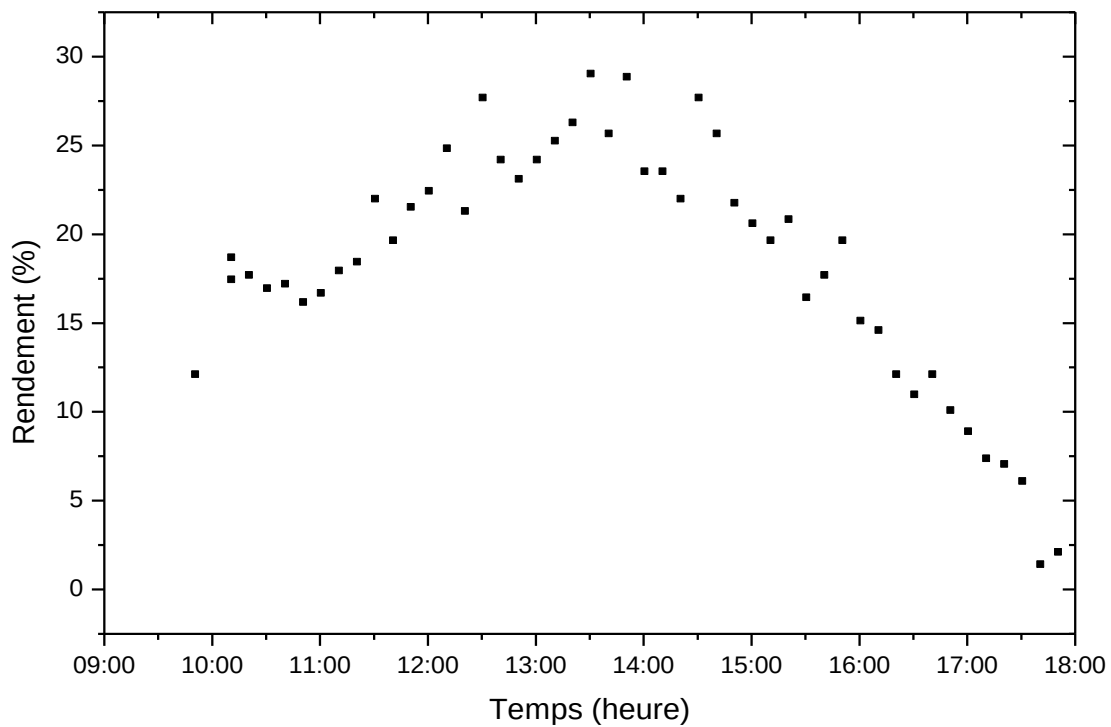


Figure 2-9 : Évolution temporelle du rendement thermique du capteur solaire (25/02/2026).

Le profil d'évolution du rendement présenté à la Figure 2-9 correspond à la campagne de mesure menée le 25 février 2026. Pour cet essai, le débit d'eau a été maintenu constant à 50 L/h, une valeur choisie pour favoriser une augmentation significative de la température à la sortie du capteur. Il est à noter que sous ce régime d'écoulement, le rendement atteint un maximum de 29.05 % vers 13h30. Cette performance stable pendant des heures de fort ensoleillement confirme l'efficacité du transfert de chaleur entre l'absorbeur et le fluide caloporteur pour un débit modéré, confirmant ainsi la capacité du prototype à répondre aux exigences de production d'eau chaude sanitaire (ECS) même en période hivernale sous le climat de Ghardaïa.

Matin (09h00 – 12h00) : L'efficacité augmente progressivement à mesure que l'intensité de l'énergie solaire augmente et que l'inertie thermique des composants du capteur est surmontée.

Après-midi (15h00 - 18h00) : Il y a une baisse continue du rendement. Cela s'explique par une diminué.

Conclusion générale

Conclusion générale

La présente étude a évalué expérimentalement les performances thermiques d'un capteur solaire thermique plan à eau (CSTPE) installé sur le site URAER à Ghardaïa, dans le climat aride et très ensoleillé du Sahara algérien. L'objectif principal était d'analyser le comportement du système en conditions réelles et d'identifier les paramètres influençant son efficacité énergétique.

Les résultats obtenus montrent que le capteur atteint des températures d'absorption de 105 °C et des températures de sortie d'eau d'environ 52 °C, avec un gradient thermique moyen de 15 °C entre l'entrée et la sortie. Le rendement thermique maximal enregistré est de 29.05 % pour un débit de 50 L/h, une valeur associée à une corrélation élevée ($R^2 = 0.8197$) et à une faible erreur quadratique moyenne (RMSE = 0.92 °C). L'ajustement mensuel de l'angle d'inclinaison (de 22.29° à 54.74°) s'est avéré essentiel pour optimiser la collecte du rayonnement solaire pendant l'hiver. De plus, l'isolation du réservoir améliore considérablement le maintien de la température la nuit, réduisant ainsi les pertes de chaleur.

Un modèle de régression linéaire multiple a été établi pour prédire la température de sortie ($T_{\text{sortie}} = 1.85 + 0.72 \cdot T_{\text{entrée}} + 0.15 \cdot T_{\text{absorbeur}}$), validé par des indicateurs statistiques satisfaisants ($R^2 = 0.7966$; RMSE = 3.27°C). La comparaison des débits a montré qu'un débit modéré (50 L/h) favorise un meilleur compromis entre l'élévation de température et l'efficacité globale.

Ce travail confirme la viabilité technique du capteur solaire de surface pour la production d'eau chaude sanitaire en milieu saharien. Ils contribuent à une meilleure compréhension des interactions entre les paramètres géométriques, les conditions climatiques locales et la performance thermique.

Références bibliographiques

- [1] <https://ressources-naturelles.canada.ca/carte-outils-publications/outils-logiciels/retscreen>
- [2] Djeflal, R., Chenini, N., Ramdani, N., Nezli, I.E., Bachaouat, T. 2025. Evaluate the impact of the optimum inclination for the installation of thermophotovoltaic modules. SIENR'25
- [3] Coimbra, C. F., Kleissl, J., & Marquez, R. (2013). Overview of solar-forecasting methods and a metric for accuracy evaluation. *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, 171-194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-397177-7.00008-5>
- [4] Inman, R. H., Pedro, H. T., & Coimbra, C. F. (2013). Solar forecasting methods for renewable energy integration. *Progress in energy and combustion science*, 39(6), 535-576. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2013.06.002>