



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

N° d'enregistrement

Université de Ghardaïa

...../...../.....

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département de d'automatique et d'électromécanique

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

Master

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Énergies Renouvelables

Spécialité: Energies renouvelables en mécanique

Thème

**Contribution à l'évaluation des performances
thermiques d'un cuiseur solaire de type boîte intégrant
un système de stockage thermique**

Présenté par :

REZZAG Maroua

Soutenue publiquement le : 13/06/2026

Devant le jury composé de:

MEDOUKALI Hemza	MCA	Univ. Ghardaïa	Président
TAHTAH Reda	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
BARAKAT Fadila	MCB	Univ. Ghardaïa	Examineur
YETTOU Fatiha	Directeur de Recherche	URAER. Ghardaïa	Encadreur
RECIOUI Lobna	Doctorante	Univ. Ghardaïa	Co-encadreur

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Je rends grâce à Dieu, abondamment, purement et béni soit-Il, pour m'avoir accordé la réussite et le soutien tout au long de ce travail de recherche, depuis son commencement jusqu'à son achèvement.

La réalisation de ce mémoire n'a pas été une tâche aisée, mais plutôt un parcours jalonné de défis intellectuels et pratiques. Néanmoins, j'ai poursuivi mon chemin avec détermination, soutenu par des personnes à qui j'adresse toute ma considération et mon profond respect.

Je tiens à exprimer mes plus sincères remerciements et ma profonde gratitude à mes encadreurs, M^{me} **YETTOU Fatiha**; Directeur de Recherche à l'URAER, Ghardaïa et Responsable de l'équipe MCTH et à M^{lle} **RECIOUI Lobna**; Doctorante de l'université de Ghardaïa, qui ont été pour moi un véritable guide tout au long de ce parcours. Grâce à leurs orientations précieuses, leurs remarques pertinentes et leurs conseils constants, j'ai pu mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

J'adresse également mes vifs remerciements à l'ensemble de mes professeurs du département des Energies Renouvelables – Mécanique, qui ont contribué de manière essentielle à ma formation scientifique et académique tout au long de mes années d'études. Je n'oublie pas non plus de remercier mes collègues et amis qui m'ont soutenu, que ce soit par un conseil, un encouragement ou même un simple sourire sincère dans les moments de fatigue.

Enfin, du plus profond de mon cœur, j'exprime ma gratitude à ma chère famille, qui a joué le rôle le plus important dans mon parcours, par ses prières, sa patience et son amour inconditionnel. À vous tous... j'adresse mon profond respect et ma sincère reconnaissance.

Dédicace

﴿وَقُلْ اَعْمَلُوا فَسَيَرَى اللّٰهُ عَمَلَكُمْ وَرَسُولُهُ وَالْمُؤْمِنُونَ﴾

Je commence ces pages avec une conviction profonde et ancrée dans mon cœur : tout effort accompli, même s'il reste invisible aux yeux des gens, est préservé auprès d'Allah. Rien n'en est perdu, pas même le poids d'un atome.

C'est dans cet esprit de foi que je dédie ce modeste travail, écrit entre expérience et émotion, à ceux

qui ont été les racines de ma force et le prolongement de mon âme dans le voyage de la vie :

À mon cher père

Tu es la première sécurité, le pilier sur lequel je me suis appuyé dans ma faiblesse, et le modèle silencieux qui m'a appris que la virilité est une attitude, que la dignité est un principe, et que la patience face aux épreuves ouvre les portes du soulagement.

Merci pour chaque instant de ton temps, de tes conseils et de ton amour sincère, donné sans attendre en retour.

À ma chère mère

Tes prières pour moi étaient une protection invisible et une guérison silencieuse, et ton regard une sérénité incomparable.

Tu es la lumière qui m'a guidé lorsque j'ai trébuché, la paix qui précédait mes pas lorsque je doutais, et le foyer qui n'a jamais fermé ses portes face à mes faiblesses.

Ces mots ne sont qu'une trace de ce que tu as semé en moi de bonté et de lumière.

À mes frères et sœurs

Vous êtes les souvenirs de l'enfance, les compagnons des jours, les partenaires des joies et des peines.

Sans vous, le sens de mon histoire serait incomplet.

À mes vrais amis

À ceux qui ont été un soutien lorsque les jours étaient lourds, une présence lorsque les chemins devenaient étroits, et une joie qui allégeait mes silences.

Vous étiez la lumière invisible mais ressentie, et la chaleur qui a réorganisé ce que la vie avait dispersé en moi.

À tout enseignant, guide, et toute personne ayant laissé une empreinte dans ma vie

Même par un mot passager ou un geste simple, vous avez laissé une trace indélébile en moi.

Enfin, à moi-même

À cette âme qui a souffert en silence, puis s'est relevée des cendres sans perdre sa foi.



À celle qui est tombée plusieurs fois mais n'a jamais renoncé à ses rêves, ni cédé devant les épreuves.

Ces pages ne sont que ton miroir, ta mémoire et la preuve de ton chemin vers la survie.

Maroua REZZAG

الملخص:

يُعدّ التخزين الحراري عنصرًا أساسيًا لتحسين أداء المواقد الشمسية، ولا سيما المواقد من النوع الصندوقي. يلتقط هذا النموذج من المواقد الطاقة الشمسية بواسطة غطاء زجاجي ولوح ماص مطلي باللون الأسود غير اللامع؛ ومع ذلك، فإن أدائه غالبًا ما يتأثر بتغير شدة الإشعاع الشمسي. ولمعالجة هذا القيد، يتيح دمج نظام للتخزين الحراري تجميع الطاقة الشمسية وإطلاقها تدريجيًا أثناء عملية الطهي. في هذه الدراسة التجريبية، قمنا باختبار المواد المستخدمة، مثل الحجر والرمل والبارافين، التي تضمن استقرارًا أفضل لدرجة الحرارة الداخلية. ويتمثل الهدف الرئيسي لهذا العمل في تقييم الأداء الحراري للموقد من خلال تحليل تجريبي يتناول تغير درجة الحرارة، وزمن الطهي، وكذلك قدرة النظام على الحفاظ على درجة حرارة مفيدة في نهاية اليوم. كما يؤخذ في الاعتبار تأثير نوع مادة التخزين على الكفاءة الإجمالية. بلغت المردودات الحرارية التي حققتها مواد التخزين، ولا سيما البارافين والرمل والحجر، 21.46% و 25.47% و 27.3% على التوالي. وتُظهر النتائج أن دمج مواد التخزين الحراري المحسوس، مثل الرمل والحجارة، في موقد شمسي من النوع الصندوقي يُعدّ تحسينًا بسيطًا وفعالًا في الوقت نفسه. ويتيح هذا النهج زيادة ملحوظة في الكفاءة الحرارية وتقليل مدة الطهي مقارنة باستخدام البارافين. في المقابل، أظهر البارافين، المستخدم بوصفه مادة متغيرة الطور (PCM)، أداءً متفوقًا من حيث امتصاص الطاقة الحرارية، وسعة التخزين، والاستقرار الحراري، والحفاظ المطول على الحرارة. وتجعل هذه الخصائص منه حلًا مناسبًا بشكل خاص لتخزين الطاقة الحرارية، إذ يضمن استرجاعًا فعالًا للحرارة خلال فترات انخفاض الإشعاع الشمسي وكذلك بعد غروب الشمس.

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الشمسية، الموقد الشمسي من النوع الصندوقي، مواد التخزين الحراري، تقييم الأداء، دراسة تجريبية.

Résumé :

Le stockage thermique est fondamental pour optimiser les performances des cuiseurs solaires, en particulier ceux de type boîte. Ce modèle de cuiseur capte l'énergie solaire à l'aide d'un couvercle en verre et d'une plaque absorbante peinte en noir mat ; néanmoins, ses performances sont souvent entravées par la variabilité de l'irradiation solaire. Pour pallier cette limitation, l'intégration d'un système de stockage thermique permet d'accumuler l'énergie solaire et de la libérer progressivement durant la cuisson. Dans cette étude expérimentale, nous avons testé les matériaux utilisés, tels que la pierre, le sable et la paraffine, qui garantissent une meilleure stabilité de la température interne. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer les performances thermiques du cuiseur à travers une analyse expérimentale portant sur la variation de température, le temps de cuisson, ainsi que la capacité du système à maintenir une température utile en fin de journée. L'impact du type de matériau de stockage sur l'efficacité globale est également pris en considération. Les rendements thermiques obtenus par les matériaux de stockage, notamment la paraffine, le sable et la pierre, étaient respectivement de 21,46 %, 25,47 % et 27,3 %. Les résultats montrent que l'intégration de matériaux de stockage à chaleur sensible, tels que le sable et les pierres, dans un cuiseur solaire de type boîte constitue

une amélioration à la fois simple et efficace. Cette approche permet d'accroître de manière significative l'efficacité thermique et de réduire la durée de cuisson par rapport à l'utilisation de la paraffine. En revanche, la paraffine, utilisée comme matériau à changement de phase (PCM), a présenté des performances supérieures en matière d'absorption de l'énergie thermique, de capacité de stockage, de stabilité thermique et de maintien prolongé de la chaleur. Ces propriétés en font une solution particulièrement adaptée au stockage de l'énergie thermique, en assurant une restitution efficace de la chaleur lors des périodes de faible irradiance solaire ainsi qu'après le coucher du soleil.

Mots-clés : Énergie solaire, Cuisson solaire type boîte, Matériaux de stockage thermique, Évaluation des performances, Étude expérimentale.

Abstract:

Thermal energy storage is fundamental for optimizing the performance of solar cookers, particularly box-type solar cookers. This type of cooker captures solar energy using a glass cover and a matte black-painted absorber plate; however, its performance is often hindered by the variability of solar irradiance. To overcome this limitation, the integration of a thermal energy storage system makes it possible to accumulate solar energy and release it gradually during the cooking process. In this experimental study, we tested the storage materials used, namely stone, sand, and paraffin, which ensure better stability of the internal temperature. The main objective of this work is to evaluate the thermal performance of the cooker through an experimental analysis focusing on temperature variation, cooking time, as well as the system's ability to maintain a useful temperature at the end of the day. The impact of the type of storage material on the overall efficiency is also taken into consideration. The thermal efficiencies obtained using the storage materials, namely paraffin, sand, and stone, were 21.46%, 25.47%, and 27.3%, respectively. The results show that the integration of sensible heat storage materials, such as sand and stones, into a box-type solar cooker constitutes both a simple and effective improvement. This approach significantly increases the thermal efficiency and reduces the cooking time compared with the use of paraffin. In contrast, paraffin, used as a phase change material (PCM), exhibited superior performance in terms of thermal energy absorption, storage capacity, thermal stability, and prolonged heat retention. These properties make it a particularly suitable solution for thermal energy storage, ensuring effective heat release during periods of low solar irradiance as well as after sunset.

Keywords: Solar energy, Box-type solar cooker, Thermal energy storage materials, Performance evaluation, Experimental study.

Table des matières

Liste des figures

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Introduction générale	2
Chapitre 1 : État de l’art	4
1.1 Introduction	5
1.2 Cuiseurs solaires	5
1.3 Classification des cuiseurs solaires	6
1.3.1.1 Les cuiseurs solaires directs à panneaux	6
1.3.1.2 Les cuiseurs solaires à boîte	7
1.3.1.3 Les cuiseurs solaires paraboliques	8
1.4 Les cuiseurs solaires indirects	9
1.4.1 Les cuiseurs solaires à lentille de Fresnel	9
1.5 Les cuiseurs solaires sans système de stockage	11
1.6 Les cuiseurs solaires avec stockage	11
1.7 Avantages et inconvénients des cuiseurs solaires	11
1.8 conclusion	13
CHAPITRE 2 : Matériels et méthodes expérimentales	14
2.1 Introduction	15
2.2 Présentation du site étudié (site de Ghardaïa)	15
2.6 Paramètres caractéristiques du cuiseur	19
2.6.1 Détermination du paramètre ‘First figure of merit’	19
2.6.2 Détermination du paramètre ‘Second figure of merit’	19
2.6.3 Calcul de la puissance de cuisson	20
2.6.4 Détermination du rendement thermique	21
2.8 Rôle du stockage thermique	22
2.9 Instruments de mesure utilisés	22
Conclusion	24
Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et discussions	25
3.1. Introduction	26
3.2. Méthode et procédure expérimentale	26
3.3. Tests de cuiseur solaire sans stockage thermique	27

3.3.1. Test sans charge d'eau (stagnation)	27
3.3.2. Test avec charge d'eau	28
3.4. Les tests expérimentaux du cuiseur solaire boîte avec différents matériaux de stockage thermique	30
3.4.1 Test sans charge d'eau et avec matériaux de stockage thermique	30
3.4.1.2. Le test de stagnation de matière de stockage (sable)	32
3.4.1.3. Le test de stagnation de matière de stockage (Paraffine)	33
3.5.1. Essai d'eau avec la pierre	34
3.5.2. Essai d'eau avec le sable	35
3.5.3. Essai d'eau avec la paraffine	36
3.7. Tests de cuisson	41
3.7.1. Sécurité sanitaire des aliments cuits par énergie solaire	42
3.8. Conclusion	42
Conclusion Générale	45
Références	48
Annexe	50

Liste des figures

Figure 1.1: Classification des cuiseurs solaires .	6
Figure 1.2 :Schématique d'un cuiseur solaire à panneaux.	7
Figure 1.3: Schématique d'un cuiseur solaire de type boîte.	7
Figure 1.4: Schématique d'un cuiseur solaire de type boîte.	8
Figure 1.5:Schématique d'un cuiseur solaire à tube.	9
Figure 1.6:Représentation schématique de l'utilisation d'une lentille de Fresnel comme concentrateur.	10
Figure 2.1: Cuiseur solaire a boîte – Modèle Solid Work et de l'URAER	16
Figure 2. 2: Matériaux utilisés pour le stockage dans le cuiseur boîte de l'URAER.	22
Figure 2. 3:Schéma synoptique de la chaîne de mesure.	23
Figure 3.1:Variation des températures mesurées de stagnation correspondant à un éclairement solaire.	28
Figure 3.2 : Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant.	30
Figure3.3 : Variation des températures de stagnation de matière de stockage (pierre) correspondant à un éclairement solaire.	31
Figure 3.4 : Variation des températures de de stagnation de matière de stockage (sable) correspondant à un éclairement solaire.	32
Figure 3.5 : Variation des températures de de stagnation de matière de stockage (paraffine) correspondant à un éclairement solaire.	33
Figure 3.6 : Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de pierre).	34
Figure 3.7 : Variation de températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de sable).	35
Figure 3.8: Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de paraffine).	36
Figure 3.9: les rendements thermiques obtenus avec les matériaux de stockage	38

Figure 3.10: les puissances de cuisson obtenus avec matériaux de stockage thermique.	38
Figure 3. 11: Comparaison des variation de la température du cuiseur solaire sans stockage thermique et avec différents matériaux de stockage .	40
Figure 3.12: Comparaison des variation de la température de l' eau sans stockage thermique et avec différents matériaux de stockage	40
Figure 3.13. Résultats des tests de cuisson en utilisant le cuiseur solaire boîte.	42

Liste des abréviations

Symbole :	Description :	Unité :
F_1	Première figure of merit	m^2C°/W
F_2	Seconde figure of merit	-
T_p	Température de la plaque absorbante	C°
T_a	Température ambiante	C°
T_e	Température de l'eau	C°
GHI	Global Horizontal Irradiance	W/m^2
T	Temp	S
A	Surface du cuiseur	m^2
T_{sable}	Temperature de sable	C°
T_{pierre}	Temperature de la pierre	C°
$T_{paraffine}$	Temperature de la paraffine	C°
DT	Différence de température entre l'eau et l'ambient	C°
C_p	Capacité thermique de l'eau	J/K°
I	Eclairement solaire incident sur une surface horizontale	W/m^2

Liste des tableaux

<i>Tableaux 2.1:</i> Caractéristiques techniques du cuiseur boîte de l'URAER, Ghardaïa.....	17
Tableau 2.2 : Comparaison des matériaux étudiés	22

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie constitue un facteur essentiel du développement économique, industriel et social. Au cours des dernières décennies, la demande mondiale en énergie a connu une croissance continue sous l'effet de l'augmentation de la population, de l'urbanisation et du développement des activités industrielles. Cette évolution s'est traduite par une exploitation intensive des ressources fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, qui demeurent les principales sources d'énergie à l'échelle mondiale. Toutefois, leur utilisation massive est à l'origine de nombreux problèmes environnementaux, notamment les émissions de gaz à effet de serre, la pollution atmosphérique et le réchauffement climatique. Face à ces défis, le recours aux énergies renouvelables s'impose aujourd'hui comme une nécessité afin de garantir un développement énergétique durable et de réduire l'impact environnemental lié à la consommation des combustibles fossiles [1]

Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une place privilégiée en raison de son abondance, de son caractère inépuisable et de sa disponibilité sur une grande partie de la planète. Grâce aux progrès technologiques réalisés au cours des dernières années, elle est aujourd'hui exploitée dans de nombreux domaines, notamment la production d'électricité, le chauffage, le dessalement de l'eau, le séchage agricole et la cuisson solaire. Cette dernière constitue une solution écologique et économique permettant de réduire la consommation des combustibles conventionnels tout en limitant les émissions polluantes. Son développement représente une alternative particulièrement intéressante dans les régions bénéficiant d'un fort potentiel solaire [2]

L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus importants au monde grâce à sa vaste superficie saharienne qui couvre plus de 80 % du territoire national. Les régions du Sud bénéficient d'une irradiation solaire élevée et d'une durée d'ensoleillement pouvant dépasser 3 500 heures par an, ce qui offre des conditions particulièrement favorables au développement des technologies solaires thermiques. Dans ce contexte, les cuiseurs solaires apparaissent comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques des populations tout en réduisant la consommation de gaz butane et de bois de chauffage.

Malgré leurs nombreux avantages, les cuiseurs solaires présentent encore certaines limitations liées essentiellement à la variabilité du rayonnement solaire. La diminution de l'irradiation en fin de journée ou lors des passages nuageux provoque une baisse rapide de la

température à l'intérieur du cuiseur, ce qui réduit son efficacité et limite son utilisation. Afin de remédier à cette contrainte, plusieurs chercheurs se sont orientés vers l'intégration de systèmes de stockage thermique capables d'accumuler l'énergie solaire pendant les périodes de fort ensoleillement et de la restituer progressivement lorsque le rayonnement diminue. Ces systèmes reposent principalement sur le stockage de chaleur sensible ou le stockage de chaleur latente à l'aide de matériaux à changement de phase (PCM), qui permettent d'améliorer la stabilité thermique et de prolonger la durée de cuisson [3]

Dans cette perspective, le présent travail s'intéresse à l'étude expérimentale des performances thermiques d'un cuiseur solaire de type boîte intégrant différents matériaux de stockage thermique. Trois matériaux ont été retenus : le sable, la pierre et la paraffine. Le sable et la pierre représentent des matériaux de stockage sensible largement disponibles, peu coûteux et facilement accessibles, tandis que la paraffine est un matériau à changement de phase reconnu pour sa capacité à stocker une quantité importante de chaleur latente. L'objectif principal de cette étude est de comparer leurs performances thermiques afin de déterminer le matériau le plus approprié pour améliorer le fonctionnement d'un cuiseur solaire dans les conditions climatiques du Sahara algérien.

Pour atteindre cet objectif, une démarche expérimentale a été adoptée. Un cuiseur solaire de type boîte a été conçu et instrumenté afin de mesurer l'évolution des températures en différents points du système lors d'essais réalisés avec chacun des trois matériaux de stockage. Les résultats obtenus permettront d'évaluer l'influence de ces matériaux sur la température maximale atteinte, la stabilité thermique, la durée de maintien de la chaleur ainsi que les performances globales du cuiseur. Cette étude vise également à proposer une solution simple, économique et adaptée aux régions fortement ensoleillées, contribuant ainsi au développement des technologies solaires durables.

Le présent mémoire est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique portant sur l'énergie solaire, les cuiseurs solaires, les technologies de stockage thermique, les matériaux à changement de phase ainsi qu'à une analyse critique des travaux antérieurs. Le deuxième chapitre décrit les matériaux utilisés, le dispositif expérimental, les instruments de mesure et la méthodologie adoptée. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats expérimentaux obtenus, leur analyse, leur discussion ainsi que les principales conclusions et les perspectives de recherche.

Chapitre 1 : État de l'art

1.1 Introduction

L'énergie solaire représente aujourd'hui l'une des ressources renouvelables les plus prometteuses pour répondre aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Grâce à son abondance, son caractère inépuisable et sa disponibilité dans de nombreuses régions du monde, elle constitue une alternative durable aux énergies fossiles. Parmi les applications thermiques de l'énergie solaire, les cuiseurs solaires occupent une place importante puisqu'ils permettent de convertir directement le rayonnement solaire en chaleur destinée à la cuisson des aliments, tout en réduisant la consommation des combustibles conventionnels et les émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, leurs performances restent fortement dépendantes des conditions météorologiques et de la disponibilité du rayonnement solaire.

Afin d'améliorer leur autonomie et leur efficacité thermique, de nombreuses recherches se sont orientées vers l'intégration de systèmes de stockage thermique utilisant des matériaux capables d'accumuler puis de restituer la chaleur. Ces matériaux peuvent fonctionner selon le principe du stockage sensible, comme le sable et la pierre, ou selon le principe du stockage latent à l'aide des matériaux à changement de phase (PCM), tels que la paraffine. Le choix du matériau de stockage influence directement les performances thermiques du cuiseur, notamment la température maximale atteinte, la stabilité thermique et la durée de maintien de la chaleur.

Dans ce chapitre, une étude bibliographique est présentée afin d'exposer les notions fondamentales relatives au contexte énergétique, aux énergies renouvelables, à l'énergie solaire, aux cuiseurs solaires, aux technologies de stockage thermique ainsi qu'aux matériaux de stockage. Une analyse critique des travaux scientifiques récents est également réalisée afin de mettre en évidence les avancées dans ce domaine et de justifier le positionnement de la présente étude.

1.2 Cuiseurs solaires

Le cuiseur solaire est l'une des applications de l'énergie solaire thermique. Il est utilisé pour la cuisson des aliments en exploitant le rayonnement solaire et en le convertissant en énergie thermique, sans recourir aux combustibles fossiles. Son principe de fonctionnement repose sur l'absorption du rayonnement solaire et sa transformation en chaleur, tout en tirant parti de l'effet de serre afin d'atteindre des températures suffisantes pour la cuisson.[1],[4]

1.3 Classification des cuiseurs solaires

Les cuiseurs solaires peuvent être classés selon leur principe de fonctionnement, leur géométrie et leur mode de concentration du rayonnement solaire. Les principaux types sont les cuiseurs à boîte, les cuiseurs paraboliques, les cuiseurs à panneaux, les cuiseurs à tubes sous vide et les cuiseurs de type Scheffler. Chaque technologie présente des caractéristiques particulières en termes de rendement thermique, de coût de fabrication, de simplicité d'utilisation et de domaines d'application.

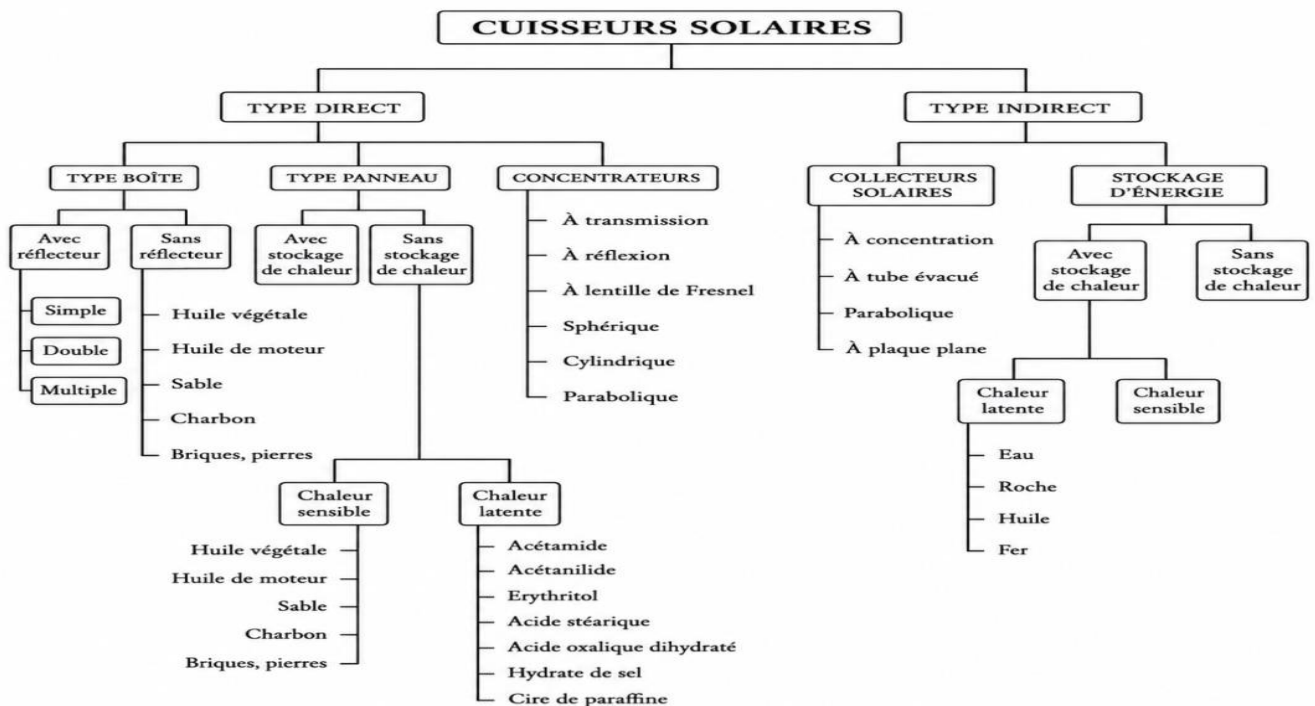


Figure 1.1: Classification des cuiseurs solaires [5].

1.3.1. Les cuiseurs solaires directs

Les cuiseurs solaires directs sont des dispositifs qui exploitent le rayonnement solaire direct pour produire la chaleur nécessaire à la cuisson des aliments, en dirigeant les rayons du soleil directement vers le récipient de cuisson.[6]

1.3.1.1 Les cuiseurs solaires directs à panneaux

Ressemblent à des boîtes ouvertes sur trois côtés, équipées de surfaces réfléchissantes qui dirigent efficacement les rayons du soleil vers le récipient de cuisson. Ces dispositifs offrent les meilleures performances durant les périodes chaudes, lorsque l'effet du vent et les pertes

thermiques sont limités, ce qui améliore leur rendement. Des schémas explicatifs sont souvent utilisés pour illustrer leur principe de fonctionnement.

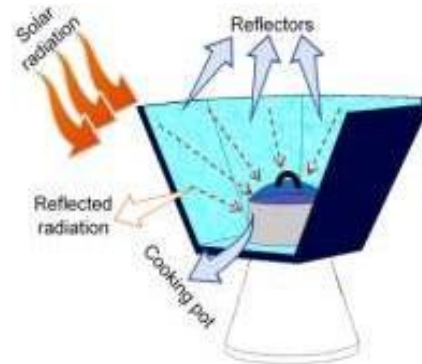


Figure 1.2 :Schématique d'un cuiseur solaire à panneaux.

1.3.1.2 Les cuiseurs solaires à boîte

Les cuiseurs solaires à boîte figurent parmi les modèles les plus répandus. Ils se composent d'un caisson isolé muni d'un couvercle transparent, généralement en verre ou en plastique, permettant le passage du rayonnement solaire. L'intérieur est souvent peint en noir afin d'optimiser l'absorption de l'énergie solaire, tandis que l'isolation thermique réduit les pertes de chaleur. La température à l'intérieur de ces cuiseurs varie généralement entre 120 et 130 °C, ce qui les rend particulièrement adaptés aux modes de cuisson nécessitant de l'eau.

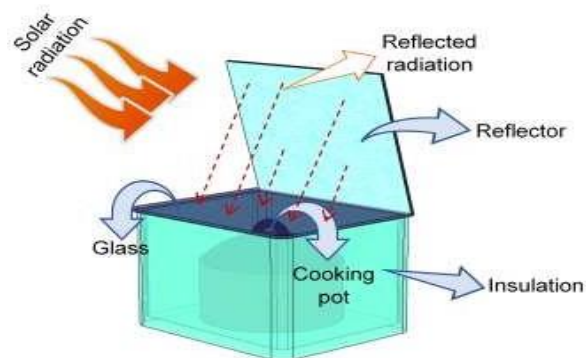


Figure1.3: Schématique d'un cuiseur solaire de type boîte.

1.3.1.3 Les cuiseurs solaires paraboliques

Le cuiseur solaire parabolique est constitué d'un réflecteur en forme de parabole, d'un récipient de cuisson placé au point focal, ainsi que d'une structure de support. Cette configuration permet de concentrer fortement les rayons solaires en un point précis. Les modèles avancés, tout comme les cuiseurs à tubes sous vide, peuvent atteindre des températures élevées, permettant diverses techniques de cuisson telles que le grillage, la friture, la préparation de soupes, la cuisson du pain et l'ébullition de l'eau en un temps réduit.

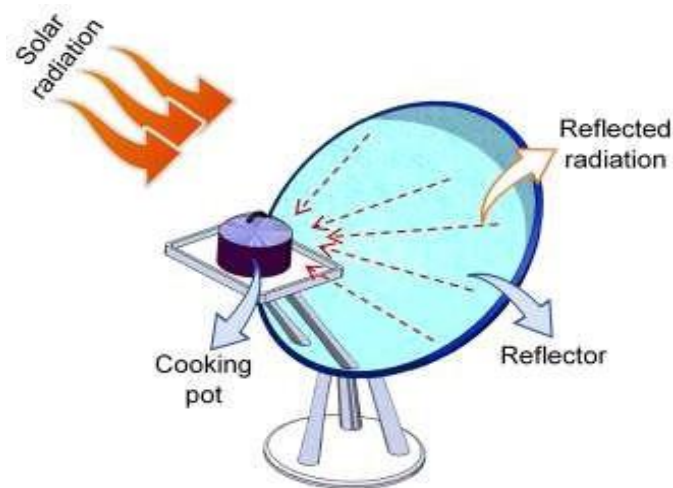


Figure 1.4: Schématique d'un cuiseur solaire de type boîte.

1.3.1.4 Les cuiseurs à tubes

Les cuiseurs à tubes reposent sur l'utilisation de tubes conçus pour capter et transformer le rayonnement solaire en chaleur. Leur conception est souvent de type parabolique afin de concentrer l'énergie vers le récipient. Ils peuvent atteindre des températures avoisinant les 200 °C, ce qui les rend adaptés à la cuisson au four, au rôtiage et à la friture.

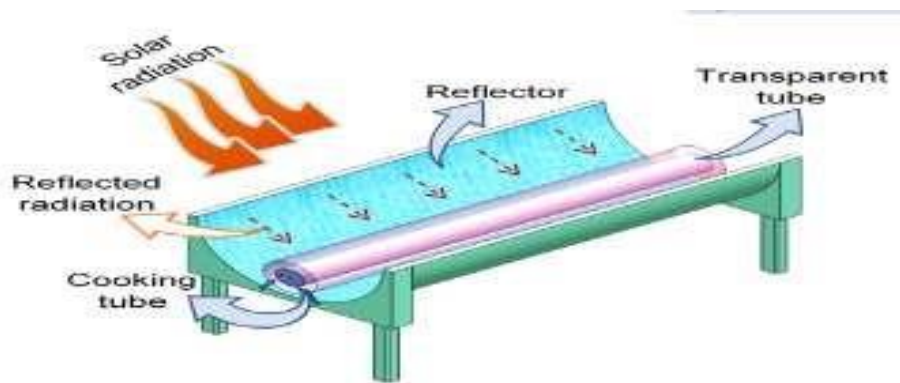


Figure 1.5: Schématique d'un cuiseur solaire à tube.

1.4 Les cuiseurs solaires indirects

Les cuiseurs solaires indirects fonctionnent à l'aide d'un fluide caloporteur qui transfère la chaleur du capteur solaire vers l'unité de cuisson. Parmi ces systèmes figurent ceux utilisant des tubes sous vide, qui convertissent efficacement le rayonnement solaire en énergie thermique grâce à leurs couches absorbantes. Certains modèles concentrent également le rayonnement vers un tube ou une chambre de cuisson.

Ce type de cuiseur représente une approche innovante, car il sépare la collecte de l'énergie solaire de la zone de cuisson. Cette séparation protège les ustensiles de l'exposition directe au rayonnement et offre une plus grande flexibilité dans l'emplacement de l'unité de cuisson. En plus des systèmes à tubes sous vide, des capteurs plans peuvent également être intégrés.

Le capteur solaire constitue un élément clé de ces dispositifs : il capte l'énergie solaire et la transforme en chaleur, ensuite transportée vers le récipient via un fluide caloporteur. Une pompe est souvent utilisée pour assurer la circulation du fluide, notamment lorsque le capteur est situé à une hauteur supérieure à la zone de cuisson. Le processus peut être contrôlé manuellement à l'aide d'une vanne régulant le débit du fluide, soit pour une utilisation immédiate, soit pour un stockage dans un réservoir thermique en vue d'un usage ultérieur.

1.4.1 Les cuiseurs solaires à lentille de Fresnel

Une lentille de Fresnel est un type de lentille compacte constituée d'une série d'anneaux concentriques gradués. Contrairement aux lentilles traditionnelles, qui sont formées d'un bloc

massif de matériau, la lentille de Fresnel est fabriquée à partir de plastique ou de verre léger et comporte une succession de prismes sur l'une de ses faces. Cette conception permet d'obtenir une structure plus fine et plus légère tout en conservant des propriétés optiques similaires.

Les lentilles de Fresnel sont largement utilisées dans plusieurs domaines, notamment dans les phares maritimes, les projecteurs et les systèmes solaires, où elles servent à concentrer et intensifier la lumière. Dans le domaine des cuiseurs solaires, elles constituent une solution efficace pour améliorer la concentration du rayonnement solaire.

Afin de surmonter les problèmes liés à la taille et au faible rendement, Zhao et al. (2018) ont conçu un cuiseur solaire portable innovant utilisant une lentille de Fresnel courbée. Ce dispositif représente une solution prometteuse pour la cuisson en extérieur, en combinant portabilité et amélioration des performances.

Par ailleurs, une autre étude a proposé un cuiseur solaire à lentille de Fresnel à foyer fixe, équipé d'un récepteur à cavité conique et d'un réflecteur conique inférieur. Cette conception optimisée a permis d'augmenter l'efficacité optique grâce à une meilleure réflectivité et une capacité d'absorption accrue, offrant ainsi des perspectives intéressantes pour l'amélioration future de ces systèmes .

Ainsi, les cuiseurs solaires utilisant des lentilles de Fresnel figurent parmi les configurations les plus couramment adoptées, en raison des avantages qu'ils offrent en termes de performance et de praticité. Un schéma illustratif de l'utilisation de la lentille de Fresnel comme dispositif de concentration est généralement présenté pour mieux comprendre leur fonctionnement.[6]

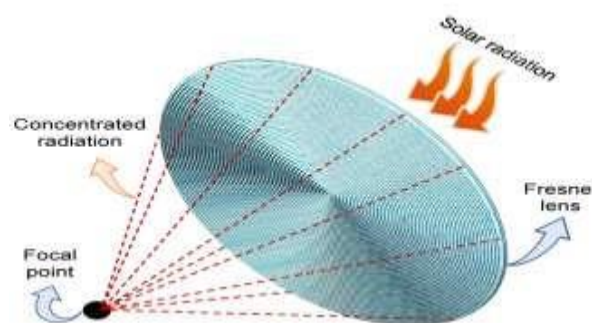


Figure 1.6:Représentation schématique de l'utilisation d'une lentille de Fresnel comme concentrateur.[6]

1.5 Les cuiseurs solaires sans système de stockage

Les cuiseurs solaires sont classés en deux catégories principales : directs et indirects, selon le mode de transfert de chaleur vers le récipient de cuisson. Les cuiseurs directs utilisent le rayonnement solaire de manière immédiate pour chauffer les aliments, tandis que les cuiseurs indirects emploient un fluide caloporteur pour transférer la chaleur du capteur solaire vers l'unité de cuisson [6].

1.6 Les cuiseurs solaires avec stockage

Le stockage de l'énergie thermique devient essentiel en cas de déséquilibre entre la disponibilité et la consommation d'énergie. Ainsi, certains cuiseurs solaires sont équipés de matériaux de stockage thermique permettant d'accumuler la chaleur pour une utilisation ultérieure, notamment lors des périodes de faible ensoleillement ou de couverture nuageuse. L'énergie thermique peut être stockée sous forme de variation de l'énergie interne d'un matériau, sous forme de chaleur sensible, de chaleur latente, d'énergie thermo-chimique, ou encore d'une combinaison de ces différentes formes.

Le stockage thermique permet de conserver la chaleur pour une utilisation ultérieure, notamment en l'absence de soleil.

Le stockage thermique joue un rôle essentiel dans l'amélioration des performances des cuiseurs solaires en permettant [7]:

- Une meilleure stabilité thermique
- Une prolongation du temps de cuisson
- Une réduction des pertes d'énergie

1.7 Avantages et inconvénients des cuiseurs solaires

Les défis entravant la diffusion des cuiseurs solaires et les stratégies pour favoriser leur adoption :

Malgré les avantages environnementaux et économiques qu'offrent les cuiseurs solaires, leur diffusion reste encore limitée en raison de plusieurs contraintes interdépendantes. Parmi les plus importantes figure la dépendance de leur efficacité aux conditions géographiques

et climatiques, telles que la latitude et la couverture nuageuse, ce qui réduit leurs performances dans les régions à faible ensoleillement.

Par ailleurs, certaines conceptions de cuiseurs solaires rendent difficile l'intervention durant la cuisson, limitant ainsi la diversité des méthodes culinaires par rapport aux techniques traditionnelles. De plus, leur dépendance directe au rayonnement solaire les rend vulnérables aux variations météorologiques, ce qui affecte la continuité et la fiabilité du processus de cuisson.

D'un autre côté, les habitudes sociales et culturelles jouent un rôle déterminant. De nombreux ménages préfèrent cuisiner individuellement à domicile, alors que certains cuiseurs solaires sont conçus pour des usages collectifs ou à grande échelle. En outre, la nécessité de disposer d'un espace extérieur adéquatement exposé au soleil constitue une contrainte supplémentaire, notamment en milieu urbain où l'espace est limité.[6]

Le coût initial relativement élevé des cuiseurs solaires représente également un obstacle majeur, en particulier pour les ménages à faible revenu. À cela s'ajoute, dans certains cas, la nécessité d'utiliser des ustensiles spécifiques capables de résister à des températures élevées. De plus, les différences culturelles et les pratiques culinaires traditionnelles peuvent engendrer une certaine réticence à adopter cette technologie.

Afin de promouvoir l'adoption des cuiseurs solaires, une approche intégrée s'impose, reposant sur plusieurs axes complémentaires. Le premier consiste à renforcer la sensibilisation et l'éducation en mettant en avant les bénéfices de cette technologie, à travers des démonstrations pratiques et des programmes éducatifs intégrés aux secteurs de l'énergie, de l'environnement et de la santé. Le deuxième axe concerne l'amélioration continue de la conception et des performances, en adaptant les modèles aux besoins des utilisateurs et aux conditions locales. Enfin, le troisième axe vise à améliorer l'accessibilité économique, grâce au soutien à la production et à la distribution, ainsi qu'à la mise en place d'incitations financières et à l'implication des acteurs publics et privés.

Ainsi, les cuiseurs solaires peuvent devenir une solution durable et largement adoptée, reposant sur une source d'énergie propre et renouvelable, contribuant à l'amélioration de la qualité de vie et à la réduction des impacts environnementaux.

Avantages :

- Énergie gratuite et renouvelable
- Réduction de la pollution
- Faible coût d'exploitation

Limites :

- Dépendance aux conditions climatiques
- Temps de cuisson plus long
- Difficulté d'utilisation dans certaines situations

1.8 conclusion

Ce premier chapitre a présenté une étude bibliographique portant sur l'énergie solaire et les technologies de cuisson solaire. Il a mis en évidence l'importance des énergies renouvelables ainsi que le fort potentiel solaire de l'Algérie, en particulier dans les régions sahariennes. Les différents types de cuiseurs solaires et les techniques de stockage thermique ont également été abordés, avec une analyse des propriétés du sable, de la pierre et de la paraffine en tant que matériaux de stockage thermique. La revue de la littérature montre que l'intégration d'un matériau de stockage améliore les performances thermiques des cuiseurs solaires. Toutefois, le nombre limité d'études comparatives entre ces matériaux justifie la réalisation de la présente recherche. Le chapitre suivant est consacré à la présentation du dispositif expérimental, des matériaux utilisés et de la méthodologie adoptée.

CHAPITRE 2 : Matériels et méthodes expérimentales

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à l'étude théorique et expérimentale du cuiseur solaire de type boîte intégrant un système de stockage thermique. L'objectif principal est d'analyser les échanges de chaleur au sein du système, d'établir un bilan thermique et d'évaluer ses performances. Cette étude repose sur la compréhension des différents modes de transfert thermique (conduction, convection et rayonnement), ainsi que sur l'identification des sources de gains et de pertes de chaleur.

2.2 Présentation du site étudié (site de Ghardaïa)

Le site de Ghardaïa est situé au centre de l'Algérie, à environ 600 km au sud de la capitale Alger, aux coordonnées géographiques de 32,39° de latitude Nord et 3,78° de longitude Est, avec une altitude d'environ 463 m au-dessus du niveau de la mer. Cette région se caractérise par un climat désertique aride. Elle est limitée au nord par la wilaya de Laghouat, à l'est par la wilaya de Ouargla, au sud-ouest par la wilaya d'Adrar et à l'ouest par la wilaya d'El Bayadh.

En 2002, une structure scientifique spécialisée a été implantée sur ce site par le ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Il s'agit de Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, affiliée au Centre de Développement des Energies Renouvelables, dont les activités portent sur le domaine des énergies renouvelables et leurs applications.

La caractérisation du site repose sur l'analyse de plusieurs paramètres météorologiques et radiométriques, notamment les précipitations, la température ambiante, l'humidité relative et la vitesse du vent. Le climat de Ghardaïa est de type saharien, avec une pluviométrie annuelle moyenne d'environ 67,37 mm. Le nombre moyen de jours de pluie varie entre 20 et 30 jours par an.

Concernant le régime des vents, les vitesses moyennes annuelles sont comprises entre 3,1 et 4,4 m/s, mesurées à une hauteur de 10 m au-dessus du sol. Les températures maximales moyennes mensuelles varient de 14,9 °C en janvier à 43,2 °C en juillet, tandis que les températures minimales moyennes mensuelles évoluent de 3,4 °C à 29,5 °C pour les mêmes périodes. De manière générale, les températures moyennes mensuelles oscillent entre 9 °C en hiver et 36,5 °C en été, avec une moyenne annuelle estimée à 22,6 °C.[8]

2.3 Description du cuiseur solaire étudié

Le cuiseur solaire de type boîte est constitué d'une enceinte fermée, généralement de forme rectangulaire, conçue pour capter et retenir l'énergie solaire.

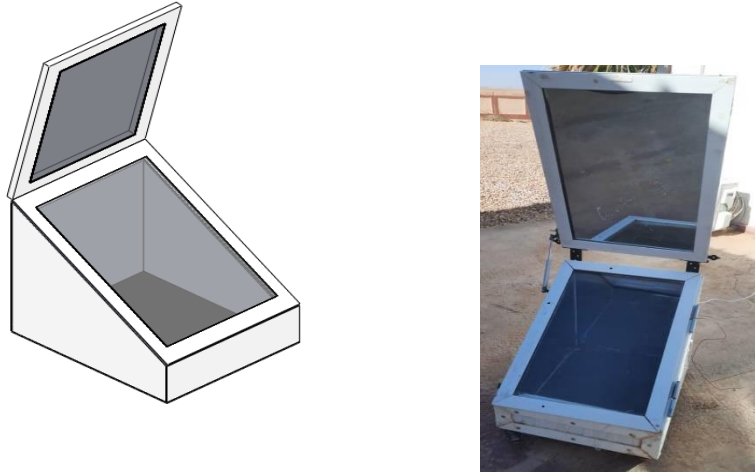


Figure 2.1: Cuiseur solaire a boîte – Modèle Solid Work et de l'URAER.

Les spécifications techniques du cuiseur boîte à surface réceptrice inclinée réalisé à Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa sont représentées sur la tableaux suivante :

Tableaux 2.1: Caractéristiques techniques du cuiseur boîte de l'URAER, Ghardaïa

<u>Dimensions du cuiseur</u> Boîte de cuisson Dimensions globales de la boîte Surface du cuiseur	500 mm × 400 mm × 445 mm × 125 mm 550 mm × 450 mm × 495 mm × 175 mm 0.20 m ² (A _{sc})
<u>Dimensions des réflecteurs</u> Miroir réflecteur Dimensions globales d'un réflecteur Surface réflecteur	594 mm × 400 mm 640 mm × 450 mm 0.21 m ² (A _r)
<u>Plaque absorbante</u> Matériau de l'absorbeur Emissivité de l'absorbeur Absorptivité de l'absorbeur Surface de l'absorbeur	Aluminium 0.9 (ε _p) 0.93 (α _p) 0.20 m ² (A _p)
<u>Vitrage</u> Epaisseur du vitrage Emissivité du vitrage Surface de la vitre	3 mm 0.85 (ε _v) 0.21 m ² (A _v)
<u>Isolation</u> Matériau de l'isolant Epaisseur de l'isolant Conductivité thermique	Laine de verre (Glass wool) 30 mm 0.04 W/m ² /K (κ _{gw})
<u>Ustensile de cuisson</u> Matériau de l'ustensile Dimensions de l'ustensile Surface de l'ustensile	Aluminium 180 mm × 100 mm 0.025 m ² (A _u)
<u>Matériau utilisé pour la boîte extérieur</u>	Bois (Wood)

<u>Caractéristique de l'eau à chauffer</u>	4185 J kg ⁻¹ °C ⁻¹
--	--

2.4 Les normes BIS (Bureau of Indian Standards) :

constituent un ensemble de procédures normalisées utilisées pour évaluer les performances thermiques des cuiseurs solaires de type boîte. Elles définissent les conditions expérimentales de mesure afin de garantir des résultats fiables et comparables entre différents modèles de cuiseurs solaires.

Selon ces normes, les essais sont réalisés sous des conditions météorologiques bien définies, notamment un rayonnement solaire élevé et stable, un ciel dégagé et une vitesse du vent limitée. Les performances du cuiseur sont évaluées à l'aide de deux facteurs de mérite :

Le premier facteur de mérite (F_1), qui caractérise les performances thermiques du cuiseur en condition de stagnation (sans charge). Il reflète principalement la qualité de l'isolation thermique et les pertes de chaleur vers l'environnement.

Le second facteur de mérite (F_2), qui évalue les performances du cuiseur en condition de cuisson (avec charge). Il représente l'efficacité du transfert de chaleur entre la plaque absorbante et le récipient contenant l'eau ou les aliments.

Ces deux paramètres permettent de comparer objectivement les performances des différents cuiseurs solaires et de vérifier leur conformité aux exigences des normes internationales.[9]

2.5 Hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses suivantes sont considérées :

- Le système fonctionne en régime quasi-stationnaire
- La température est uniforme à l'intérieur du cuiseur
- Les propriétés thermiques des matériaux sont constantes
- Les pertes latérales sont négligeables ou faibles
- Le rayonnement solaire est uniforme

2.6 Paramètres caractéristiques du cuiseur

2.6.1 Détermination du paramètre ‘First figure of merit’

Selon le BIS et Mullick et al. , le test de stagnation sur un cuiseur solaire de type boîte est mené pour l'évaluation de la première figure of merit F_1 , qui est définie comme le rapport entre le rendement optique η_0 et le coefficient global de pertes thermiques U_L . Pour déterminer la première figure of merit, le cuiseur solaire de type boîte; sans aucune charge, doit être exposée à l'éclairement solaire, permettant à la température de la plaque d'augmenter progressivement. A l'instant de stagnation, l'intensité de l'éclairement solaire global, la température de la plaque, la température ambiante et la vitesse du vent seront relevés à un intervalle de temps fixe. Expérimentalement, F_1 est une mesure de la différence de température gagnée par la plaque absorbante à un stade particulier de l'éclairement solaire; elle est donnée par la relation suivante [11],[10] :

$$F_1 = \frac{\eta_o}{U_L} = \frac{T_{ps} - T_{as}}{I_s} \quad (2.1)$$

Où η_0 et U_L sont respectivement le rendement optique et le coefficient global de pertes thermiques du cuiseur. T_{ps} , T_{as} et I_s sont la température de l'absorbeur, la température ambiante et l'éclairement solaire incident sur une surface horizontale, respectivement au moment de stagnation.

2.6.2 Détermination du paramètre ‘Second figure of merit’

La seconde figure of merit F_2 est dérivée du test de chaleur sensible sous des conditions de pleine charge. Ce test nous donne des indications concernant le transfert de chaleur entre l'absorbeur du cuiseur boîte et l'eau à chauffer à l'intérieur de l'ustensile de cuisson. Pour déterminer la seconde figure of merit F_2 , le cuiseur sans réflecteur doit être chargé avec une quantité d'eau bien connue, soit 8 kg/m² de surface d'ouverture qui doivent être répartis de manière égale dans tous les ustensiles. La température de l'eau doit être ensuite laissée pour augmenter progressivement jusqu'à atteindre le point d'ébullition. La seconde figure of merit F_2 est obtenue en utilisant la relation suivante [10] , [11] :

$$F_2 = \frac{F_1 (mc_p)_w}{A_{sc} \tau} \ln \left[\frac{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wi} - \overline{T_a}}{\overline{I_s}} \right)}{1 - \frac{1}{F_1} \left(\frac{T_{wf} - \overline{T_a}}{\overline{I_s}} \right)} \right] \quad (2.2)$$

Avec: A_{sc} : La surface d'ouverture du cuiseur solaire boîte;

$(mc_p)_w$: La capacité thermique de l'eau dans le récipient de cuisson, mw: masse ou quantité d'eau;

τ : L'intervalle de temps pendant lequel la température de l'eau augmente de T_{wi} à T_{wf} ;

T_{wi} : La température initiale de l'eau (60 °C);

T_{wf} : La température finale de l'eau (90 °C);

$\overline{T_a}$: La température ambiante moyenne;

$\overline{I_s}$: L'éclairement solaire moyen reçu par une surface horizontale.

2.6.3 Calcul de la puissance de cuisson

Les performances thermiques des cuiseurs solaires peuvent être également évaluées selon la procédure du Standard International développé par Funk [13]. Selon ce Standard, la puissance de cuisson P du cuiseur solaire peut être calculée quand une masse d'eau bien déterminée est maintenue à l'intérieur de l'ustensile de cuisson et le cuiseur solaire est mis en service selon certaines conditions décrites dans le Standard de Funk [13]. Et comme l'eau va se réchauffer durant le fonctionnement, sa température moyenne est surveillée et relevée pendant une durée de temps de 10 min durant un intervalle particulier ($\Delta t = 600$ s). Quand la température de l'eau atteint les 95 °C ou quand 4 heures de temps sont écoulés du début du test, l'expérimentation est arrêtée (l'une ou l'autre des deux conditions est satisfaite). La puissance moyenne délivrée durant cet intervalle est exprimée par la formule suivante :

$$P = \frac{(mc_p)_e (T_{e2} - T_{e1})}{\Delta t} \quad (2.3)$$

2.6.4 Détermination du rendement thermique

La première loi de la thermodynamique, donne le rendement énergétique (η) comme étant le rapport entre l'énergie de sortie (E_o) par rapport à l'énergie d'entrée (E_i). Le rendement énergétique d'un cuiseur solaire boîte est calculé en utilisant [15],[14]

l'équation (4) ci-dessous:

$$\eta = \frac{E_o}{E_i} = \frac{(mc_p)_w \cdot (T_{wf} - T_{wi})}{I_s \cdot \Delta t \cdot A_{sc}} \quad (2.4)$$

2.7 Matériaux utilisés pour le stockage de l'énergie thermique



Stone



paraffine



Sand

Figure 1. 2: Matériaux utilisés pour le stockage dans le cuiseur boîte de l'URAER.

Tableau 2.2 : Comparaison des matériaux étudiés

Propriété	Sable	Pierre	Paraffine
Type de stockage	Sensible	Sensible	Latent
Coût	Très faible	Faible	Moyen
Disponibilité	Très élevée	Élevée	Moyenne
Conductivité thermique	Faible	Moyenne	Faible
Densité énergétique	Moyenne	Moyenne	Élevée
Température quasi constante	Non	Non	Oui
Durée de stockage	Moyenne	Bonne	Très bonne

Le sable et la pierre sont particulièrement intéressants pour leur faible coût et leur disponibilité, tandis que la paraffine se distingue par sa capacité à maintenir une température presque constante durant le changement de phase, ce qui améliore la stabilité thermique du système.

Cette comparaison justifie le choix de ces trois matériaux dans la présente étude expérimentale.

2.8 Rôle du stockage thermique

Le stockage thermique joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances du cuiseur solaire. Un matériau de stockage absorbe une partie de la chaleur pendant les périodes d'ensoleillement, puis la restitue progressivement lorsque l'intensité du rayonnement solaire diminue.

Cela permet :

- La stabilité de la température

- La prolongation de la durée de cuisson

- L'amélioration du rendement global

2.9 Instruments de mesure utilisés

La figure 2.4 illustre le schéma général de la chaîne de mesure adoptée dans cette étude, comprenant un ensemble de capteurs et d'appareils utilisés pour le suivi des performances thermiques du cuiseur solaire ainsi que pour la mesure des différents paramètres climatiques.

Cette installation est principalement constituée de plusieurs thermocouples de type K, implantés à différents endroits du cuiseur solaire afin d'assurer une mesure précise des températures. Des capteurs supplémentaires ont également été utilisés pour mesurer certains paramètres climatiques, tels que la température ambiante, l'éclairement solaire et la vitesse du vent.

L'ensemble des instruments de mesure est relié à une unité d'acquisition de données de type Agilent 34972A, connectée à son tour à un micro-ordinateur via un port USB. Cette configuration permet un transfert et un enregistrement efficaces des données tout en réduisant la complexité du câblage.

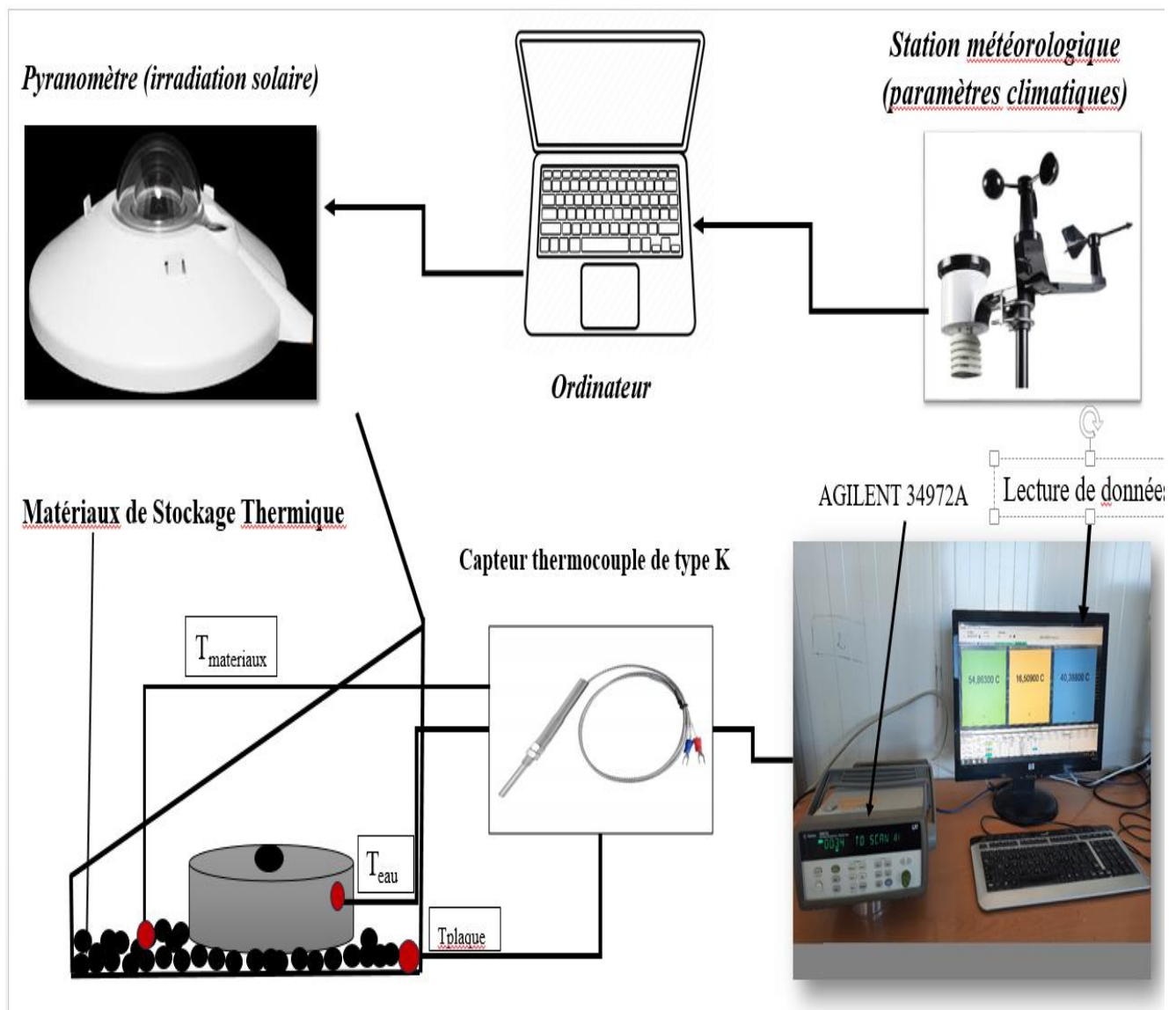


Figure 2. 3:Schéma synoptique de la chaîne de mesure.



Pyranometer [16]



Station météorologique [17]



Agilent 34972a [18]



Thermocouple type k[19]

Conclusion

La modélisation théorique permet d'évaluer les performances du cuiseur solaire, car elle constitue une méthode précise pour déterminer les différents paramètres influençant son fonctionnement. Les équations physiques et les modèles mathématiques permettent également d'optimiser les conceptions existantes des cuiseurs solaires, conduisant ainsi au développement de solutions plus performantes et plus efficaces.

Chapitre 3 : Résultats expérimentaux et discussions

3.1. Introduction

Dans ce chapitre, les résultats de l'évaluation des performances d'un système de cuisson solaire sans stockage thermique et avec stockage thermique en utilisant différents matériaux de stockage thermique, notamment le sable, la pierre et la paraffine (PCM), ainsi que la comparaison des résultats obtenus et l'identification du matériau de stockage le plus performant. L'analyse expérimentale repose sur la mesure des températures pendant la période d'ensoleillement ainsi qu'après la couche de soleil. Cette démarche permet d'analyser l'influence de chaque matériau sur l'efficacité thermique du système, la stabilité de la température et la capacité de stockage et de restitution de l'énergie thermique.

3.2. Méthode et procédure expérimentale

Les essais expérimentaux ont été réalisés au cours des mois de mars et d'avril 2026 afin d'évaluer les performances thermiques d'un cuiseur solaire avec et sans matériaux de stockage thermique. Une quantité de 2 kg de sable et de pierre ainsi que 2 kg de paraffine a été conditionnée dans de petites boîtes en aluminium et placée sur une plaque absorbante.

Les profils de température du cuiseur solaire à boîte mesurés expérimentalement et relevés à l'extérieur (en plein air) pour évaluer les performances du système de cuisson solaire peuvent être classés, selon les conditions des tests, en trois catégories : les tests sans charge et avec charge d'eau, les tests avec des matériaux de stockage, et les tests avec charge d'eau avec des matériaux de stockage. Pour l'ensemble des tests, les cuiseurs solaires sont restés fermés. De l'orientate, le cuiseur est réalisé toutes les 10 min avec un ajustement, étant donné que le cuiseur solaire est exposé au rayonnement solaire entre 10 h et 15 h (charge phase). Le cuiseur solaire a été fermé à 15 h 00 afin de commencer la phase de décharge jusqu'en soirée. De plus, des mesures de température ont été effectuées pendant le rayonnement solaire (phase de charge) et la phase de décharge.

Les observations expérimentales prises en considération :

- Maximum temperature
- La rétention de la chaleur
- Temp d'ébullition
- Diminution de rayonnement solaire
- Après couche de soleil

3.3. Tests de cuiseur solaire sans stockage thermique

3.3.1. Test sans charge d'eau (stagnation)

Ce test est réalisé afin de déterminer la première figure de mérite F_1 . Le cuiseur équipé d'un réflecteur et sans récipient est exposé au rayonnement solaire entre 10 h et 15 h. Les températures des plaques absorbantes (T_p) ont été enregistrées à chaque intervalle de 10 minutes jusqu'à atteindre l'état de stagnation. Les valeurs de l'intensité de l'éclairement solaire (I) et de la température ambiante (T_a) ont également été mesurées. Les résultats de ce test sont présentés sur la courbe de la figure (3.1), obtenue dans des conditions de test de stagnation lors d'une journée printanière.

La figure (3.1) illustre les variations de l'éclairement solaire global, ainsi que les variations de la température ambiante et de celle de la plaque de l'absorbeur de cuiseur, dans le cadre du test sans charge et avec réflecteur. Il est évident que, durant le jour de test choisi, l'intensité de l'éclairement solaire croît au fil du temps pour atteindre son pic aux alentours de 13 h (heure solaire). La température maximale atteinte par la plaque absorbante est de 124,5 °C à 12 h 50 sous un rayonnement solaire et une température ambiante de 883,3 W/m² et 26,9 °C et après le pic, le rayonnement solaire et la plaque absorbante diminuent progressivement jusqu'à 742,3 W/m² et 114 °C à 15 h 00. Suivant le test expérimental sur le cuiseur solaire, nous avons calculé la première figure of merit, $F_1 = 0.11 \text{ m}^2 \cdot \text{°C/W}$ à partir de l'équation (2.1). Ces valeurs sont en parfaite concordance avec les valeurs recommandées par les Normes BIS pour les cuiseurs solaires boîtes. À partir de ces résultats, il est clair que le cuiseur solaire boîte à une valeur de la première figure of merit F_1 et donc il présente une bonne performance.

En cas de coucher du soleil, il a été observé que la température de la plaque absorbante diminuait progressivement après 15 h 00, atteignant 40 °C à 18 h 50. En conséquence, le cuiseur solaire maintient la chaleur pendant 3 heures et 50 minutes.

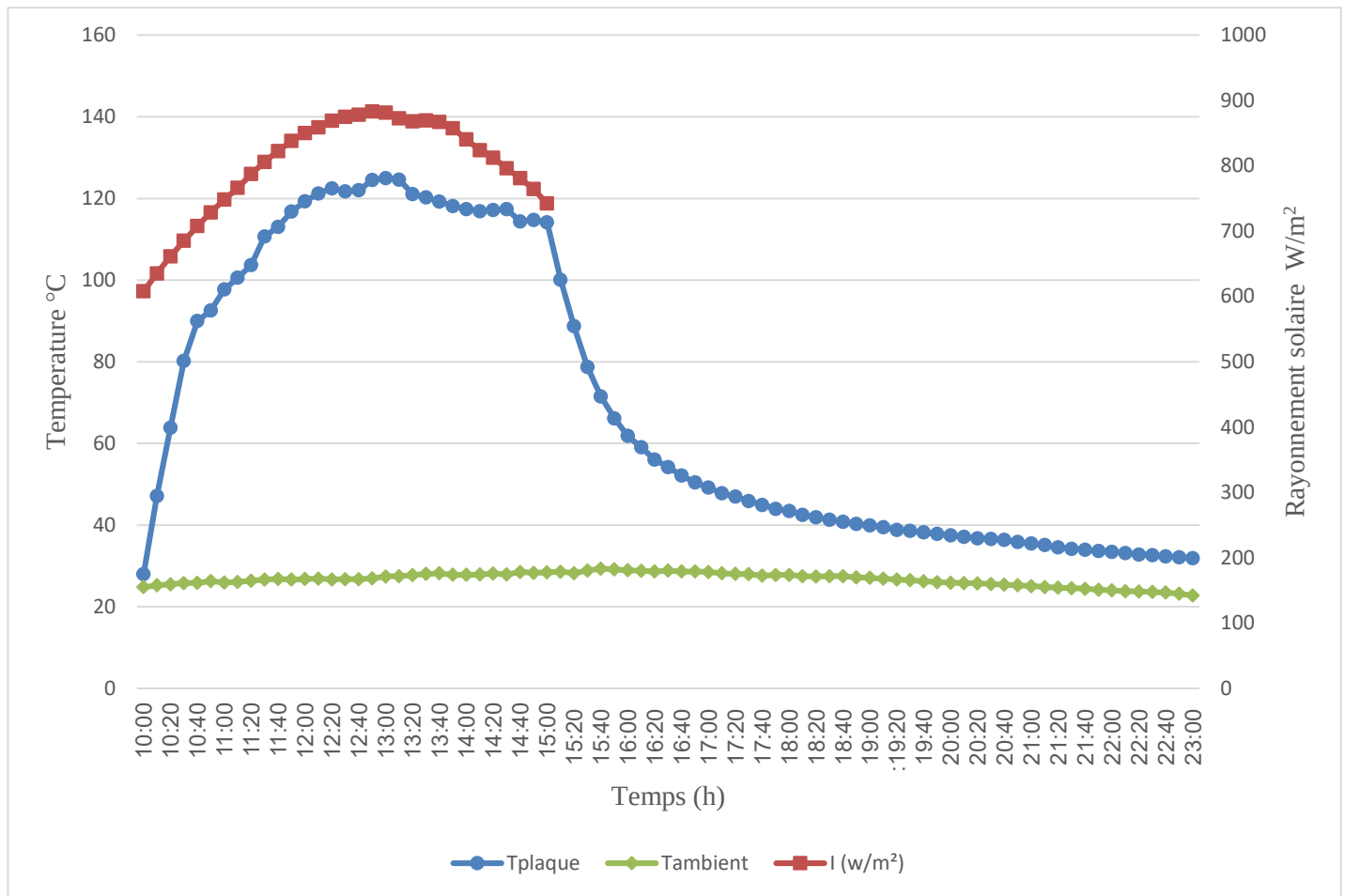


Figure 3.1: Variation des températures mesurées de stagnation correspondant à un éclairement solaire.

3.3.2. Test avec charge d'eau

Ce test a été réalisé afin de déterminer la seconde figure de mérite (F_2) du cuiseur solaire. L'essai a été effectué en chargeant le cuiseur avec 1,5 kg d'eau, conformément aux exigences de la norme BIS, qui recommande un rayonnement solaire global supérieur ou égal à 600 W/m² pendant toute la durée de l'essai (de 10 h à 15 h). Les températures de l'eau, de l'air ambiant ainsi que l'intensité du rayonnement solaire ont été enregistrées à intervalles réguliers.

La figure (3.2) présente l'évolution de la température de l'eau, de la température ambiante et du rayonnement solaire global en fonction du temps. Au début de l'essai, la température de l'eau augmente progressivement sous l'effet de l'énergie solaire captée par le cuiseur. Cette augmentation devient plus marquée entre 10 h 30 et 13 h 00, période durant laquelle le rayonnement solaire atteint des valeurs élevées, avoisinant 900 W/m².

La température de l'eau atteint 97,9 °C vers 13 h 00, correspondant pratiquement au point d'ébullition dans les conditions expérimentales, après environ 180 minutes d'exposition solaire. À cet instant, le rayonnement solaire était de 897,2 W/m², tandis que la température ambiante était de 27,3 °C. Cette évolution montre que le cuiseur solaire est capable de fournir une puissance thermique suffisante pour porter rapidement l'eau à ébullition, ce qui traduit une bonne efficacité de conversion de l'énergie solaire en chaleur utile.

La seconde figure de mérite a été calculée à partir de l'équation (2.2) en utilisant les paramètres expérimentaux suivants : $F_1 = 0,11 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, $m = 1,5 \text{ kg}$, $C_p = 4200 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$, $A_{sc} = 0,21 \text{ m}^2$, $t = 90 \text{ min}$ (5400 s), $T_1 = 64 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_2 = 94 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_a = 26,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $I = 838,1 \text{ W/m}^2$. La valeur obtenue est $F_2 = 0,49$.

Cette valeur relativement élevée de F_2 traduit une bonne capacité du cuiseur solaire à transférer la chaleur de l'absorbeur vers la charge thermique (l'eau). Elle indique que les pertes thermiques restent limitées durant la phase de chauffage et que l'énergie solaire captée est efficacement utilisée pour élever la température de l'eau. Ces résultats confirment ainsi les bonnes performances thermiques du cuiseur solaire testé.

Après 15 h 00, lorsque le rayonnement solaire devient insuffisant, la température de l'eau diminue progressivement en raison des pertes de chaleur par conduction, convection et rayonnement vers le milieu extérieur. Malgré cette diminution, l'eau conserve une température relativement élevée pendant plusieurs heures et atteint environ 40 °C vers 19 h 20 min. Cette évolution met en évidence la bonne inertie thermique du cuiseur ainsi que sa capacité à conserver la chaleur pendant environ 4 h 20 min après la fin de l'ensoleillement, ce qui constitue un avantage pour les applications de cuisson et de maintien au chaud des aliments.

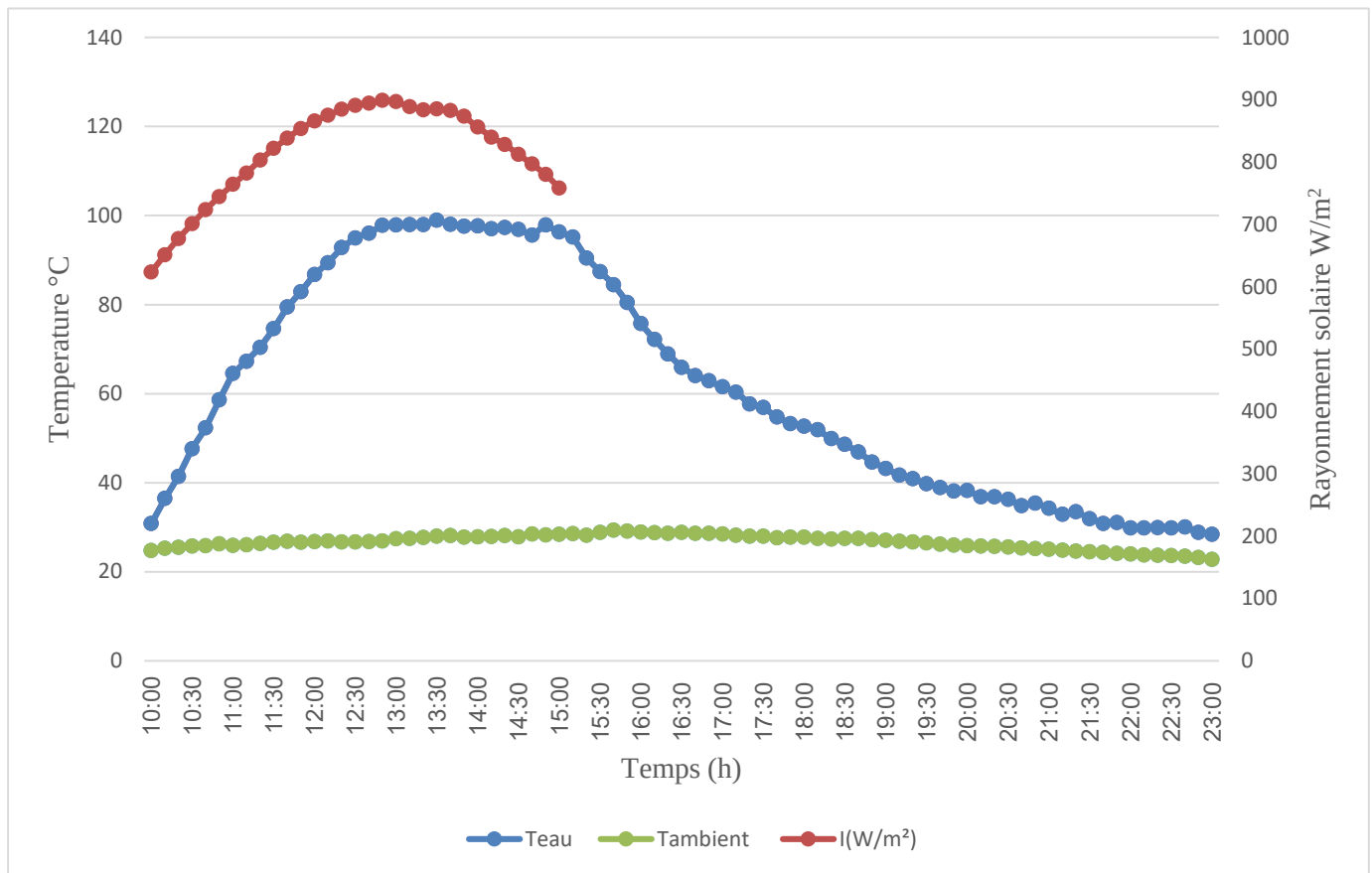


Figure 3.2 : Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant.

3.4. Les tests expérimentaux du cuiseur solaire boîte avec différents matériaux de stockage thermique

3.4.1 Test sans charge d'eau et avec matériaux de stockage thermique

Ces tests sont effectués pour déterminer l'effet des matériaux de stockage sur les performances du cuiseur solaire boîte. Ainsi, des tests sont réalisés pendant plusieurs jours clairs, le cuiseur est chargé avec des matériaux de stockage (sable, pierre et paraffine) considérés comme étant de la même quantité sur une plaque absorbante exposée au rayonnement solaire. Les données suivantes ont été relevées à un intervalle régulier de 10 minutes : la température de la matière de stockage, la température ambiante (T_a) et l'éclairement solaire (I) pour chaque test. Les profils thermiques des différentes températures relevées sont représentés sur les figures (3.3), (3.4), (3.5), obtenues durant trois jours typiques printaniers.

3.4.1.1. Test de stagnation de matière de stockage (pierre)

À partir de la figure (3.3), au pic de rayonnement solaire de 854 W/m², la pierre atteint 143,4 °C à 13 h 20. La température maximale de la pierre obtenue est de 153,9 °C au rayonnement solaire et à une température ambiante de 762,1 W/m² et 26,6 °C à 15 h 00 de l'après-midi, ce qui témoigne de sa bonne capacité d'absorption de l'énergie thermique et de restitution de la chaleur, même lorsque le rayonnement diminue. Cependant, la température de la pierre a présenté une perturbation thermique pendant la diminution du rayonnement. De plus, la température de la pierre atteignait 40 °C à 20 h 00, ce qui permet de maintenir la température pendant 5 h 10.

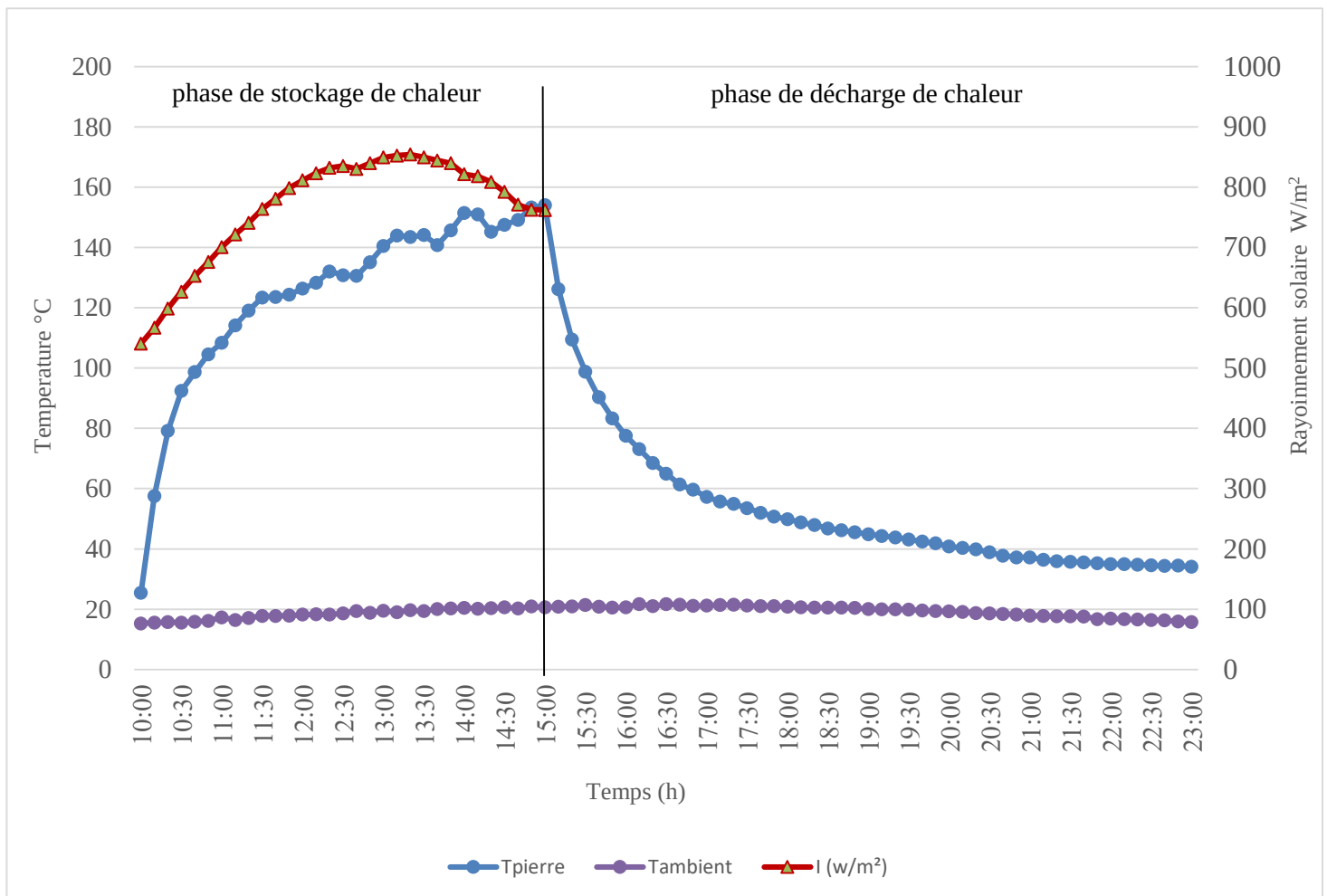


Figure 3.3 : Variation des températures de stagnation de matière de stockage (pierre) correspondant à un éclairage solaire.

3.4.1.2. Le test de stagnation de matière de stockage (sable)

Selon la figure (3.4), la température du sable atteint 135 °C lors d'un pic d'éclairement solaire de 962,1 W/m², tandis que la température maximale du sable s'élève à 141,8 °C à 15 h 00, avec un rayonnement solaire de 871,1 W/m², et la température ambiante est de 28,3 °C. En outre, le sable a démontré une bonne stabilité thermique et a restitué de la chaleur malgré la baisse du rayonnement solaire, ce qui traduit une faible inertie thermique. La température du sable a atteint 40 °C à 20 h 00, ce qui permet de conserver cette température aussi pendant 5 heures.

Ainsi, le sable présente une capacité limitée à conserver l'énergie thermique sur de longues durées. Cette performance thermique réduite s'explique par la nature granulaire du sable. En effet, la présence de vides d'air entre les particules limite l'efficacité du transfert de chaleur au sein du matériau.

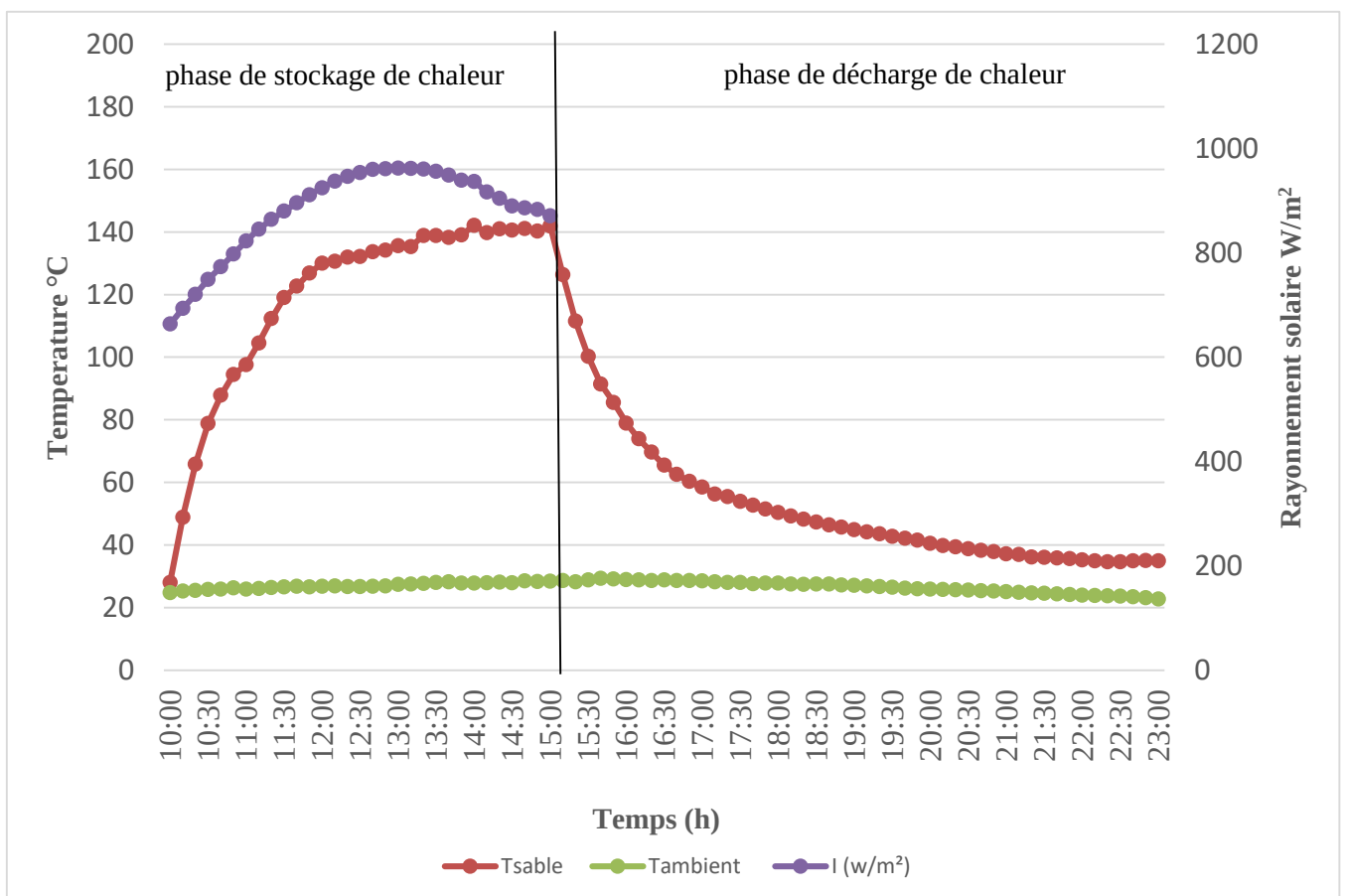


Figure 3.4 : Variation des températures de de stagnation de matière de stockage (sable) correspondant à un éclairement solaire.

3.4.1.3. Le test de stagnation de matière de stockage (Paraffine)

En se basant sur la figure (3.5), sa température a atteint 133,75 °C au moment du pic de l'irradiation solaire, correspondant à une intensité de 990,83 W/m². Toutefois, sa température maximale a été enregistrée à 14 h 50, où elle a atteint 142 °C, sous une irradiation solaire de 871 W/m² et une température ambiante de 25,66 °C.

Après la diminution du rayonnement solaire, la température de la paraffine a maintenu une stabilité thermique tout en libérant progressivement la chaleur stockée. En effet, sa température est restée de l'ordre de 40 °C à 21 h, ce qui témoigne d'une bonne capacité de rétention thermique. Ce comportement s'explique par le fait que la paraffine possède une forte capacité de stockage de l'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors de sa fusion, qu'elle restitue ensuite progressivement au cours de sa solidification. Par conséquent, sa vitesse de refroidissement est plus faible que celle du sable et de la pierre, qui stockent la chaleur uniquement sous forme de chaleur sensible, permettant ainsi à la paraffine de maintenir une température élevée pendant une période plus longue après la couche de soleil.

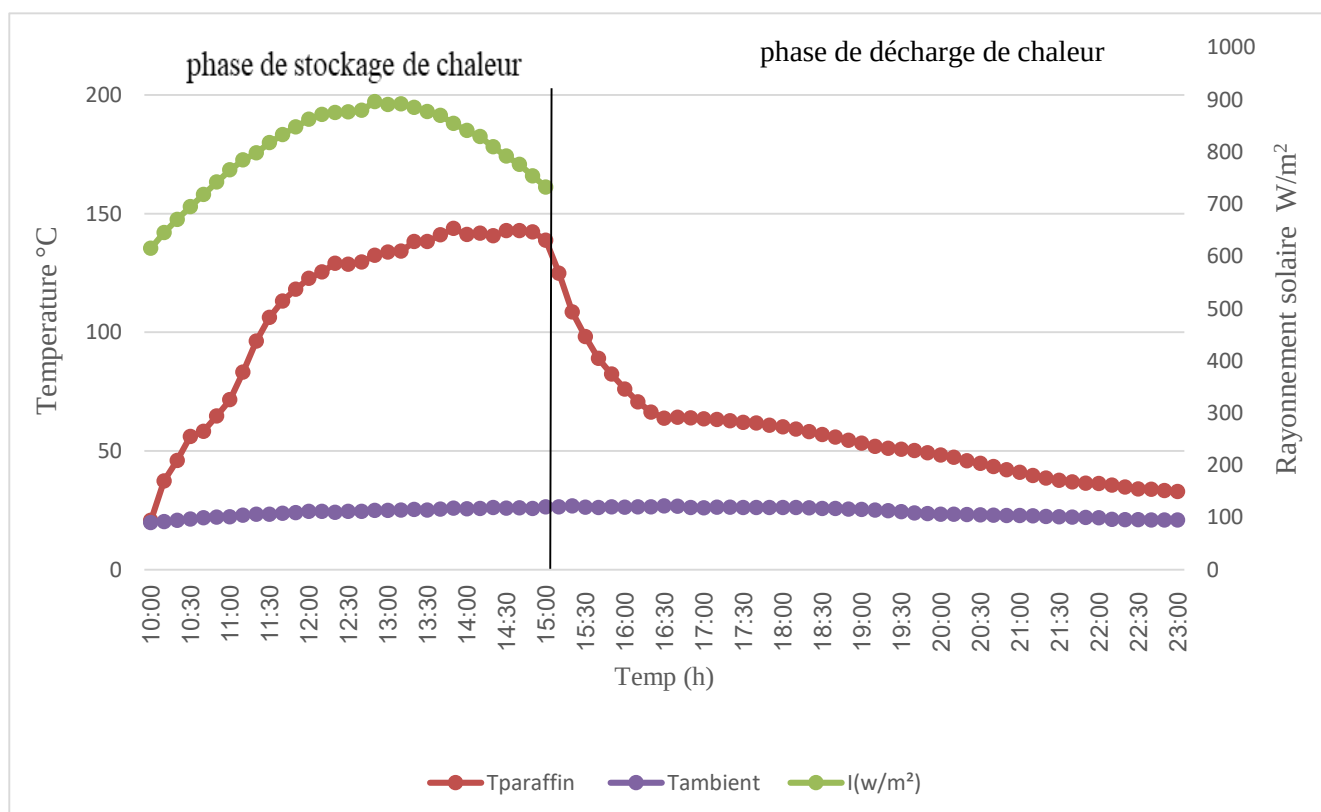


Figure 3.5 : Variation des températures de de stagnation de matière de stockage (paraffine) correspondant à un éclaircissement solaire.

3.5. Les tests de charge d'eau avec matériaux de stockage thermique

Ces essais ont été réalisés afin d'étudier l'influence des matériaux de stockage thermique sur les performances d'un cuiseur solaire de type boîte en présence d'une charge d'eau. À cet effet, plusieurs expérimentations ont été menées durant des journées printanières en utilisant la même quantité de matériau de stockage thermique, mais de nature différente (pierre, sable et paraffine), ainsi qu'une quantité d'eau constante de 1,5 L pour tous les essais.

Au cours de ces expériences, la température de l'eau, la température ambiante (T_a) et l'intensité du rayonnement solaire (I) ont été mesurées toutes les 10 minutes. Les résultats ont été représentés sous forme de courbes thermiques dans les figures (3.6), (3.7) et (3.8).

3.5.1. Essai d'eau avec la pierre

Dans l'essai utilisant la pierre, présenté à la figure (3.6), la température de l'eau a atteint 100 °C, correspondant à la température d'ébullition, au moment où le rayonnement solaire a atteint une valeur de 852 W/m², vers 13 h 10 (190 minutes).

Après 15 h, la température de l'eau n'a pas chuté rapidement. Elle a conservé une part importante de l'énergie thermique stockée. La température de l'eau a atteint 40 °C à 22 h 10, ce qui indique un retient de chaleur et une capacité de stockage de chaleur pendant 430 min.

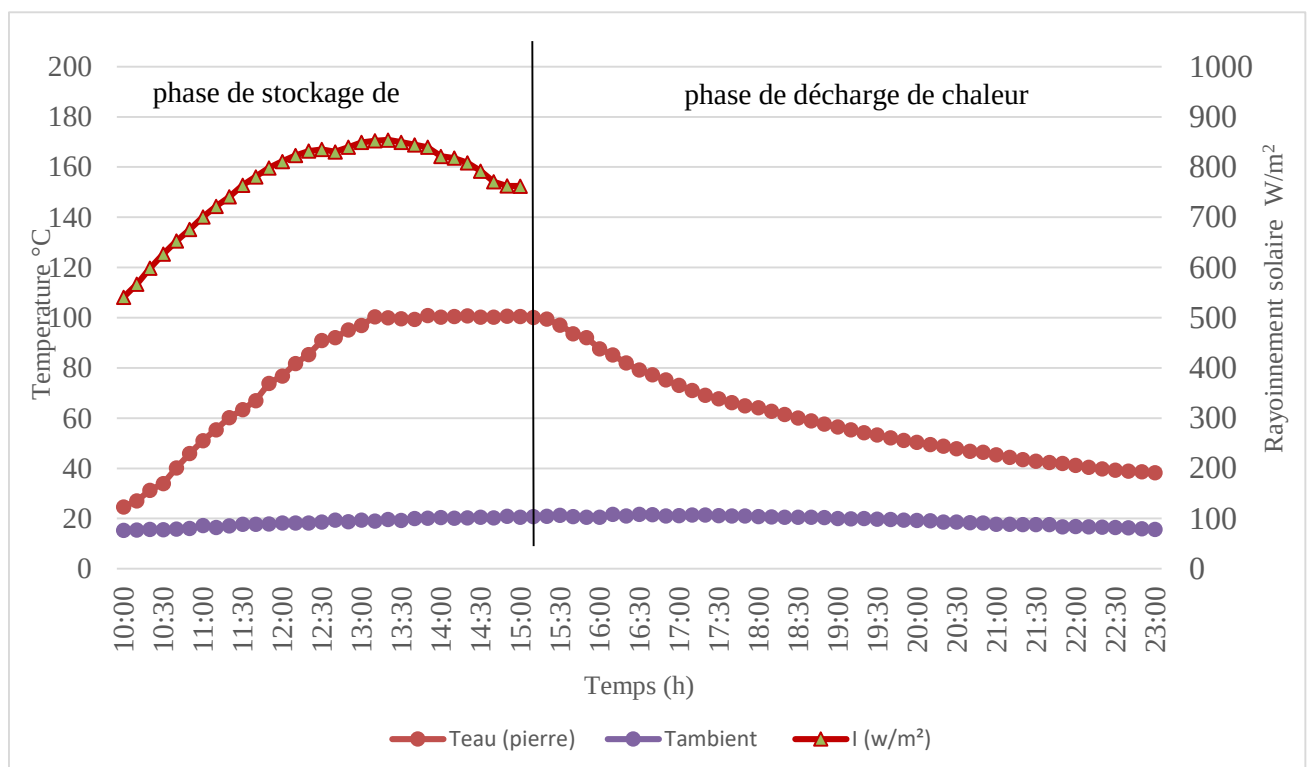


Figure 3.6 : Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de stockage pierre).

3.5.2. Essai d'eau avec le sable

Dans le cas de l'essai avec le sable, illustré à la figure (3.7), la température de l'eau a atteint 97 °C, soit la température d'ébullition à 13 h 00 (180 minutes), sous un rayonnement solaire maximal de 962 W/m² et une température ambiante de 15,76 °C. Après 15 h, la température de l'eau a diminué plus rapidement que dans le cas de la pierre. Ce comportement peut être attribué à la plus faible inertie thermique du sable, liée à sa nature granulaire. La température de l'eau a atteint 40 °C à 21 h 20 (380 minutes), ce qui indique un retient de chaleur et une capacité de stockage de chaleur, ce qui reste une performance relativement satisfaisante.

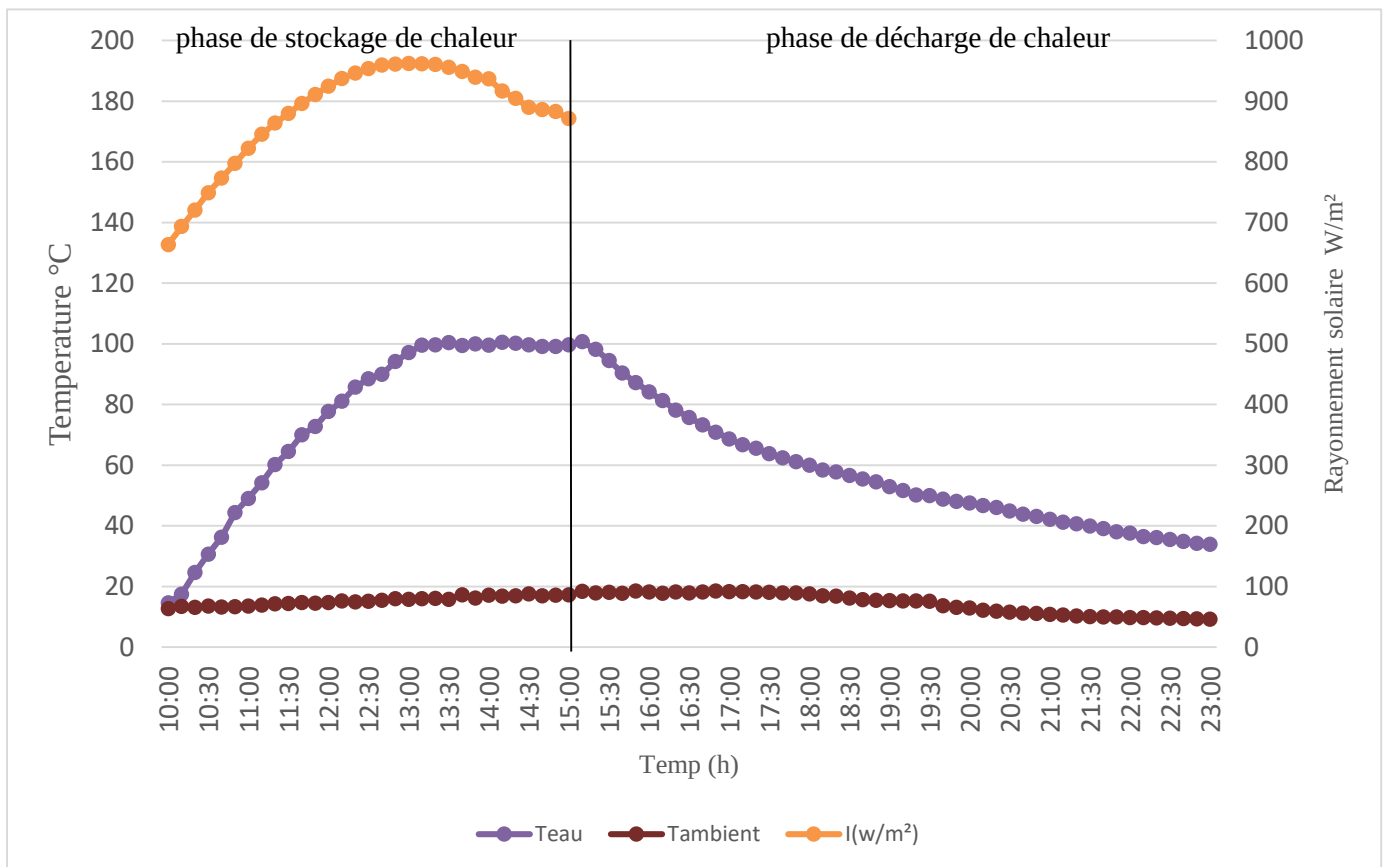


Figure 3.7 : Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de stockage sable).

3.5.3. Essai d'eau avec la paraffine

Dans l'essai utilisant la paraffine, présenté à la figure (3.8), la température de l'eau a atteint 99 °C au moment du rayonnement solaire, estimé à 976 W/m², vers 13 h 30 (210 minutes). La température maximale enregistrée a été de 100 °C, sous un rayonnement solaire de 969 W/m² et une température ambiante de 22 °C. Ce résultat reflète la capacité élevée de la paraffine à stocker l'énergie thermique sous forme de chaleur latente lors de son changement de phase. Après 15 h, la température de l'eau a diminué plus lentement que dans les cas de la pierre et du sable. La paraffine a ainsi permis de maintenir l'eau à une température élevée pendant une durée plus longue, ce qui favorise son utilisation pour des applications telles que la pasteurisation ou le chauffage après le coucher du soleil. À 23 h 00, la température de l'eau était encore de 43 °C, une valeur supérieure à celles obtenues avec la pierre et le sable, démontrant ainsi la meilleure capacité de rétention thermique de la paraffine (480 minutes).

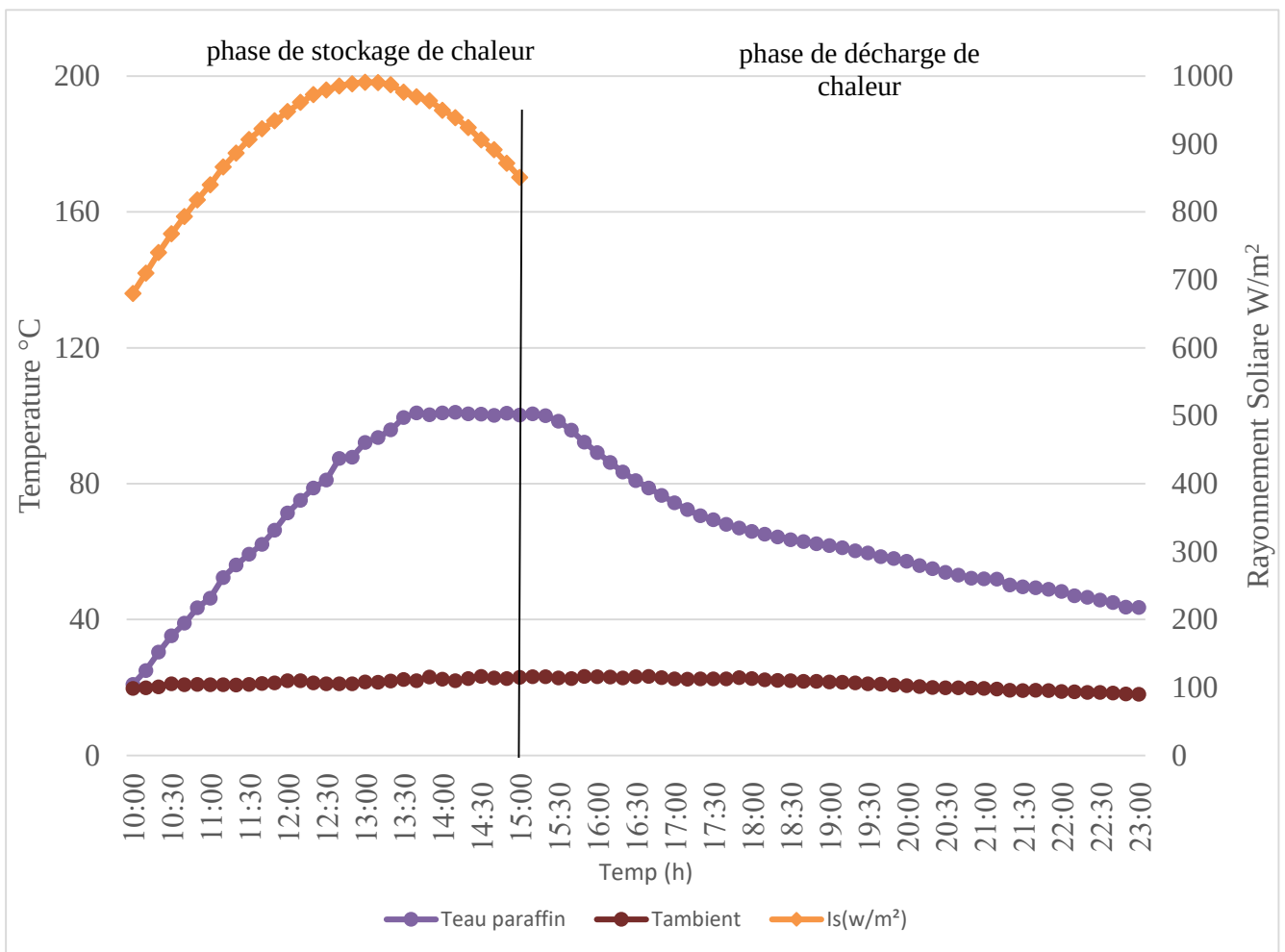


Figure 3.8: Variation des températures de l'eau mesurées dans l'ustensile et variation de l'éclairement solaire correspondant(avec matériaux de stockage paraffine).

3.5.4. Estimation de la puissance de cuisson et de l'efficacité thermique de différents matériaux de stockage

Selon les figures (3.9) et (3.10), les résultats mettent en évidence l'efficacité thermique et de puissance de cuisson du cuiseur solaire intégré à différents matériaux de stockage thermique. Le calcul de l'efficacité thermique et de la puissance de cuisson a été effectué en se basant sur les deux équations (2.3) et (2.4).

Les rendements thermiques obtenus par les matériaux de stockage, notamment la paraffine, le sable et la pierre, étaient respectivement de 21,46 %, 25,47 % et 27,3 %. De plus, la puissance de cuisson obtenue par les matériaux de stockage, notamment la paraffine, le sable et la pierre, était respectivement de 39,28 W, 44,6 W et 46 W.

Les valeurs du rendement thermique du cuiseur solaire lors de l'utilisation des différents matériaux de stockage thermique sensible et latent, à savoir le sable, la pierre et la paraffine, sont attribuées à leurs propriétés thermiques telles que la capacité thermique et la conductivité, qui influencent leur aptitude à absorber, stocker et restituer la chaleur.

D'après les résultats de rendement thermique, les matériaux de stockage thermique sensible, le sable et la pierre, ont présenté une capacité de stockage de chaleur plus faible durant la phase de charge, ce qui a permis d'atteindre le point d'ébullition en un temps plus court que celui de la paraffine. De plus, la paraffine est le matériau de stockage thermique le plus performant grâce à ses propriétés thermiques. Elle a maintenu une meilleure capacité de stockage et de restitution de la chaleur, même en cas de diminution du rayonnement solaire et après le coucher du soleil.

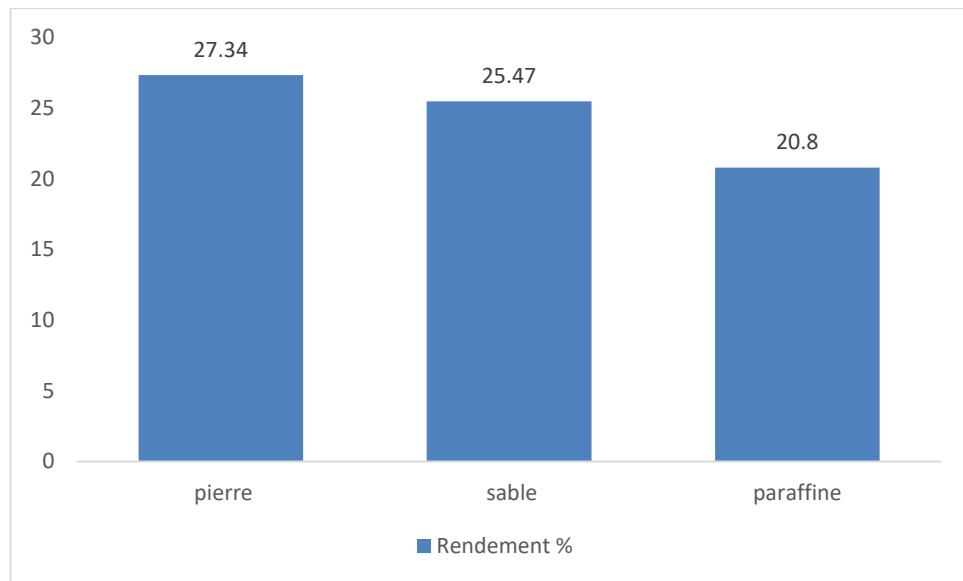


Figure 3.9: les rendements thermiques obtenus avec les matériaux de stockage

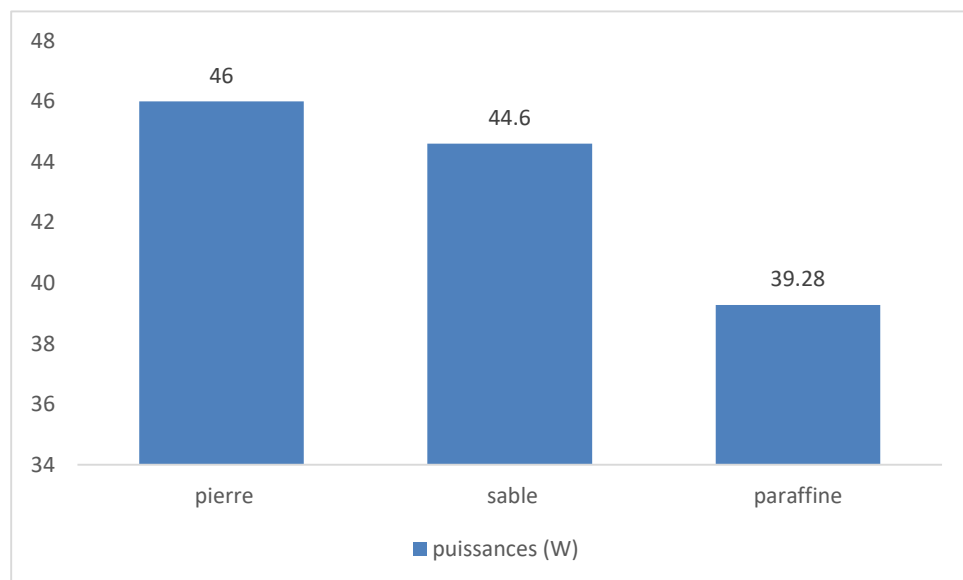


Figure 3.10: les puissances de cuisson obtenus avec les matériaux de stockage

3.6. Comparaison expérimentale du cuiseur solaire en boîte sans et avec stockage thermique

Selon des figures (3.11) (3.12), les résultats expérimentaux obtenus mettent clairement en évidence l'influence du matériau de stockage thermique sur les performances du cuiseur solaire de type boîte.

Les essais réalisés sans matériau de stockage ont montré que la température de la plaque absorbante et celle de l'eau dépendent directement de l'intensité du rayonnement solaire. Après la diminution de l'irradiation, la température du système chute rapidement en raison de l'absence d'une réserve thermique capable de compenser les pertes de chaleur.

L'intégration d'un matériau de stockage thermique a permis d'améliorer le comportement du cuiseur solaire en augmentant son inertie thermique et en prolongeant la durée de maintien de la chaleur. Cependant, les performances observées diffèrent selon les propriétés thermo physiques de chaque matériau.

D'après la figure (3.11), pendant la phase de charge, la température maximale atteinte par la plaque absorbante lors de l'utilisation du four solaire sans matériau de stockage était de 124,5 °C. Elle a ensuite diminué progressivement à mesure que le rayonnement solaire baissait entre 13 h et 15 h. Par la suite, la plaque absorbante a conservé sa chaleur pendant 230 minutes, de 15 h jusqu'au coucher du soleil, atteignant une température de 40 °C. Quant aux matériaux de stockage à intégration associés à la plaque absorbante (pierre, sable et paraffine), leur température maximale a respectivement été de 153,9 °C, 141,8 °C et 142 °C. De plus, la durée de rétention de la chaleur jusqu'à 40 °C dans les matériaux sensibles (pierre, sable) était respectivement de 310 minutes et 300 minutes, tandis que celle de la paraffine était de 360 minutes.

Selon la figure (3.12), pendant la phase de charge, la durée d'ébullition atteinte par l'eau lors de l'utilisation du four solaire sans matériau de stockage était de 180 minutes. Par la suite, l'eau a conservé sa chaleur pendant 260 minutes, de 15 h jusqu'au coucher du soleil, atteignant une température de 40 °C. Quant à l'eau avec les matériaux de stockage à intégration associés à la plaque absorbante (pierre, sable et paraffine), leur durée d'ébullition a respectivement été de 190 min, 180 min et 210 min. De plus, la durée de rétention de la chaleur jusqu'à 40 °C dans les matériaux sensibles (pierre, sable) était respectivement de 430 minutes et 380 minutes, tandis que celle de la paraffine était de plus de 480 minutes.

L'intégration de matériaux de stockage à la plaque absorbante a permis de maintenir la stabilité thermique et la rétention de la chaleur pendant la diminution du rayonnement solaire et jusqu'au coucher du soleil, par rapport à un four solaire sans matériaux de stockage.

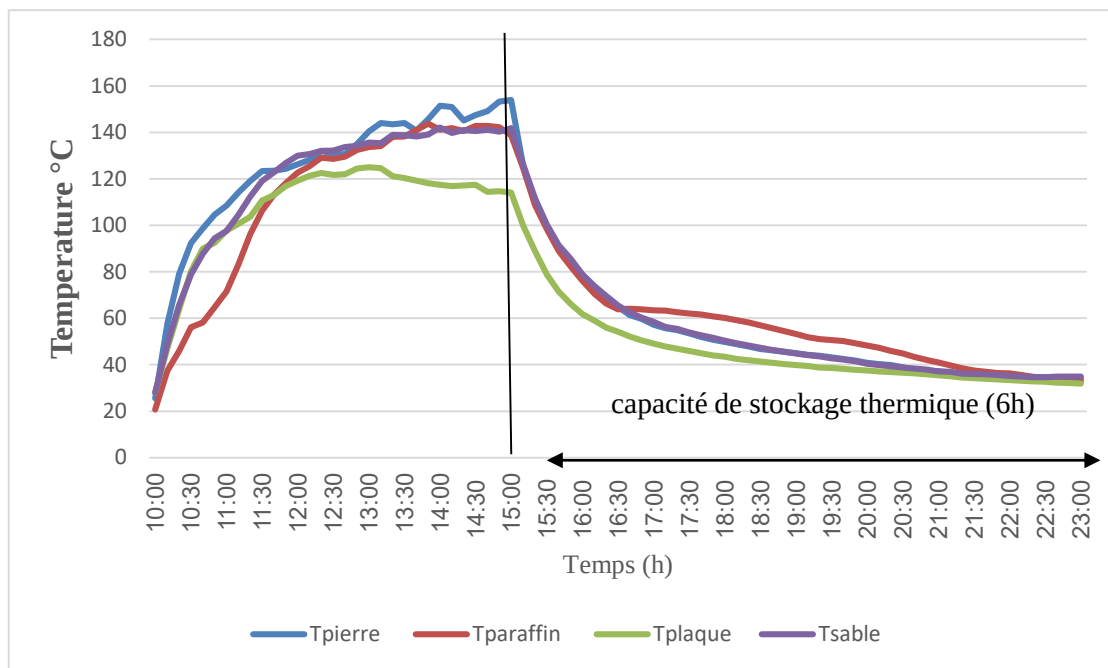


Figure 3.11: Comparaison de Variation des températures du cuiseur solaire boîte sans stockage thermique et avec différents matériaux de stockage

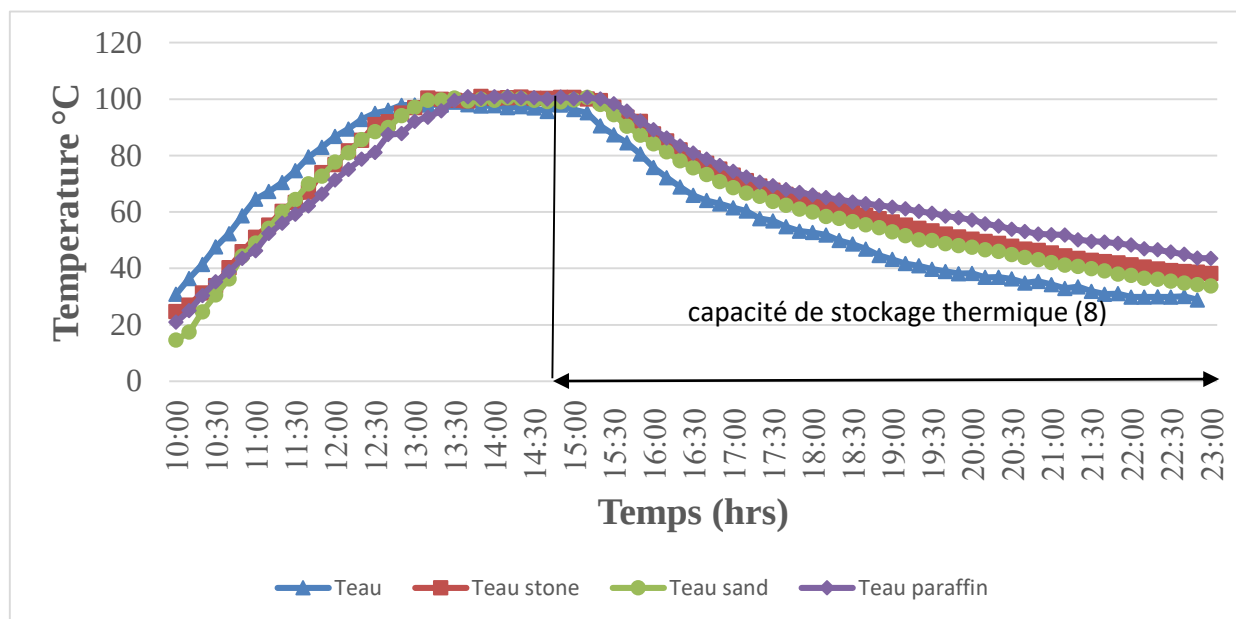


Figure 3.12: Comparaison de Variation des températures du l' eua , sans stockage thermique et avec différents matériaux de stockage

3.7. Tests de cuisson

Afin d'évaluer l'efficacité du système dans des conditions domestiques réelles, un essai complet de cuisson a été réalisé à l'aide d'un récipient hermétiquement fermé, placé à l'intérieur de la chambre de cuisson. Ce récipient contenait un mélange alimentaire composé de 500 g de riz et de morceaux de poulet. Le choix de cette combinaison repose sur les différentes propriétés thermiques des aliments : le riz nécessite une hydratation continue ainsi qu'un chauffage homogène, tandis que le poulet exige une température interne suffisante afin d'assurer une cuisson complète et de garantir la sécurité alimentaire.

Le système a été exposé au rayonnement solaire pendant deux heures continues. Durant cette période, la température interne est restée supérieure à une moyenne de 105 °C, avec des pics thermiques dépassant localement 112 °C, selon les mesures relevées à l'aide de capteurs thermiques placés sur les parois internes et sous le récipient.

À l'issue de l'essai, une évaluation sensorielle des aliments a été effectuée. Les résultats ont montré que le riz était correctement cuit, tendre et homogène, avec un taux d'humidité adéquat et sans grains collants, ce qui témoigne d'une bonne répartition de la chaleur à l'intérieur du récipient. Les morceaux de poulet se sont également révélés parfaitement cuits, la chair présentant une coloration blanche uniforme, indiquant que la température requise pour assurer une cuisson complète et une sécurité sanitaire avait bien été atteinte.

Ces résultats confirment la capacité du système à cuire simultanément différents types d'aliments avec une bonne efficacité thermique, tout en garantissant une cuisson adéquate et la sécurité alimentaire dans des conditions réelles d'utilisation.



Figure 3.13. Résultats des tests de cuisson en utilisant le cuiseur solaire boîte.

3.7.1. Sécurité sanitaire des aliments cuits par énergie solaire

La cuisson solaire est considérée comme une méthode saine et respectueuse de l'environnement. Elle ne produit ni fumées nocives ni émissions polluantes susceptibles d'affecter la qualité des aliments.

Lorsque la température interne des aliments dépasse 70 °C pendant une durée suffisante, les microorganismes pathogènes sont détruits, garantissant ainsi la sécurité sanitaire des aliments. Les résultats expérimentaux obtenus dans cette étude ont montré que les températures atteintes par le cuiseur solaire sont largement suffisantes pour assurer une cuisson correcte et sécurisée des aliments.

3.8. Conclusion

Cette étude expérimentale a permis d'évaluer les performances thermiques d'un cuiseur solaire de type boîte fonctionnant sans stockage thermique puis avec trois matériaux de stockage : le sable, la pierre et la paraffine (PCM). Les résultats obtenus ont confirmé que l'intégration d'un système de stockage thermique améliore considérablement les performances du cuiseur en augmentant la stabilité thermique, en prolongeant la durée de rétention de la chaleur et en assurant une meilleure continuité de la cuisson après la diminution du rayonnement solaire.

Le cuiseur solaire sans stockage a présenté une première figure de mérite $F_1 = 0,11 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}$, conforme aux exigences de la norme BIS, ainsi qu'une seconde figure de mérite $F_2 = 0,49$, démontrant une bonne efficacité thermique. La plaque absorbante a atteint une température maximale de $124,5 \text{ }^\circ\text{C}$, tandis que l'eau a atteint $97,9 \text{ }^\circ\text{C}$ après 180 min d'exposition solaire.

L'utilisation des matériaux de stockage thermique a permis d'améliorer davantage les performances du système. La pierre a atteint une température maximale de $153,9 \text{ }^\circ\text{C}$, le sable $141,8 \text{ }^\circ\text{C}$ et la paraffine $142 \text{ }^\circ\text{C}$. Concernant la rétention thermique, la paraffine s'est distinguée par la meilleure capacité de stockage grâce à sa chaleur latente, en maintenant une température d'environ $40 \text{ }^\circ\text{C}$ jusqu'à 21 h, contre 20 h pour la pierre et le sable. Lors des essais avec charge d'eau, la pierre, le sable et la paraffine ont permis de maintenir l'eau chaude pendant environ 430 min, 380 min et plus de 480 min, respectivement.

L'analyse du rendement thermique a montré que la pierre a enregistré le meilleur rendement (27,3 %) et la puissance de cuisson la plus élevée (46 W), suivie du sable (25,47 % et 44,6 W), puis de la paraffine (21,46 % et 39,28 W). En revanche, la paraffine a présenté la meilleure capacité de stockage et de restitution de la chaleur, assurant une stabilité thermique supérieure pendant les périodes de faible irradiation solaire et après le coucher du soleil.

Enfin, les essais de cuisson ont confirmé la capacité du système à cuire efficacement des aliments réels, avec une température interne supérieure à $105 \text{ }^\circ\text{C}$ et des pics dépassant $112 \text{ }^\circ\text{C}$, garantissant une cuisson complète et une sécurité sanitaire des aliments.

En conclusion, les matériaux de stockage à chaleur sensible, notamment la pierre et le sable, constituent une solution simple et économique permettant d'améliorer le rendement thermique et de réduire le temps de cuisson. Toutefois, la paraffine demeure le matériau le plus performant pour le stockage thermique à long terme grâce à sa capacité élevée de stockage d'énergie et à sa restitution progressive de la chaleur. Ces résultats confirment que l'intégration de matériaux de stockage thermique représente une solution prometteuse pour accroître l'efficacité des cuiseurs solaires et favoriser leur utilisation dans les régions bénéficiant d'un fort potentiel solaire.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce travail, l'étude a porté sur l'amélioration des performances thermiques d'un cuiseur solaire de type boîte à travers l'intégration de différents matériaux de stockage thermique, notamment la pierre, le sable et la paraffine. Ces matériaux ont été sélectionnés en raison de leurs propriétés thermophysiques intéressantes et de leur capacité à stocker une quantité importante d'énergie sous forme de chaleur afin de la restituer progressivement lorsque l'ensoleillement diminue.

Les résultats expérimentaux obtenus ont mis en évidence l'intérêt du stockage thermique pour l'amélioration des performances globales du cuiseur solaire. L'intégration des matériaux étudiés a permis d'augmenter l'inertie thermique du système, de maintenir des températures plus élevées pendant une période prolongée et d'assurer une meilleure continuité du processus de cuisson. Les essais réalisés ont également montré que les matériaux de stockage contribuent efficacement à prolonger la durée de cuisson après le coucher du soleil ou durant les périodes de faible rayonnement solaire, réduisant ainsi l'une des principales limitations des cuiseurs solaires conventionnels.

Par ailleurs, l'étude a permis de comparer le comportement des différents matériaux utilisés et de mettre en évidence leur influence sur les performances thermiques du système. Les résultats obtenus confirment que le choix du matériau de stockage constitue un paramètre essentiel dans la conception et l'optimisation des cuiseurs solaires à stockage thermique.

Les perspectives de ce travail demeurent nombreuses. Des recherches complémentaires pourraient être menées afin d'évaluer d'autres matériaux de stockage thermique présentant des capacités énergétiques plus élevées, une meilleure stabilité thermique et un coût réduit. L'utilisation de matériaux à changement de phase plus performants, l'amélioration des propriétés thermiques du sable par compactage ou par ajout d'additifs appropriés, ainsi que l'optimisation de la géométrie du cuiseur et de son isolation thermique constituent des pistes prometteuses. De même, l'intégration de systèmes hybrides associant le stockage thermique à d'autres sources d'énergie renouvelable pourrait contribuer à améliorer davantage la fiabilité et la disponibilité du système.

Enfin, les résultats de cette étude démontrent que l'intégration de matériaux de stockage thermique représente une approche efficace pour accroître les performances des cuiseurs solaires et favoriser leur adoption à plus grande échelle. Le développement de tels systèmes

pourrait contribuer à réduire la consommation d'énergies conventionnelles, à limiter les impacts environnementaux liés à la cuisson domestique et à promouvoir l'utilisation des énergies renouvelables dans les régions à fort potentiel solaire.

Références

Références

- [1] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*, 5th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2020.
- [2] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2024*. Paris, France: International Energy Agency, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Capacity Statistics 2024*. Abu Dhabi, United Arab Emirates: International Renewable Energy Agency, 2024.
- [4] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 3rd ed. Amsterdam, Netherlands: Academic Press, 2020.
- [5] L. F. Cabeza, Ed., *Advances in Thermal Energy Storage Systems: Methods and Applications*. Cambridge, U.K.: Woodhead Publishing, 2015.
- [6] A. Sharma, V. V. Tyagi, C. R. Chen, and D. Buddhi, “Review on thermal energy storage with phase change materials and applications,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 2, pp. 318–345, 2009, doi: 10.1016/j.rser.2007.10.005.
- [7] B. C. Anilkumar and R. Maniyeri, “Design of thermal energy storage system for solar cooker: A review,” *Sādhanā*, vol. 50, no. 4, p. 334, 2025, doi: 10.1007/s12046-025-02990-w.
- [8] M. A. Ceviz, B. Muratçobanoğlu, E. Mandev, and F. Afshari, “A comprehensive review of solar cooking systems,” *WIREs Energy and Environment*, vol. 13, no. 2, Art. no. e516, 2024, doi: 10.1002/wene.516.
- [9] R. M. Muthusivagami, R. Velraj, and R. Sethumadhavan, “Solar cookers with and without thermal storage—A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 2, pp. 691–701, 2010, doi: 10.1016/j.rser.2008.08.018.
- [10] H. M. Wassie, M. Z. Getie, M. S. Alem, T. B. Kotu, and Z. M. Salehdress, “Experimental investigation of the effect of reflectors on thermal performance of box type solar cooker,” *Heliyon*, vol. 8, no. 12, Art. no. e12324, 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e12324.
- [11] Bureau of Indian Standards, *IS 13429 (Part 3):2000, Solar Cooker—Box Type—Specification, Part 3: Test Methods*. New Delhi, India: Bureau of Indian Standards, 2000.
- [12] S. C. Mullick, T. C. Kandpal, and A. K. Saxena, “Thermal test procedure for box-type solar cookers,” *Solar Energy*, vol. 39, no. 4, pp. 353–360, 1987, doi: 10.1016/S0038-092X(87)80021-X.
- [13] P. A. Funk, “Evaluating the international standard procedure for testing solar cookers and reporting performance,” *Solar Energy*, vol. 68, no. 1, pp. 1–7, 2000, doi: 10.1016/S0038-092X(99)00059-6.
- [14] N. L. Panwar, “Thermal modeling, energy and exergy analysis of animal feed solar cooker,” *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 5, no. 4, Art. no. 043105, 2013, doi: 10.1063/1.4812648.

- [15] D. L. Larson and L. A. B. Cortez, “Exergy analysis: Essential to effective energy management,” Transactions of the ASAE, vol. 38, no. 4, pp. 1173–1178, 1995, doi: 10.13031/2013.27937.
- [16] Delta-T Devices Ltd., SPN1 Sunshine Pyranometer: User Manual. Cambridge, U.K.: Delta-T Devices Ltd.
- [17] Urech Lyss Versand AG, Stratos Funk-Wetterstation und Sender mit Regenmesser: Produktinformation. Lyss, Switzerland: Urech Lyss.
- [18] Agilent Technologies, 34972A LXI Data Acquisition/Switch Unit: User’s Guide. Agilent Technologies.
- [19] International Electrotechnical Commission (IEC), IEC 60584-1:2013, Thermocouples—Part 1: EMF Specifications and Tolerances. Geneva, Switzerland: IEC, 2013.

Annexe:

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences
et de la technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا

غرداية في : 22-09-2026

قسم: الآلية والكهروميكانيك

شعبة : طاقات متجددة

تخصص : طاقات متجددة في الميكانيك

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الأستاذ: مدوكالي حمزة

بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ماستر) المعنونة بـ:

"Contribution à l'évaluation des performances thermiques d'un cuiseur solaire de type
boîte intégrant un système de stockage thermique"

من انجاز الطالبة :

رزاق مروة

التي نوقشت بتاريخ : 13 - 06 - 2026

اشهد ان الطالبة قد قامت بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم
التحقق من ذلك من طرفنا وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك
عزوي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح

حمزة مدوكالي

