



République algérienne démocratique et publique
Minister de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université de Kasdi Merbah- Ouargla-

Faculté des Hydrocarbures, Energies Renouvelables, et des sciences de la terre
et l'univers

Département des énergies renouvelables

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme

Master

Secteur : Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables en mécanique

Présenté par:

- Akacha Madjed
- Rezzag Bedida Chouaib

Thème:

Conception et optimisation d'un cuiseur solaire indirect à fluide caloporteur (Cas de la région de Ouargla)

Devant le jury:

Pr. Djamel Benmnine Université Kasdi Merbeh -Ouargla President

MCA Nacib Hichem Université Kasdi Merbeh-Ouargla Examineur

Année : 2025/2026

Dédicaces :

Avec fierté et gratitude,
nous, originaires de **Sétif** et **Ouargla**, dédions ce mémoire à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Tous les mots du monde ne sauraient exprimer ce que nous ressentons envers ceux qui nous sont chers.

À nos chères familles,

de **Sétif** et **Ouargla**, qui ont toujours été notre première source de soutien, grâce à leurs sacrifices constants, leur amour inépuisable et leurs prières sincères. Merci pour votre patience, vos encouragements et votre présence dans chaque étape de notre parcours. Aucun mot ne saurait rendre justice à tout ce que vous avez fait pour nous.

À nos mères chéries,

Bien qu'aucun hommage ne puisse traduire à sa juste valeur l'amour, le respect, la gratitude et la reconnaissance que nous vous portons pour tous les sacrifices que vous avez consentis pour notre éducation, notre instruction et notre bien-être. Ce modeste travail est le fruit de vos prières et de vos espérances.

Puisse Dieu Tout-Puissant vous protéger, vous accorder longue vie, santé et bonheur, afin que nous puissions un jour vous rendre fières, comme vous le méritez tant.

À nos pères aimés,

L'estime et le respect que nous éprouvons envers vous ne peuvent être exprimés par des mots. Vous êtes et resterez pour nous des modèles de droiture, de sagesse et de persévérance. Vous nous avez toujours guidés, soutenus et appris à avancer avec courage. Que Dieu vous protège et vous comble de santé et de bonheur.

À nos frères, sœurs, tantes et oncles,

Votre présence, vos conseils et votre affection ont toujours été un appui précieux. À notre tante bien-aimée, même éloignée, tu restes toujours proche de nos cœurs. À nos deux jeunes oncles, véritables bouées de sauvetage dans les moments difficiles, merci pour votre soutien et votre bienveillance.

À nos amis chers,

Qui ont été à nos côtés dans les moments de doute comme dans les instants de joie. Merci pour votre soutien constant, vos encouragements sincères et les rires partagés qui ont allégés nos fatigues et nos inquiétudes. Votre présence a rendu ce parcours plus supportable et surtout, bien plus agréable.

Remerciements :

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire et à l'accomplissement de mon parcours universitaire.

Je remercie sincèrement **l'ensemble de mes professeurs**, qui m'ont transmis leur savoir, leurs compétences et leur passion tout au long de ces années. Grâce à eux, j'ai pu acquérir les bases et les connaissances nécessaires pour poursuivre mes rêves et atteindre cette cinquième année avec confiance et ambition.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux à **monsieur Belatrach**, mon encadrant, pour la confiance qu'il m'a accordée, sa disponibilité, sa bienveillance et la qualité de son accompagnement. Ses conseils avisés, sa patience et sa rigueur scientifique ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Mes sincères remerciements vont également à **monsieur ...**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury, ainsi qu'à **monsieur ...** et **monsieur ...**, pour avoir accepté, avec amabilité et bienveillance, d'évaluer ce mémoire.

Enfin, je rends grâce à **Dieu Tout-Puissant**, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. Grâce à Son aide et au soutien de toutes les personnes citées, j'ai pu mener à bien ce travail, fruit d'un long effort et d'une belle expérience humaine.

الحمد لله الذي أنشأ وبرى، وخلق الماء والثرى، الرحمن على العرش استوى، له الحمد في الأولى
والآخرة، وله الحكم وإليه ترجعون
وصلاة وسلاماً تامين على من بكى شوقاً على أمته، المبعوث في أم القرى، سيدنا محمد المصطفى، وعلى
آله وصحبه ومن اقتفى أثره إلى يوم الدين

أما بعد،
فإن طلب العلم عبادة نتقرب بها إلى الله تعالى، وغاية نسعى بها لنيل رضاه، مصداقاً لقوله عز وجل
(قُلْ هَلْ يَسْتَوِي الَّذِينَ يَعْلَمُونَ وَالَّذِينَ لَا يَعْلَمُونَ) [الزمر: 9]
وما أردنا بهذا العمل إلا وجه الله الكريم، ثم إدخال السرور على أهلنا وأساتذتنا الذين لم ييخلوا علينا بحبٍ
أو دعم أو علم أو دعاء
فجزاهم الله عنا خير الجزاء، وأدامهم ذخراً لنا وللوطن

وانطلاقاً من قول الله تعالى
(وَمَنْ يَشْكُرْ فَإِنَّمَا يَشْكُرُ لِنَفْسِهِ) [لقمان: 12]،
نتوجه بخالص الشكر والتقدير إلى **الأستاذ المشرف جمال بلطرش**، حفظه الله،
الذي كان لإشرافه الكريم وتقانيه في المتابعة والتوجيه الأثر الأكبر في إخراج هذا العمل العلمي بهذه
الصورة، فله منا جزيل الشكر والعرفان، سائلين الله أن يجزيه عنا خير الجزاء، وأن يجعل ما قدمه لنا في
ميزان حسناته

Résume :

Ce mémoire porte sur la conception et l'évaluation expérimentale d'un cuiseur solaire indirect à fluide caloporteur adapté à la région d'Ouargla. Le système comprend un cuiseur type boîte, un circuit fermé avec fluide caloporteur, deux réservoirs, un serpentín en cuivre, ainsi qu'un système photovoltaïque alimentant une résistance d'appoint et une pompe de circulation. Les essais menés en avril et mai 2026 ont montré que les pierres locales constituent le meilleur matériau de stockage thermique (82,3°C contre 77,1°C pour le gravier). Avec stockage, l'écart de température de l'eau après mise à l'ombre atteint +6,1°C pour 2 litres. L'hybridation photovoltaïque en courant alternatif a permis d'atteindre et de maintenir l'ébullition à 100°C pendant 4 heures avec seulement 160 Wh consommés, contre 88°C pour le cuiseur témoin. Un essai de cuisson réelle (œufs et lentilles) a validé le système. En revanche, le prototype indirect à fluide caloporteur n'a atteint que 38,6°C contre 40°C pour le témoin direct, en raison de pertes thermiques dans les flexibles et d'un échange insuffisant au niveau du serpentín. Ce travail valide la faisabilité du cuiseur hybride indirect en zone saharienne et propose des améliorations : isolation des flexibles, optimisation de l'échangeur et régulation automatique de la pompe.

Anglais :

This thesis focuses on the design and experimental evaluation of an indirect solar cooker using a heat transfer fluid, adapted to the climatic conditions of the Ouargla region. The system includes a box-type solar cooker, a closed circuit containing a heat transfer fluid, two storage tanks, a copper coil ensuring heat transfer, as well as a photovoltaic system powering an auxiliary electric resistance and a circulation pump. Tests conducted in April and May 2026 showed that local stones are the best thermal storage material (82.3°C versus 77.1°C for gravel). With stone storage, the water temperature difference after shading reached +6.1°C for 2 liters. Photovoltaic hybridization with alternating current achieved and maintained boiling at 100°C for 4 hours with only 160 Wh consumed, compared to 88°C for the control cooker. A real cooking test (eggs and lentils) validated the system. However, the indirect prototype with heat transfer fluid only reached 38.6°C versus 40°C for the direct control, due to heat losses in the hoses and insufficient heat exchange in the coil. This work validates the feasibility of the hybrid indirect solar cooker in Saharan zones and proposes improvements: hose insulation, heat exchanger optimization, and automatic pump regulation.

Arabe :

تتناول هذه المذكرة تصميم وتقييم تجريبي لموقد شمسي غير مباشر يستخدم مانعاً ناقلاً للحرارة، ملائماً للظروف المناخية لمنطقة ورقلة. يتكون النظام من موقد شمسي من نوع الصندوق، ودائرة مغلقة تحتوي على مائع ناقل للحرارة، وخزانين للتخزين، وملف نحاسي لضمان نقل الحرارة، بالإضافة إلى نظام كهروضوئي يغذي مقاومة كهربائية مساعدة ومضخة لـ $2\text{ لتر من }^{\circ}\text{C}$ مع التخزين بالحجارة، بلغ الفرق في درجة حرارة الماء بعد التظليل $+6.1$. (للحصى $^{\circ}\text{C}$ مقابل 77.1 فقط، Wh لمدة 4 ساعات باستهلاك 160°C الماء. مكن الدمج الكهروضوئي بالتيار المتردد من تحقيق وغيلان عند 100 للموقد المرجعي. أثبت اختبار طهي حقيقي (بيض وعدس) نجاح النظام. ومع ذلك، لم يصل النموذج الأولي $^{\circ}\text{C}$ مقابل 88 للموقد المباشر المرجعي، بسبب فقدان الحرارة في $^{\circ}\text{C}$ مقابل 40 غير المباشر بمائع ناقل للحرارة إلا إلى 38.6 الخراطيم وضعف التبادل الحراري على مستوى الملف النحاسي. يثبت هذا العمل جدوى الموقد الشمسي الهجين غير المباشر في المناطق الصحراوية ويقترح تحسينات: عزل الخراطيم، تحسين المبادل الحراري، والتحكم التلقائي في المضخة.

Sommaire

Dedicaces	
Remerciements	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction Generale	

Chapitre I : Etat de l’art sur les systèmes de cuisson solaire et leurs applications

I.1 Contexte énergétique et intérêt de la cuisson solaire.....	1
I.2 Généralités sur les systèmes de cuisson solaire	2
I.2.1 Principe de fonctionnement de la cuisson solaire	2
I.2.2 Paramètres critique influençant l’efficacité thermique	3
I.3 Classification des cuiseurs solaires	4
I.3.1 Fours solaires à Panneaux	4
I.3.2 Four solaire de type boîte	5
I.3.3 Cuiseur solaire parabolique	6
I.4 Cuiseur solaire direct	7
I.4.1 Principe des cuiseurs solaires direct	7
I.4.2 Avantages des systèmes de cuisson directe	7
I.4.3 Limites et contraintes des cuiseurs solaires directs	7
I.5 Cuiseurs solaires indirects	8
I.5.1 Principe des cuiseurs solaires indirects	8
I.5.2 Fluide caloporteur utilisés dans les cuiseurs solaires	9

I.5.3 Modes de circulation du fluide caloporteur	9
I.6 Techniques de stockage thermique associées aux cuiseurs solaires	10
I.7 Analyse critique et comparaison des travaux existants	12
I.8 Conclusion	13

Chapitre II : Modélisation d'un cuiseur solaire indirect utilisant un fluide caloporteur

II.1 Introduction	15
II.2 Présentation et description du système étudié	15
II.3 Modélisation thermique du système	16
II.4 Modélisation du transfert thermique dans le serpentin (partie indoor)	17
II.5 Modélisation thermique des réservoirs	18
II.6 Evaluation des performances thermiques du système	19
II.7 Conclusion	21

Liste des figures

Figure I.1: Illustration des mécanismes de transfert thermique dans un cuiseur solaire.	2
Figure I.2: Illustration illustrant un cuiseur solaire a panneaux.....	4
Figure I.3: Illustration d'un cuiseur solaire type boite.....	5
Figure I.4: Diagram montrant un four solaire parabolique.....	6
Figure II.1: Variation de la température du fluide caloporteur au cours du temps	20
Figure III.1: Vitesse moyenne du vent dans la ville de Ouargla 2014 à 2023 (km/h) ..	25
Figure III.2: Humidité moyenne du vent dans la ville de Ouargla 2014 à 2023	25
Figure III.3: Photos des cuiseurs solaires utilisés	27
Figure III.4: Diagram du cuiseur solaire simple avec stockage thermique	27
Figure III.5: Image des blocs de gravier et de Pierres utilisés	28
Figure III.6 : Protocole de cuiseur hybride	31
Figure III.7 : Protocole de cuiseur hybride à fluide caloporteur	34
Figure IV.1 : Graph montrant l'évolution des températures des bases et de verre des cuiseurs 1 et 2, et de la température ambiante (13/04/2026)	37
Figure IV.2: Graph montrant les variations irradiation et vitesse du vent (13/04/2026)	38
Figure IV.3: Graph de l'évolution des températures du gravier, des pierres et des bases des cuiseurs (14/04/2026)	39
Figure IV.4: Graph des variations de l'irradiation et vitesse du vent (14/04/2026)	39
Figure IV.5: Graphe qui montre l'évolution des températures des deux cuiseurs (avec et sans stockage) (15/04/2026)	40
Figure IV.6: Graph de variation de l'irradiation solaire, et vitesse du vent (15/04/2026)	41
Figure IV.7: Evolution de l'Irradiation solaire, et vitesse du vent (16/04/2026)	42
Figure IV.8: Graph de variation l'irradiation solaire, et vitesse du vent (16/04/2026) ..	43

Figure IV.9: Graph de l'évolution des températures de base des deux cuiseurs et de la température ambiante (18/04/2026)	44
Figure IV.10: Graph de comparaison des températures de l'eau entre les deux cuiseurs (18/04/2026)	44
Figure IV.11: Graph de la Puissance électrique charge (load) activée par créneaux (18/04/2026)	45
Figure IV.12: Graph montrant la variation de l'irradiation solaire (IR) et de la vitesse du vent (18/04/2026)	45
Figure IV.13: Évolution des températures de base des deux cuiseurs et de la température ambiante (19/04/2026)	46
Figure IV.14 : Graph de Comparaison des températures de l'eau entre les deux cuiseurs (19/04/2026)	47
Figure IV.15 : Graph de variation de l'irradiation solaire (IR) et de la vitesse du vent (19/04/2026)	48
Figure IV.16 : Graph montant l'évolution des températures dans les deux cuiseurs (eau, pierre, base) lors de l'essai DC (22/04/2026)	49
Figure IV.17 : Graph montrant l'évolution des températures de cuisson (eau des œufs, eau des lentilles, pierre) et température ambiante (23/04/2026)	50
Figure IV.18 : Graph de variation de l'Irradiation solaire et vitesse du vent (23/04/2026)	51
Figure IV.19 : Graph montrant la variation de la température de l'eau dans les deux cuiseurs (20/05/2026)	52

List of tableaux

Tableau I.1 : Comparaison des modes de circulation du fluide caloporteur	9
Tableau I.2 : Quelques PCM utilisés dans les cuiseurs solaires	11

Tableau I.3 : Comparaison synthétique des principaux types de cuiseurs solaires	12
Tableau III.1 : Tableau d'Instruments de mesure utilisés	29
Tableau III.2 : Tableau Équipements électriques utilisés	30
Tableau III.3 : Tableau Jours de travail	32
Tableau III.4 : Matériel de stockage et transport du fluide caloporteur	33

Nomenclature

Symbol	Designation	Unité
Qu	Puissance thermique utile	W
Qsol	Puissance solaire captée	W
Qelec	Puissance électrique d'appoint	W
G	Irradiation solaire globale	W/m ²
A	Surface de captation solaire	m ²
U	Coefficient global de transfert thermique	W/(m ² ·K)
Ta	Température ambiante	°C ou K
Tf	Température du fluide caloporteur	°C ou K
Tin	Température d'entrée du fluide	°C ou K
Tout	Température de sortie du fluide	°C ou K
Tp	Température de la paroi	°C ou K
m	Masse	kg
$\dot{m}$	Débit massique	kg/s
Cp	Chaleur spécifique massique	J/(kg·K)
k	Conductivité thermique	W/(m·K)
h	Coefficient de convection	W/(m ² ·K)

Di	Diamètre intérieur du serpentin	m
L	Longueur du serpentin	m
η	Rendement thermique	%
IR	Irradiation solaire mesurée	W/m ²
Vvent	Vitesse du vent	m/s
I	Intensité électrique	A
Uelec	Tension électrique	V
R1	Réservoir principal extérieur	—
R2	Réservoir secondaire intérieur	—
PV	Panneau photovoltaïque	—
PCM	Matériau à changement de phase	—
DC	Courant continu	—
AC	Courant alternatif	—

Introduction générale

Dans le contexte des enjeux liés au changement climatique et à la sécurité énergétique, on incite le secteur résidentiel à diminuer sa reliance sur les énergies fossiles [1]. La préparation des repas, une activité quotidienne à forte consommation d'énergie, est un point central de cette transition. Dans ce cadre, la cuisson solaire se présente comme une option renouvelable et durable. Les cuiseurs solaires directs, comme les modèles à boîte et parabolique, ont été largement étudiés et optimisés, montrant un potentiel technique véritable [2, 3]. Toutefois, ces dispositifs engendrent d'importantes restrictions opérationnelles, requérant une mise en œuvre à l'extérieur et procurant un rendement étroitement dépendant de l'ensoleillement direct, ce qui entrave leur adoption généralisée et pratique [4]. Ce qui nous amène vers la problématique.

Le majeur problème des cuiseurs solaires directs c'est qu'ils nécessitent une cuisson à l'extérieur de la maison parfois sous des conditions climatiques qui n'assure pas le confort de l'utilisateur sous de hautes températures et une exposition aux rayons de soleil. Afin de surmonter ces contraintes, l'idée d'un cuiseur solaire indirect, dissociant la collecte d'énergie de son emploi pour la cuisson, a été envisagée, notamment grâce au recours à un fluide caloporteur pour acheminer la chaleur vers une zone de cuisson interne [5].

L'objectif principal de ce mémoire est la conception et l'analyse expérimentale d'un prototype novateur de cuiseur solaire indirect à circulation forcée de fluide caloporteur. Le dispositif suggéré se caractérise par sa structure en circuit fermé, incluant un capteur solaire de type boîte positionné à l'extérieur, un fluide caloporteur dérivé de l'huile, un échangeur thermique en forme de serpent qui fait office de plaque de cuisson interne, et une pompe dédiée à la circulation. Cette conception est spécialement orientée vers l'amélioration du confort d'emploi (cuisson interne), de la sécurité et de la continuité opérationnelle comparativement aux technologies traditionnelles. Ce mémoire est subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre illustre une recherche bibliographique sur les systèmes de cuisson solaire et leurs applications dresse un panorama complet des technologies existantes. Il expose les principes de base, les diverses classifications de cuiseurs et examine avec une critique approfondie leurs performances, points forts et faiblesses, tout en soulignant la place des systèmes indirects. **Le deuxième chapitre** présente la modélisation d'un cuiseur solaire indirect utilisant un fluide caloporteur. Cette partie décrit la conception du système et établit les modèles thermiques et hydrauliques qui régissent son fonctionnement, depuis la collecte du rayonnement solaire jusqu'au transfert de chaleur à la casserole de cuisson.

Dans **le troisième chapitre** un protocole expérimental aura décrit la démarche employée pour confirmer le modèle théorique. Il s'agit de la mise en œuvre du prototype, de l'instrumentation et du plan expérimental élaboré pour mesurer ses performances dans les conditions météorologiques réelles de la zone de Ouargla.

Le quatrième chapitre présente les résultats expérimentaux et leurs discussions. Il juge l'efficacité thermique de l'appareil en question, parle de ses performances lors de la cuisson et tire des déductions sur sa faisabilité, ses bénéfices tangibles et les voies d'amélioration possibles. On termine ce mémoire avec un conclusion générale.

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de cuisson solaire et leurs applications

Ce chapitre représente une analyse critique de l'état actuel des connaissances scientifiques et technologiques dans le secteur de la cuisson solaire. Par le biais d'une analyse exhaustive de la littérature, il soulignera un déséquilibre manifeste : historiquement, la recherche s'est principalement focalisée sur l'amélioration des cuiseurs solaires directs (à boîte et paraboliques), tandis que les systèmes indirects, en particulier ceux qui utilisent un fluide caloporteur pour la cuisson intérieure, restent un secteur encore largement inexploré malgré leur potentiel révolutionnaire. Ce chapitre, en mettant en évidence les contraintes des architectures traditionnelles et l'absence de nombreux travaux sur les systèmes de transfert de chaleur innovants, démontrera la pertinence, l'originalité et le besoin scientifique du présent mémoire. Celui-ci est dédié à la conception et à l'analyse d'un cuiseur solaire indirect à fluide caloporteur en circulation forcée.

I.1. Contexte énergétique et intérêt de la cuisson solaire

La cuisson à domicile constitue un défi crucial en matière d'énergie, d'environnement et de santé à l'échelle mondiale, utilisant entre 4% et 7% de l'énergie finale selon l'Agence Internationale de l'Énergie [6]. Dans plusieurs zones en développement, l'attachement durable à la biomasse traditionnelle et aux énergies fossiles engendre des conséquences préoccupantes : d'après l'Organisation Mondiale de la Santé, les activités liées à cette dépendance sont à l'origine d'environ 3,8 millions de morts prématurés par an [7]. À cela s'ajoutent des problèmes de déforestation et des émissions considérables de gaz à effet de serre. Des zones désertiques telles que le Sahara algérien présente un potentiel solaire remarquable pour surmonter ces obstacles, avec une irradiation annuelle qui excède souvent 2000 kWh/m² [8]. Cependant, malgré le potentiel technique indéniable, l'utilisation des technologies de cuisson solaire est encore restreinte. L'analyse bibliométrique indique que cette contrainte correspond à une disproportion marquée dans les travaux de recherche : plus de 85% des publications scientifiques se concentrent sur l'optimisation des systèmes directs (cuisinières à boîte et paraboliques), alors que les systèmes indirects ne constituent qu'environ 15% des recherches, avec un intérêt encore moins prononcé pour les architectures utilisant des fluides caloporteurs [9, 10].

I.2. Généralités sur les systèmes de cuisson solaire

I.2.1. Principes de fonctionnement de la cuisson solaire :

L'efficacité d'un four solaire dépend de la bonne direction du rayonnement solaire vers la nourriture, effectuée par des miroirs ou réflecteurs. Ces dispositifs focalisent les rayons du soleil vers le récipient de cuisson, où les photons qui entrent sont transformés en énergie thermique lorsqu'ils touchent une surface qui absorbe, habituellement de teinte sombre pour optimiser l'absorption. Cette énergie est par la suite transmise aux aliments via la conduction et la convection.

Il est crucial de maintenir cette chaleur à l'intérieur du système pour une cuisson optimale. Les cuiseurs à forme de « boîte » intègrent un vitrage clair sur leur partie supérieure, qui favorise l'entrée de la lumière solaire tout en restreignant les pertes par rayonnement infrarouge grâce à l'effet de serre. L'utilisation de matériaux à faible conductivité thermique pour isoler les parois latérales diminue simultanément les pertes de chaleur par conduction et convection, garantissant ainsi une température intérieure stable

L'équilibre thermique se produit lorsque l'énergie solaire recueillie compense parfaitement les pertes thermiques du dispositif. Dans cet état stable, la température s'ajuste pour assurer une cuisson graduelle et homogène des aliments. Cet équilibre dynamique est particulièrement crucial pour assurer des températures de cuisson stables malgré les variations de l'ensoleillement. [11, 12]

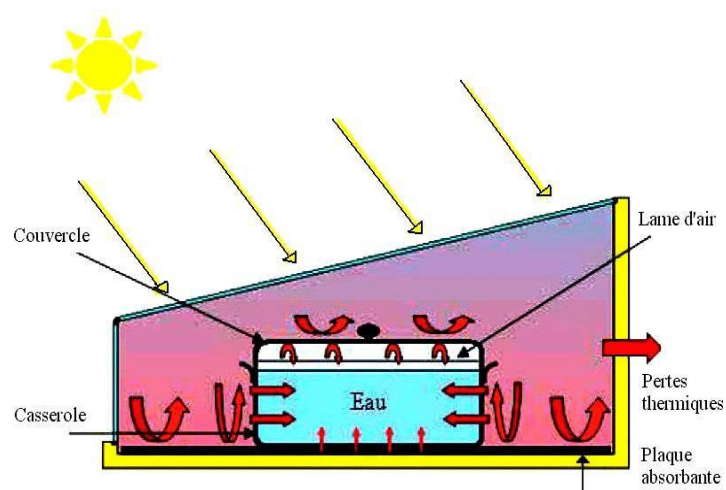


Figure I.1 : Illustration des mécanismes de transfert thermique dans un cuiseur solaire

I.2.2. Paramètres critiques influençant l'efficacité thermique

I.2.2.1. Paramètres climatiques :

- **Intensité et qualité de la radiation solaire :** Le principal facteur influençant la température maximale réalisable est le rayonnement direct normal (DNI), qui présente une corrélation presque linéaire avec cette dernière. Pour commencer une cuisson efficace, il faut généralement une intensité minimale de 500 W/m^2 [13].
- **Conditions météorologiques :** La température de l'environnement a un impact direct sur les pertes par convection naturelle, alors que la puissance du vent peut considérablement accroître les pertes dues à la convection forcée. Des recherches indiquent qu'une brise de 5 m/s peut abaisser la température d'un four en boîte de 15 à 20°C [14].

I.2.2.2. Paramètres de conception géométrique et optique.

- **Facteur de concentration et configuration géométrique :** Calcule la densité d'énergie sur la surface qui absorbe. Les systèmes paraboliques voient leur efficacité optique compromise par des erreurs de focalisation.
- **Caractéristiques radiatives des matériaux :** Il est primordial d'avoir une réflectivité élevée pour les miroirs (idéalement supérieure à $0,85$), une forte absorptivité au niveau de la surface de réception (plus de $0,95$) et une faible émission dans l'infrarouge afin d'optimiser le bilan énergétique [15].

I.2.2.3. Paramètres thermiques et choix des matériaux

- **Matériaux isolants :** Les matériaux d'isolation ayant une faible conductivité thermique ($\lambda < 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) réduisent au minimum les pertes thermiques par conduction. La valeur totale du coefficient de pertes U est directement affectée par la qualité et l'épaisseur de l'isolation. [16, 17]
- **Capacité thermique et inertie :** Affecte la vitesse de réaction du système ainsi que sa stabilité thermique. Il faut trouver un équilibre idéal entre le temps de préchauffage et la capacité à maintenir la température. [18]
- **Caractéristiques du contenant de cuisson :** La conductivité thermique, l'émissivité de surface et la capacité thermique spécifique influencent l'efficacité du passage de la chaleur aux aliments. [19]

Ces paramètres interagissent de façon complexe, et leur optimisation exige une démarche systémique prenant en compte les conditions d'exploitation spécifiques ainsi que les restrictions technico-économiques.

I.3. Classification des cuiseurs solaires

Il existe trois catégories principales de technologies pour la confection des fours solaires : les fours paraboliques, les fours à panneaux et les fours de modèle « boîte ». Ils se conforment aux principes de base de la transformation du rayonnement en chaleur, de conservation de la chaleur et d'augmentation de l'énergie. [20] On distingue trois formes principales de fours solaires :

I.3.1. Fours solaires à Panneaux :

Les panneaux de cet équipement sont fabriqués à partir de morceaux de carton recouverts d'une pellicule d'aluminium pour renvoyer la lumière. Ces panneaux, qui concentrent approximativement les rayons solaires sur un récipient souvent positionné sous un bol en plastique transparent, génèrent un effet de serre, réchauffant l'eau à plus de 65 °C. [21]

Cet appareil (Figure. I.2) contient aussi un récipient noir situé dans un sac en plastique qui est surmonté d'une plaque de verre et de plusieurs panneaux réfléchissants plats. Dans cette cuisinière à panneaux, on fusionne les concepts de concentration du rayonnement solaire et d'effet de serre. Le sac fonctionne comme un conteneur, renvoyant les rayons solaires et augmentant la température pour la cuisson des aliments. [22, 23]



Figure I.2 : illustration illustrant un cuiseur solaire a panneaux

I.3.2. Four solaire de type boîte :

À l'inverse du four parabolique, le modèle « boîte » est celui qui connaît la plus grande popularité. Il est constitué d'un couvercle transparent positionné au-dessus d'une boîte dont l'intérieur est recouvert de réflecteurs. Le rayonnement traverse la boîte avant d'être renvoyé vers une surface à l'intérieur du conteneur, où il est ensuite absorbé. Le concept de l'effet de serre offre la possibilité de séparer l'intérieur du four de son environnement extérieur, permettant ainsi de retenir le maximum de chaleur grâce au couvercle transparent. Il arrive que ce couvercle soit composé d'un ou plusieurs réflecteurs agencés pour optimiser la radiation solaire. En comparaison avec les fours solaires paraboliques, les exigences en matière d'énergie sont habituellement moindres, conduisant à des temps de cuisson prolongés. D'après le modèle, la température maximale que peut atteindre le four se situe entre 150 °C et 200 °C. Les fours solaires en forme de « boîte » ont l'atout d'être plus faciles à produire, de nécessiter un espace réduit et de fonctionner même avec des capacités diminuées [20]. Cet appareil spécifique (Figure I.3) est constitué d'un ou plusieurs panneaux réfléchissants plats qui focalisent la lumière du soleil sur le contenant. Le cuiseur en boîte se base sur le principe essentiel de l'effet de serre. Les faisceaux lumineux qui traversent le verre d'une boîte isolée réchauffent progressivement le conteneur noir. La méthode peut être assimilée à une cuisson en étuvée ou à une cuisson dans un four électrique ou alimenté au gaz. [22, 23]



Figure I.3: Illustration d'un cuiseur solaire type boîte

I.3.3. Cuiseur solaire parabolique :

Le design parabolique de l'appareil sert à focaliser tous les faisceaux lumineux sur la zone où le plat est placé. La force nécessaire dépend de la dimension du plat ; par exemple, un plat de 1,4 mètre de diamètre peut porter à ébullition plusieurs litres d'eau en une demi-heure, alors que des plats plus imposants comme le four solaire CSP des Pyrénées orientales peuvent atteindre approximativement 350 °C. Toutefois, du fait des températures extrêmes qu'il peut atteindre, son emploi comporte un risque important. Les appareils situés hors du plat constituent un danger additionnel, étant donné que leur puissance accessible peut rapidement se chiffrer en plusieurs centaines de watts, ce qui pourrait entraîner des feux ou des blessures sévères. [21]

Le principe de fonctionnement du cuiseur parabolique repose sur la concentration du rayonnement solaire (Figure I.4). Ces cuiseurs sont composés de disques concaves parabolique qui orientent la lumière solaire vers le fond du réceptacle. L'usage d'un four solaire parabolique consomme une quantité d'énergie comparable à celle d'une plaque de cuisson électrique ou au gaz. On distingue principalement deux catégories de cuiseurs paraboliques : les modèles à contrôle manuel et ceux à contrôle automatique. [22, 23]

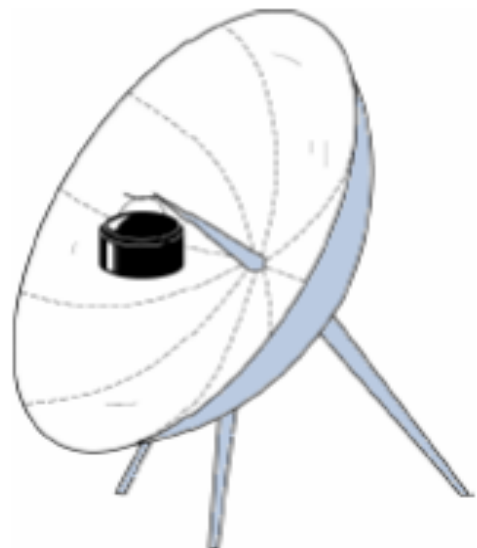


Figure I.4: Diagram montrant un four solaire parabolique

I.4. Cuiseur solaire direct :

I.4.1. Principe des cuiseurs solaires direct

Les cuiseurs solaires directs fonctionnent en transformant directement les rayons solaires en chaleur au niveau du contenant de cuisson. Dans ces appareils, la nourriture est réchauffée directement à l'intérieur de l'appareil, sans recours à un agent intermédiaire. Trois processus essentiels sous-tendent le fonctionnement : l'absorption de la lumière solaire, l'effet de serre et la minimisation des pertes thermiques [24, 25].

Une surface transparente (comme le verre ou le plastique) laisse passer la lumière solaire qui est ensuite absorbée par une surface noire, laquelle transforme l'énergie lumineuse en chaleur. Le phénomène de serre est à même de capturer le rayonnement infrarouge à l'intérieur du cuiseur, ce qui rehausse la température interne. L'isolation thermique réduit les pertes par conduction et convection, optimisant ainsi l'efficacité globale [24].

1.4.2 Avantages des systèmes de cuisson directe

Les cuiseurs solaires directs offrent plusieurs bénéfices notables. Ils recourent à une source d'énergie renouvelable, sans coût et non polluante, contribuant ainsi à la diminution des émissions de gaz à effet de serre et à la réduction de la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles [25, 26].

Ils sont également faciles à concevoir, abordables et aisément accessibles, surtout dans les régions rurales. La production de ces articles à partir de matières premières locales représente un avantage significatif pour les pays en voie de développement [24].

De plus, ces systèmes permettent de diminuer les risques sanitaires associés à l'usage de combustibles traditionnels, tels que l'exposition aux fumées toxiques, et contribuent à la lutte contre la déforestation [26].

1.4.3 Limites et contraintes des cuiseurs solaires directs

En dépit de leurs atouts, les cuiseurs solaires directs ont quelques contraintes majeures. Ils fonctionnent largement en fonction des conditions météorologiques, particulièrement de la quantité d'ensoleillement disponible. Leurs performances se détériorent considérablement en cas de faible ensoleillement [25, 27].

En outre, ces dispositifs requièrent une utilisation en plein air, ce qui peut engendrer des soucis de commodité et de sûreté pour l'utilisateur. Suivre la trajectoire du soleil représente aussi une limitation opérationnelle [26].

De plus, les températures obtenues, notamment dans les cuiseurs à boîte, demeurent restreintes, ce qui conduit à des durées de cuisson assez étendues. Finalement, l'absence de stockage thermique ou de transmission de chaleur vers un espace intérieur restreint leur flexibilité d'emploi [28].

I.5 Cuiseurs solaires indirects :

Les cuiseurs solaires indirects sont des dispositifs de cuisson qui utilisent l'énergie solaire pour chauffer et cuire les aliments, mais sans exposition directe des aliments aux rayons du soleil. Contrairement aux cuiseurs solaires directs (comme les fours solaires à boîte), ils séparent la captation de la chaleur et la zone de cuisson, souvent via un fluide caloporteur ou un échangeur thermique. [29, 30]

I.5.1 Principe des cuiseurs solaires indirects :

Les cuiseurs solaires indirects fonctionnent en séparant la captation de l'énergie solaire de la zone de cuisson, contrairement aux cuiseurs directs (comme les fours solaires à boîte ou à panneaux). Leur principe repose sur trois étapes clés :

a. Captation et concentration de la chaleur solaire :

- Un capteur solaire (parabole, tube sous vide, plaque absorbante) concentre ou absorbe les rayons du soleil.
- La chaleur est transférée à un fluide caloporteur (huile, eau sous pression, air chaud) ou à un solide conducteur (métal, céramique).

b. Transport de la chaleur vers la zone de cuisson :

- La chaleur est acheminée vers un récipient isolé (marmite, plaque chauffante) via :
 - Tuyaux isolés (pour les fluides).
 - Conduction thermique (pour les solides).

- Convection naturelle ou forcée (ventilation, pompe).

c. Cuisson à température stable et contrôlée :

- La chaleur est diffusée progressivement, permettant une cuisson douce (similaire à une mijoteuse).
- La température varie généralement entre 100°C et 200°C, selon le système. [31, 32, 33]

I.5.2 Fluides caloporteurs utilisés dans les cuiseurs solaires :

Les systèmes d'énergie solaire peuvent stocker l'énergie thermique grâce à des dispositifs de cuisson directe ou indirecte, en utilisant des fluides caloporteurs pour transférer la chaleur. Ces fluides jouent un rôle essentiel dans le transfert de chaleur et peuvent également servir de milieu de stockage d'énergie, grâce à leur capacité thermique massique élevée et leur conductivité thermique.

Huiles thermiques : capables de supporter des températures plus élevées que l'eau et les mélanges aqueux

Air ou gaz : le **fluide caloporteur gazeux** (souvent de l'air) est utilisé dans certaines configurations, notamment pour des systèmes à convection naturelle ou active [32, 34, 35].

I.5.3 Modes de circulation du fluide caloporteur :

Tableau I.1 : Comparaison des modes de circulation du fluide caloporteur [36, 37]

Mode de circulation	Principe principal	Nécessite énergie externe ?	Contraintes
Naturelle (Thermosiphon)	Circulation induite par convection due aux différences de densité	Non	Positionnement géométrique requis
Forcée	Circulation par pompe/ circulateur	Oui	Dépend d'une source d'énergie et d'un contrôleur

I.6 Techniques de stockage thermique associées aux cuiseurs solaires :

Le stockage thermique dans les cuiseurs solaires permet de retarder l'utilisation de l'énergie solaire captée pour l'adapter à la demande de cuisson, notamment lorsque le rayonnement est faible (nuages, matin-soir). Les techniques de stockage thermique s'appuient essentiellement sur trois principes principaux :

I.6.1 Stockage par chaleur sensible

Cette méthode consiste à élever la température d'un matériau solide ou liquide sans transformation de phase, tel que le sable ou l'huile. Ces éléments emmagasinent la chaleur pendant l'exposition au soleil et la libèrent lors de la cuisson, ils sont faciles à utiliser et économiques [38].

I.6.2 Stockage par chaleur latente

La chaleur latente est l'énergie mise en jeu lors des changements d'état de la matière. L'utilisation d'un matériau à changement de phase (PCM) pour l'accumulation thermique sous forme de chaleur latente présente un intérêt certain, dans la mesure où il constitue un système de stockage à la fois compact et efficient, grâce à une densité de stockage élevée et au maintien d'une température de fonctionnement stable [39].

I.6.3 Matériaux de stockage thermique utilisez :

Le choix des matériaux pour le stockage thermique de la chaleur solaire est essentiel dans le secteur des énergies renouvelables. Ils doivent absorber, conserver et restituer efficacement la chaleur. Certains matériaux se distinguent par leur efficacité et propriétés uniques.

Matériaux de stockage par chaleur sensible :

- Sable (granulats, pierres)
- Billes ou granulats métalliques (ferrailles, fer, pierre)
- Huiles (huile moteur, huile végétale, huiles synthétiques)
- Liquides comme l'eau

Matériaux de stockage par chaleur latente (PCM)

Tableau I.2 : Quelques PCM utilisés dans les cuiseurs solaires [40].

Matériau PCM	Température de fusion indicative	Notes
Paraffine (cire)	~41–44 °C	PCM organique utilisé dans box solar cookers.
Acide stéarique	~69 °C	PCM organique améliorant l'efficacité.
Erythritol	~117 °C	PCM solide couramment étudié pour stockage solaire.
Nitrate de sodium (sels fondus)	~145 °C	PCM inorganique avec stockage plus élevé.

I.6.4 Limites des systèmes de stockage thermique :

Pertes Thermiques

Les systèmes de stockage thermique présentent d'importantes pertes thermiques, ce qui souligne la nécessité d'intégrer une isolation thermique haute performance pour minimiser ces pertes et maintenir une température adéquate pour une cuisson efficace. Sans une isolation adéquate, ces pertes restent une limitation majeure, souvent coûteuse [41].

Coûts et Complexité

Les systèmes CES (stockage d'énergie thermique à base de matériaux à changement de phase conventionnels) sont coûteux et leur maintenance complexe. Les systèmes de stockage de chaleur sensible sont plus économiques, mais offrent une efficacité énergétique inférieure à celle des matériaux à changement de phase [42].

Limitations des Matériaux de Stockage

Les matériaux utilisés pour le stockage thermique présentent plusieurs défis.

Les matériaux à changement de phase (PCM) offrent une plus grande densité énergétique, mais leur conductivité thermique relativement faible pose un problème significatif pour l'efficacité du transfert de chaleur. Bien que les nanoparticules puissent améliorer les propriétés des PCM, certaines études montrent que leur contribution est insignifiante comparée à d'autres améliorations [43].

I.7 Analyse critique et comparaison des travaux existants :

Cette section vise à comparer de manière critique et comparative des travaux déjà réalisés sur les systèmes de cuisson solaire afin de mettre en lumière leurs contributions, leurs contraintes et les possibilités d'amélioration.

I.7.1 Comparaison des systèmes de cuisson solaire existants :

Les systèmes étudiés dans la littérature peuvent être classés en trois grandes catégories :

1. Cuiseurs solaires directs (type boîte)
2. Cuiseurs solaires à concentration (paraboliques)
3. Cuiseurs solaires indirects avec stockage thermique

Tableau I.3 : Comparaison synthétique des principaux types de cuiseurs solaires

Critère	Direct (boîte)	Parabolique	Indirect avec stockage
Température	Moyenne	Élevée	Stable et contrôlée
Complexité	Faible	Moyenne	Élevée
Coût	Faible	Moyen	Moyen à élevé
Autonomie sans soleil	Faible	Faible	Améliorée
Sécurité	Bonne	Risque élevé	Bonne

Nous constatons que les systèmes indirects sont plus adaptés à une cuisson stable et contrôlée, notamment lorsqu'un système de stockage thermique est intégré. [44]

I.8. Conclusion

Ce chapitre a proposé un état de l'art critique des systèmes de cuisson solaire en passant en revue les principes, performances et limites de chacun d'eux. On observe ainsi un déséquilibre marqué : des travaux de recherche concernent les cuiseurs directs (boîte, panneaux, paraboles), alors que les systèmes indirects, dotés d'avantages décisifs, restent largement sous-explorés. Les cuiseurs à circulation indirecte séparent la zone de captage solaire de la zone de cuisson, ce qui permet d'utiliser le cuiseur à l'intérieur, d'accroître la sécurité et d'avoir une température plus stable. L'utilisation d'un fluide caloporteur en circulation forcée, couplée à des techniques de stockage thermique (chaleur sensible ou latente), semble être une voie prometteuse pour pallier les principales limites actuelles : dépendance aux conditions météorologiques, manque d'autonomie et difficulté à contrôler précisément la cuisson. L'analyse montre toutefois des lacunes importantes : peu d'études concernent les architectures à circulation forcée, l'intégration de matériaux à changement de phase ou la modélisation systématique des pertes thermiques dans les systèmes indirects.

Ces éléments légitiment amplement l'intérêt et l'originalité du présent mémoire consacré à la conception et à l'analyse d'un cuiseur solaire indirect avec caloporteur à circulation forcée.

Chapitre II : Modélisation d'un cuisiseur solaire indirect utilisant un fluide caloporteur

II.1 Introduction :

Le but de ce chapitre est d'élaborer un modèle mathématique qui illustre les divers phénomènes physiques impliqués dans l'opération du système. Ces processus comprennent essentiellement le transfert de chaleur par conduction, convection et rayonnement, ainsi que le mouvement du fluide caloporteur dans un circuit en boucle fermée. On commence par une présentation du système, en mettant en évidence ses divers éléments et leurs fonctions respectives. Par la suite, les suppositions simplificatrices indispensables à la construction du modèle seront présentées.

II.2 Présentation et description du système étudié

II.1.1 Description globale du cuiseur solaire indirect

Le four solaire indirect utilise un fluide caloporteur pour garantir le passage de chaleur entre une source d'énergie solaire externe et une zone de cuisson interne. Ce système fait partie des systèmes solaires thermiques indirects, où l'énergie solaire est d'abord transformée en chaleur avant d'être acheminée vers le lieu de consommation [45].

L'appareil comprend deux parties majeures : une partie extérieure et une partie intérieure. À l'extérieur, un réservoir renferme le fluide caloporteur froid qui est pompé vers un cuiseur solaire de type boîte en hauteur. Ce dispositif est doté d'un vitrage favorisant l'effet de serre et d'une plaque absorbante qui recueille le rayonnement solaire [46].

Deux sources garantissent le chauffage du fluide : l'énergie solaire et une résistance électrique alimentée par un panneau photovoltaïque, qui offre une solution pour pallier les variations du rayonnement solaire. Ce genre de système hybride PV/T contribue à optimiser les performances thermiques totales [47].

À l'intérieur, le fluide chauffé passe à travers un serpentin qui fait office d'échangeur de chaleur. La chaleur est conduite aux aliments, puis le fluide refroidi est collecté dans un réservoir (R2) avant d'être redistribué vers le réservoir d'origine par l'intermédiaire d'une pompe, garantissant ainsi une opération en circuit fermé [48].

II.1.2 Hypothèses de modélisation

Le système est examiné étant donné que ses conditions d'opération sont influencées par l'ensoleillement et les conditions météorologiques [47].

Le fluide caloporteur est considéré incompressible, avec des propriétés thermo physiques constantes [48]. Les échanges thermiques incluent la conduction, la convection et le rayonnement [49]. Les pertes thermiques sont modélisées par un coefficient global de transfert thermique [45].

II.3 Modélisation thermique du système

II.3.1 Bilan énergétique global

Le bilan énergétique global du système s'écrit :

$$Q_{sol} + Q_{elec} = Q_{stock} + Q_{util} + Q_{pert} \quad (II.1)$$

où Q_{elec} représente l'apport de la résistance électrique alimentée par le panneau photovoltaïque. [47].

II.3.2 Bilan thermique du fluide caloporteur

Le chauffage du fluide est modélisé par :

$$m \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{abs} + Q_{elec} - Q_{perte} \quad (II.2)$$

Le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide est donné par :

$$Q = h \cdot A \cdot (T_{abs} - T_f) \quad (II.3)$$

[48]

II.3.3 Modélisation de l'échangeur (serpentin)

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{Lm} \quad (II.4)$$

Cette équation permet de modéliser le transfert thermique entre le fluide et les aliments. [48].

II.3.4 Modélisation de l'écoulement

II.3.4.1 Équation de continuité [50].

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (II.5)$$

II.3.4.2 Équation d'énergie : [48].

$$\rho \cdot C_p \cdot \left(\frac{dT}{dt} + V \cdot \nabla T \right) = k \cdot \nabla^2 T + Q \quad (II.6)$$

II.4 Modélisation du transfert thermique dans le serpentín (partie intérieure)

Le serpentín qui se trouve en position intérieure, à l'emplacement correspondant du réservoir R2, reçoit de l'huile chaude du réservoir et cède de la chaleur à la casserole cuisant les aliments soit par convection, soit par conduction.

II.4.1 Échange thermique entre le fluide et le serpentín

Considérons une longueur élémentaire dx du serpentín. Le bilan énergétique du fluide (huile) s'écrit, en régime variable, comme suit (inspiré des équations de transfert de chaleur) [47].

$$\dot{m}_h C_{p,h} \frac{\partial T_h(x,t)}{\partial x} dx = U_{tube-h} \pi D_{int} dx (T_{tube}(x,t) - T_h(x,t)) \quad (\text{II.7})$$

Ce coefficient U_{tube-h} dépend du régime d'écoulement (laminaire ou turbulent) et des propriétés de l'huile. Pour un écoulement forcé dans un tube circulaire, il est relié au nombre de Nusselt par :

$$U_{tube-h} = \frac{\lambda_h}{D_{int}} Nu \quad (\text{II.8})$$

où λ_h est la conductivité thermique de l'huile (W/(m·K)). La température moyenne de l'huile à la sortie du serpentín est obtenue par intégration de l'équation (II.7) sur toute la longueur L du serpentín.

II.4.2 Transfert thermique entre le serpentín et la casserole de cuisson

La puissance thermique transmise du serpentín vers la casserole intérieure s'effectue à travers la paroi du tube, puis par contact solide-solide. [47] nous écrivons :

$$q_{serp \rightarrow cas2} = U_{contact} A_{contact} (\bar{T}_{tube} - T_{cas2}) \quad (\text{II.9})$$

Le coefficient global de transfert $U_{contact}$ prend en compte trois résistances en série :

$$\frac{1}{U_{contact}} = \frac{1}{h_{huile}} + \frac{e_{tube}}{\lambda_{tube}} + \frac{1}{h_{contact}} \quad (\text{II.10})$$

Cette équation (II.10) est similaire à l'approche utilisée par Simon Prabu et al. (2023) [51]. Pour modéliser le transfert de chaleur entre la résistance et la paroi du récipient de cuisson.

II.5 Modélisation thermique des réservoirs

Le système comporte deux réservoirs de stockage d'huile. Le réservoir extérieur R1, de grande taille, reçoit la chaleur du capteur solaire et de la résistance électrique d'appoint. Le réservoir intérieur R2, plus petit, sert de tampon avant l'envoi de l'huile vers le serpent.

II.5.1 Modélisation du réservoir extérieur (R1)

L'ensemble {casserole extérieure (optionnelle), réservoir R1, huile contenue} est considéré comme un nœud thermique homogène [47]. Pour l'absorbeur, enrichi par l'appoint électrique photovoltaïque et les échanges avec l'huile :

$$(\mathbf{m}_{R1}C_{R1} + \mathbf{m}_{h,R1}C_{p,h})\frac{dT_{R1}}{dt} = \alpha_{eff}A_{cap}I(t) + P_{PV}(t) - U_{pertes,ext}A_{ext}(T_{R1} - T_{amb}) - \dot{m}_{grav}C_{p,h}(T_{R1} - T_{R2}) \quad (\text{II.11})$$

Le débit gravitaire $\dot{m}_{grav}$ dépend de la différence de hauteur entre les réservoirs, de la différence de température et des pertes de charge. En première approximation, on peut le considérer constant ou le modéliser par une loi de type $\dot{m}_{grav} = k\sqrt{\Delta T}$.

II.5.2 Modélisation du réservoir intérieur (R2)

Le réservoir R2 reçoit l'huile chaude par gravité depuis R1 et l'envoie vers le serpent via une pompe. Le bilan énergétique s'écrit [47] :

$$\mathbf{m}_{R2}C_{R2}\frac{dT_{R2}}{dt} = \dot{m}_{grav}C_{p,h}(T_{R1} - T_{R2}) - U_{pertes,int}A_{int}(T_{R2} - T_{indoor}) - \dot{m}_{pompe}C_{p,h}(T_{R2} - T_{serp,out}) \quad (\text{II.12})$$

Avec:

- $T_{serp,out}$: température de l'huile à la sortie du serpent.

La température de sortie du serpent est reliée à la température d'entrée T_{R2} par le bilan global de l'échangeur :

$$T_{serp,out} = T_{R2} - \frac{U_{contact}A_{contact}}{\dot{m}_{pompe}C_{p,h}}(\bar{T}_{tube} - T_{cas2}) \quad (\text{II.13})$$

II.6 Évaluation des performances thermiques du système

II.6.1 Définition du rendement thermique

Le rendement thermique instantané compare la puissance utile (chauffage des deux casseroles) à la puissance solaire totale augmentée de l'appoint électrique [47] et sur la définition du rendement [51]. Nous avons :

$$\eta_{th}(t) = \frac{q_{utile}(t)}{q_{solaire}(t) + q_{elec}(t)} \quad (II.14)$$

La puissance utile est la somme des puissances absorbées par la casserole extérieure (si elle est chauffée directement) et par la casserole intérieure :

$$q_{utile}(t) = m_{eau1} C_{p,e} \frac{dT_{cas1}}{dt} + m_{eau2} C_{p,e} \frac{dT_{cas2}}{dt} \quad (II.15)$$

La puissance solaire captée s'exprime par :

$$q_{solaire}(t) = \alpha_{eff} A_{cap} I(t) \quad (II.16)$$

La puissance électrique d'appoint est :

$$q_{elec}(t) = P_{PV}(t) \quad (\text{si batterie disponible}) \quad (II.17)$$

II.6.2 Expression du rendement global du cuiseur solaire

Sur une durée de cuisson $\Delta t = t_f - t_0$, le rendement global intègre les énergies utiles et les apports totaux. Il est défini par :

$$\eta_{global} = \frac{\int_{t_0}^{t_f} q_{utile}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_f} [\alpha_{eff} A_{cap} I(t) + P_{PV}(t)] dt} \quad (II.18)$$

Soit, en fonction des élévations de température mesurées expérimentalement :

$$\eta_{global} = \frac{m_{eau1} C_{p,e} (T_{cas1,f} - T_{cas1,0}) + m_{eau2} C_{p,e} (T_{cas2,f} - T_{cas2,0})}{\int_{t_0}^{t_f} \alpha_{eff} A_{cap} I(t) dt + \int_{t_0}^{t_f} P_{PV}(t) dt} \quad (II.19)$$

Cette expression est analogue à celle utilisée par Simon Prabu et al. (2023) pour calculer l'efficacité de leur cuiseur solaire avec stockage par matériau à changement de phase (ils ont obtenu 38% avec l'huile de coco). Dans notre cas, le rendement global dépendra des performances du capteur, de l'isolation des réservoirs et de l'efficacité du serpent.

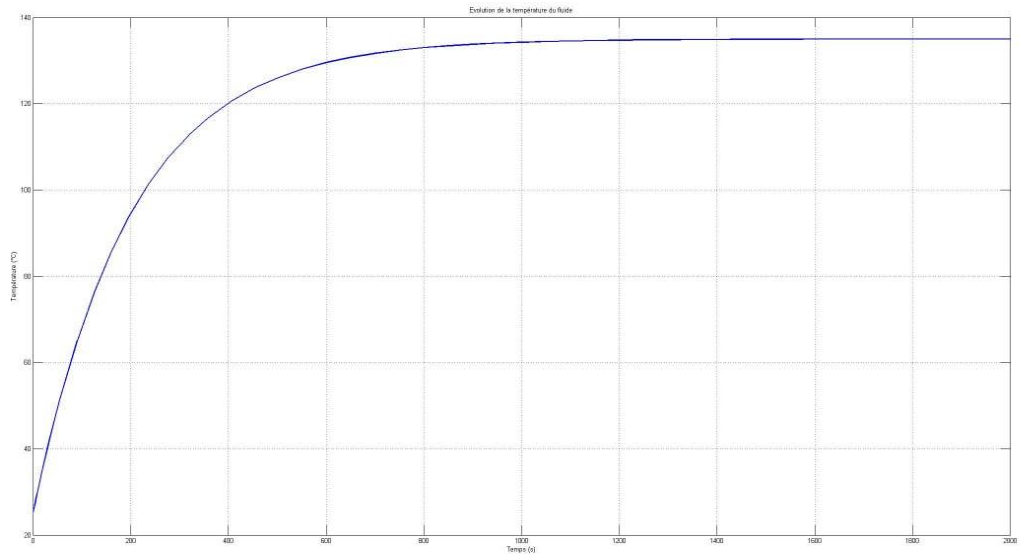


Figure II.1 : Variation de la température du fluide caloporteur au cours du temps

Commentaire :

La courbe indique que la température du fluide caloporteur augmente progressivement au fil du temps, grâce à l'énergie fournie par le capteur solaire et la résistance électrique. Au bout d'un certain temps, la température tend à se stabiliser, ce qui indique un équilibre entre l'énergie fournie, les pertes thermiques et la chaleur transférée vers la zone de cuisson.

II.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons élaboré un modèle thermique et énergétique du cuiseur solaire indirect pour représenter les divers phénomènes physiques qui se produisent lors de l'opération du système. Le bilan énergétique du fluide caloporteur, du serpentin et des réservoirs a conduit à la formulation des équations régissant les échanges thermiques et le transfert de chaleur au sein du système.

Ce modèle souligne l'impact de plusieurs facteurs clés, comme l'ensoleillement, le flux du liquide, l'isolation thermique et le complément électrique photovoltaïque, sur l'efficacité globale du cuiseur. Les équations formulées servent de fondement théorique crucial pour l'examen des résultats expérimentaux et l'amélioration de l'efficacité du système dans les chapitres à venir.

Conclusion Générale :

Ce mémoire porte sur la conception et l'évaluation expérimentale d'un cuiseur solaire indirect à fluide caloporteur adapté aux conditions climatiques de la région d'Ouargla. L'idée principale était de fournir une option différente par rapport aux cuiseurs solaires directs traditionnels, en optimisant le confort d'emploi, la sécurité et la régularité thermique grâce à une cuisson interne et un mécanisme de transfert de chaleur indirect.

La revue de la littérature menée dans le premier chapitre a démontré que la plupart des travaux de recherche se focalisent essentiellement sur les cuiseurs solaires directs, tandis que les systèmes indirects, malgré leurs multiples bénéfices, sont encore assez peu explorés. Cette étude a souligné l'importance tant scientifique que pratique de l'élaboration d'un système s'appuyant sur un fluide caloporteur associé à un stockage thermique.

Le chapitre deux a permis de créer un modèle thermique du système examiné en détaillant les processus de transfert thermique, le mouvement du fluide caloporteur et l'efficacité énergétique du cuiseur. Les équations élaborées fournissent une base théorique cruciale pour saisir le fonctionnement général de l'appareil et étudier les paramètres qui affectent son efficacité.

Le troisième chapitre présente une procédure expérimentale minutieusement élaborée pour juger du rendement du système dans des conditions météorologiques réelles. Plusieurs configurations expérimentales ont été examinées, y compris l'emploi de matériaux thermiques de stockage, la combinaison avec le photovoltaïque et l'incorporation d'un circuit de fluide caloporteur.

Les conclusions expérimentales exposées dans le chapitre quatre ont démontré que les matériaux de stockage thermique, notamment les pierres locales, contribuent à renforcer la stabilité thermique et à prolonger la rétention de chaleur. Les tests d'hybridation photovoltaïque ont aussi montré l'importance d'un soutien électrique pour pallier les variations de la lumière solaire et optimiser l'efficacité du système. Finalement, le test du prototype indirect à travers un fluide caloporteur a validé la possibilité de transférer la chaleur vers une zone de cuisson intérieure.

Bien que des résultats prometteurs aient été obtenus, il persiste certaines restrictions, y compris les déperditions thermiques, la circulation limitée du fluide et les défis associés à l'isolation thermique du système. Des progrès ultérieurs pourraient être envisagés, comme l'emploi de

matériaux à changement de phase (PCM), la perfection du serpentin, le renforcement de l'isolation et l'automatisation de la gestion thermique.

Pour conclure, cette recherche démontre que le cuiseur solaire indirect utilisant un fluide caloporteur est une option porteuse d'espoir pour les zones fortement ensoleillées telles que le Sahara algérien. Cette technologie peut favoriser la diminution de l'utilisation des énergies fossiles et l'élaboration de dispositifs de cuisson écologiques, durables et correspondant aux exigences domestiques.

References:

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*, IEA Publications, Paris, France, 2023. DOI: 10.1787/3a469970-en.
- [2] E. Cuce and P. M. Cuce, "A comprehensive review on solar cookers," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399–1421, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.09.002.
- [3] F. Yettou, A. Gama, B. Azoui *et al.*, "Experimental investigation and thermal modelling of box and parabolic type solar cookers," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, p. 043702, 2018.
- [4] C. W. Adihou, G. Chidikofan, M. Kple *et al.*, "Experimental and Comparative Study of Two Solar Cookers: Box Cooker and Parabolic Cooker," *ASEAN Engineering Journal*, 2025.
- [5] A. Dhiman and G. Sachdeva, "Experimental investigation of an indirect-type solar cooker for indoor cooking based on a parabolic dish collector," *Heat Transfer*, vol. 52, no. 1, pp. 378–394, 2023.
- [6] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*, IEA Publications, Paris, France, 2023. DOI: 10.1787/3a469970-en.
- [7] World Health Organization, *Household Air Pollution and Health: Fact Sheet*, Genève, Suisse, 2022. Disponible sur : [WHO Fact Sheet](#)
- [8] M. Benzerga, B. Draoui, and B. Benyoucef, "Assessment of solar radiation potential in the Saharan region: Case of Ouargla, Algeria," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 756–761, 2020. DOI : 10.1016/j.egyr.2020.01.016.
- [9] E. Cuce and P. M. Cuce, "A comprehensive review on solar cookers," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399–1421, 2013. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.09.002.
- [10] N. Kumar, S. Chavhan, and G. Vishwanath, "Design, development and performance evaluation of an indirect type solar cooker for indoor cooking," *Solar Energy*, vol. 224, pp. 1268–1279, 2021. DOI : 10.1016/j.solener.2021.06.080.
- [11] S. Rezzag and F. Z. Dine, *Généralités sur les Cuiseurs Solaires*, Université de Ghardaïa. Disponible sur : [Université de Ghardaïa](#)
- [12] *Investigation expérimentale pour la réalisation d'un cuiseur solaire à réflecteur composé (CPC) avec tube sous vide*, Université de Ghardaïa. Disponible sur : Mémoire PDF
- [13] F. Yettou, A. Gama, A. Malek, and B. Azoui, "Experimental investigation and thermal modelling of box and parabolic type solar cookers," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 10, no. 4, p. 043702, 2018.
- [14] I. Purohit, "Instrumentation error analysis of a paraboloid concentrator type solar cooker," *Energy for Sustainable Development*, vol. 13, no. 4, pp. 255–264, 2009.

- [15] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th ed., John Wiley & Sons, 2002.
- [16] B. Norton, *Harnessing Solar Heat*, Springer, 2013. DOI : 10.1007/978-94-007-7275-5.
- [17] K. A. Joudi and S. M. Madhi, “An experimental and computational study of the heat loss from a solar cooker,” *Solar Energy*, vol. 38, no. 2, pp. 97–107, 1987. DOI : 10.1016/0038-092X(87)90034-2.
- [18] 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.
- [19] S. C. Mullick, T. C. Kandpal, and A. K. Saxena, “Thermal test procedure for box-type solar cookers,” *Solar Energy*, vol. 57, no. 5, pp. 353–360, 1996. DOI : 10.1016/S0038-092X(96)00105-2.
- [20] K. Lentswe, A. Mawire, P. Owusu, and A. Shobo, “A review of parabolic solar cookers with thermal energy storage,” *Heliyon*, vol. 7, no. 10, e08226, 2021. DOI : 10.1016/j.heliyon.2021.e08226.
- [21] Bolivia Inti - Sud Soleil, “Bolivia Inti - Sud Soleil.” Disponible sur : [Bolivia Inti - Sud Soleil](#)
- [22] Solar Cookers International, “Solar Cookers International.” Disponible sur : [Solar Cookers International](#)
- [23] ID Cook, *ID Cook, le spécialiste de la cuisson solaire*, 2011. Disponible sur : [ID Cook](#)
- [24] M. El-Bassam, *Handbook of Renewable Energy Technology*, 2011.
- [25] V. P. Sethi, “Principle of Operation of Solar Cooker,” *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2012.
- [26] S. Saxena and J. K. Kaushik, “Solar Box Cooker: A Review,” *International Journal of Research and Analytical Reviews*, 2018.
- [27] G. C. Mani and A. N. Kumar, “Solar Cooker: A Review,” *International Journal of Science and Research*, 2019.
- [28] P. Gorrie *et al.*, “Experimental Analysis of a Solar Cooker Using a Box Cooker and Parabolic Concentrator,” *Energy Procedia*, 2017.
- [29] Saxena, A., Varun, & Pandey, S. P. (2011). A technological review on solar cookers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3301–3318.
- [30] Harmim, A., Boukar, M., & Amar, M. (2010). Experimental investigation of a solar cooker with heat storage system. *Renewable Energy*, 35(11), 2515–2521.
- [31] “A review of parabolic solar cookers with thermal energy storage” Article scientifique. ScienceDirect
- [32] “Understanding Solar Cookers And Ovens” — Ressource technique libre

- [33] Thermal Performance Analysis of an Indirect Solar Cooker Using a Graphene Oxide Nanofluid
- [34] Analysis of energy storage materials for developments in solar cookers (revue scientifique en libre accès).PMC
- [35] Han Wang et al. (2024). Thermal Performance Analysis of an Indirect Solar Cooker Using a Graphene Oxide Nanofluid. *Sustainability*, 16(6), 2539
- [36] bucket.theses-algerie.com/files/repositories-dz/2546540889040635.pdf
- [37] “International Journal of Low-Carbon Technologies.” Disponible sur : [Oxford Academic Article](#)
- [38] “Energies Journal Article.” Disponible sur : [MDPI Energies](#)
- [39] Melle Hermime Nora, Contribution à l'étude du comportement thermique d'un cuisEUR solaire boîte installé dans le Nord de l'Algérie, Mémoire de Master en Génie Mécanique, 2012/2013.
- [40] “Advances in Indoor Cooking Using Solar Energy with Phase Change Material Storage Systems.”
- [41] B. Zoukarh *et al.*, “Innovative Smart, Autonomous, and Flexible Solar Photovoltaic Cooking Systems with Energy Storage: Design, Experimental Validation, and Socio-Economic Impact,” *Energies*, vol. 19, no. 2, 2026. DOI : 10.3390/en19020408.
- [42] M. Sivaramakrishnaiah *et al.*, “Nano-thermal energy storage system for application in solar cooker,” *International Journal of Low-Carbon Technologies*, 2024. DOI : 10.1093/ijlct/ctae096.
- [43] H. Swarnkar, R. Jain, A. Tiwari, and H. Vasnani, “Phase change material application in solar cooking for performance enhancement through storage of thermal energy: A future demand,” *World Journal of Advanced Engineering Technology and Sciences*, vol. 12, no. 1, 2024. DOI : 10.30574/wjaets.2024.12.1.0239.
- [44] “Energies Journal Article.” Disponible sur : [MDPI Energies 2026](#)
- [45] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Wiley, 2013.
- [46] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*, 2nd ed., Academic Press, 2014.
- [47] S. Attyaoui, C. Ali, K. Rabhi, F. Nasri, and H. Ben Bacha, “Experimental Investigation and Modelling of a PV/T Solar Cooker,” *International Review of Mechanical Engineering*, vol. 6, no. 7, pp. 1632–1637, 2012.
- [48] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman, and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 7th ed., Wiley, 2011.
- [49] Y. A. Çengel, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, McGraw-Hill, 2015.

- [50] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed., McGraw-Hill, 2016.
- [51] Simon Prabu, A., Chithambaram, V., Anto Bennet, M., Shanmugan, S., Janarthanan, B. (2023). Performance of solar cooker with evacuated tubes and photovoltaic panels with phase change materials. *Energy Efficiency*.
- [52] Université de Ghardaïa, « Document pédagogique sur la région d'Ouargla », 2012.
- [53] Wikipédia, « Ouargla (wilaya) », page consultée en 2026. [En ligne]. Disponible sur: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouargla_\(wilaya\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouargla_(wilaya))
- [54] Wikipédia, « Ouargla (ville) », section altitude. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Ouargla>
- [55] Direction du Tourisme et de l'Artisanat d'Ouargla, « Présentation de la wilaya », site officiel.
- [56] D. Zaoui, et al., “Caractérisation hydrogéologique du bassin de Ouargla,” *Revue des Sciences de l'Eau*, vol. 32, no. 2, pp. 145-158, 2018.
- [57] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Wiley, 2013, chapitre 1.
- [58] [Climate-Data.org](https://fr.climate-data.org). Clima Ouargla (Algeria). Disponible sur : <https://fr.climate-data.org> – page consultée en mai 2026.
- [59] B. Dokkar, et al., “Daily radiation of tilted plane at fixed angle,” [Academia.edu](https://www.academia.edu), 2012.
- [60] [Climate-Data.org](https://fr.climate-data.org). Clima Ouargla (Algeria). Disponible sur : <https://fr.climate-data.org> – page consultée en mai 2026.
- [61] A. M. Sadeq, *Energy Storage Systems: A Comprehensive Guide*, Qatar Naval Academy, 2023.
- [62] L. Socaciu, “Seasonal thermal energy storage concepts,” *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 55, pp. 775–784, 2012.
- [63] Culture Ouargla. Disponible sur : https://www.mcultureouargla.com/index.php?option=com_content&view=article&id=392&Itemid=303
- [64] Tutiempo Network. “Climat Janvier 2021 – Ouargla.” Disponible sur : <https://fr.tutiempo.net/climat/01-2021/ws-605800.html> – page consultée en mai 2026.
- [65] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed., Wiley, 2013.
- [66] A. Benbaha, F. Yettou, A. Gama, B. Azoui, “Experimental Comparison of a Hybrid Solar Cooker and a Conventional Solar Cooker Under Algerian Sahara Conditions,” *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 2025. Disponible sur : ResearchGate.

- [67]** A. M. Sadeq, *Energy Storage Systems: A Comprehensive Guide*, Qatar Naval Academy, 2023 (données publiées pour les matériaux de stockage sensible).
- [68]** Abdellatif M. Sadeq. *Energy Storage Systems: A Comprehensive Guide*. Qatar Naval Academy, 2023.
- [69]** M. A. Mollah et al., 2022 (article – stockage par roches) ; K. Lentswe et al., 2021 (revue sur cuiseurs solaires).
- [70]** Lentswe, K., Makhura, O., & Madyira, D. « Experimental investigation of rock-based thermal energy storage for off-grid solar cooking ». *Journal of Energy Storage*, vol. 40, 2021, 102789.
- [71]** Sharma, A., Tyagi, V. V., Chen, C. R., & Buddhi, D. « Review on thermal energy storage with phase change materials and applications ». *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, n° 2, 2009, pp. 318-345.