

République Algérienne Démocratique populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication et de
Conversion Photovoltaïque



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle LMD en Electronique

Thème

Contribution à l'optimisation des paramètres d'un capteur thermodynamique photovoltaïque avec poursuite solaire.

Présenté par :

TOUABA Oussama

Master en Electronique de l'Université

Frères Mentouri Constantine

Sous la Direction de : Pr. Mohamed Salah Ait Cheikh

Présenté(e) et soutenue publiquement le (14/07/2021)

Composition du Jury :

Président	M .Mourad HADDADI	Professeur ENP
Promoteur	M .Mohamed Salah AIT CHEIKH,	Professeur ENP
Examineur	M .Cherif LARBES,	Professeur ENP
Examineur	M .Hocine BELMILI,	Docteur UDES
Examinatrice	Mme .Linda HASSAINE,	Docteur CDER

République Algérienne Démocratique populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



Ecole Nationale Polytechnique
Département d'Electronique
Laboratoire des Dispositifs de Communication et de
Conversion Photovoltaïque



Thèse de Doctorat 3^{ème} cycle LMD en Electronique

Thème

**Contribution à l'optimisation des paramètres d'un capteur thermodynamique
photovoltaïque avec poursuite solaire.**

Présenté par :

TOUABA Oussama

Master en Electronique de l'Université

Frères Mentouri Constantine

Sous la Direction de : Pr. Mohamed Salah Ait Cheikh

Présenté(e) et soutenue publiquement le (14/07/2021)

Composition du Jury :

Président	M .Mourad HADDADI,	Professeur ENP
Promoteur	M .Mohamed Salah AIT CHEIKH,	Professeur ENP
Examineur	M .Cherif LARBES,	Professeur ENP
Examineur	M .Hocine BELMILI,	Docteur UDES
Examinatrice	Mme .Linda HASSAINE,	Docteur CDER

ENP-2021

ملخص:

في هذا العمل ، تم اقتراح نظام جديد لسخان المياه بالطاقة الشمسية. يستخدم المجمع الحراري الشمسي ذو اللوحة المسطحة زيت المحرك المستخدم كمتص وسائل نقل الحرارة ، وهو مجهز بنظام كهروضوئي وجهاز تعقب شمسي متحكم به لجمع أكبر قدر من الإشعاع الشمسي. وقد تم إدماج نظام كهروضوئي لتشغيل الأجهزة الكهربائية المختلفة في النظام (نظام التحكم الإلكتروني ، مضخة الزيت ، إلخ). أظهرت الاختبارات التجريبية المختلفة التي أجريت في ظروف مناخية حقيقية في تيبازة الواقعة على الساحل الجزائري ، فعالية هذا النظام. كما يمكن تلبية احتياجات الماء الساخن للأسر في الشتاء. وبالفعل ، كانت النتائج مرضية للغاية حيث وصل النظام إلى درجة حرارة تسخين مقبولة ، 50 درجة ، في أقل من ثلاث ساعات ؛ بمتوسط كفاءة تسخين تبلغ 65٪ معدل تقارب بينما تصل كفاءتها القصوى إلى 80٪. بالإضافة إلى ذلك ، يمكن أن يعمل النظام بالكهرباء المحلية كمصدر مساعد مخصص في حالة عدم وجود ضوء الشمس (الظروف المناخية ، السماء الملبدة بالغيوم أو الليل) بجهاز تحكم آلي.

كلمات مفتاحية: سخان المياه الشمسي؛ زيت محرك المستنفذ؛ سائل الامتصاص ونقل الحرارة؛ التجريب.

ABSTRACT

In this work, a new solar water heater system is proposed. Its flat plate solar thermal collector uses both used engine oil as absorber and heat transfer fluid, and it is equipped with a photovoltaic system and a controlled solar tracker to maximize the collected solar irradiation. A photovoltaic system is designed and incorporated to supply the various electrical devices in the system (electronic control system, oil pump, etc.). The various experimental tests carried out in real climatic conditions in Tipaza, located on the Algerian coast, have shown that this system is effective; it can meet the hot water needs of households in winter. Indeed, the results were very satisfactory since the system reached an acceptable heating temperature, 50 °C, in less than three hours; with an average heating efficiency of 65% convergence rate while its maximum efficiency reaches 80%. In addition, the system can operate with domestic electricity as a designated auxiliary source in the absence of sunlight (climatic conditions, cloudy sky or night) with an automatic control device.

Keywords: Solar water heater, Waste engine oil, Absorber and Working Fluid, PV Plant, Controller MPPT, Experimentation

Résumé

Dans ce travail, un nouveau système de chauffe-eau solaire est proposé. Son collecteur solaire thermique à plaques plates utilise à la fois de l'huile moteur usée comme absorbeur et fluide caloporteur, et il est équipé d'un système photovoltaïque et un suiveur solaire contrôlé pour maximiser l'irradiation solaire collectée. Un système photovoltaïque est conçu et incorporé pour alimenter les différents appareils électriques du système (système de contrôle électronique, pompe à huile, etc.). Les différents tests expérimentaux réalisés dans les conditions climatiques réelles de Tipaza, situé sur la côte algérienne, ont montré que ce système est efficace; il peut répondre aux besoins en eau chaude des ménages en période hivernale. En effet, les résultats ont été très satisfaisants puisque le système atteint une température de chauffe acceptable, 50 °C, en moins de trois heures; avec une efficacité de chauffage moyenne de 65% de convergence du taux tandis que son efficacité maximale atteint 80%. De plus, le système peut fonctionner avec l'électricité domestique comme source auxiliaire désignée en cas d'absence de soleil (conditions climatiques, ciel nuageux ou nuit) avec un dispositif de contrôle automatique.

Mots-clés: chauffe-eau solaire; Déchets d'huile moteur; Absorbeur et fluide de travail, système PV, MPPT, Expérimentation

Remerciements

En avant-propos à cette thèse j'exprime ma profonde gratitude à ALLAH tout puissant de m'avoir accordé la force, la patience et les moyens afin de pouvoir accomplir ce travail et le courage durant ces longues années d'études.

*Je tiens tout particulièrement à témoigner ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse Professeur AIT- **CHEIKH Mohamed Salah**, au département Électronique de l'École Nationale Polytechnique, qui a dirigé ce travail, pour son aide et tous ses conseils objectifs et ses encouragements.*

Mes sincères remerciements vont également aux membres de jury :

*Le **Pr. HADDADI Mourad (ENP)** d'avoir accepté de présider le jury, je suis très sensible à l'intérêt qu'il a manifesté à l'égard de ce travail.*

*Le **Pr. LARBES Chérif (ENP)**, pour l'intérêt particulier qu'il a porté à ce travail et d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde sympathie.*

*Le **Dr HASSAINE Linda (DR, CDER)** et le **Dr BELMILI Hocine (DR, UDES)** d'avoir bien voulu accepter d'examiner ce travail,*

*A tous ceux qui m'ont orienté et guidé dans mes recherches notamment les **Dr. KAIDI Kamel, Dr. ZIANE Abderrezzaq, Dr. NECAIBIA Ammar, Dr. BOURAIYOU Ahmed et Dr. SLIMANI Mohamed El-Amine** pour leurs précieuses collaborations.*

Je tiens à remercier particulièrement l'ensemble de l'équipe de bioconversion de la division photovoltaïque de l'URERMS, d'Adrar. Enfin, à tous ceux qui ont collaboré de près ou de loin dans ce travail.

MERCI

Dédicace

A Mon père et ma mère

A mon épouse et mes deux enfants

A toute ma famille

« Je vous dois plus que cette vie »

Sommaire

Liste des Figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction générale 12

Partie 1 :

Chauffe-eau solaire : généralité, Systèmes solaires, systèmes de chauffe-eau solaire et caractérisation

Chapitre 1: État de l'art sur les systèmes de chauffe-eau solaire 17

1.1 Introduction..... 18

1.2 Réalisation selon différentes études..... 18

1.3 Evolution de l'efficacité des capteurs solaire 19

1.4 Conclusion..... 20

Chapitre 2: Systèmes solaires 21

2.1 Introduction 23

2.2 L'énergie solaire 23

2.3 Voies d'utilisation de l'énergie solaire 28

2.4 Système de chauffe-eau solaire 33

2.5 Composants du chauffe-eau solaire 34

2.6 Conclusion 39

Partie 2:

Réalisation et résultats: description technique, Caractéristiques, modélisation, et validation expérimental

Chapitre 3: Prototype Proposé 41

3.1 Introduction 42

3.2 Description de l'idée proposée du système 43

3.3	Description technique du prototype	45
3.4	Mode de fonctionnement	50
3.5	Caractéristiques de l'huile usagée	52
3.6	Modèle physique et formulation mathématique	54
3.7	Simulation et Modélisation du circuit électrique du prototype.....	57
3.8	Sites d'expérimentation	68
3.9	Conclusion	70
Chapitre 4: Validation expérimentale		72
4.1	Introduction.....	72
4.1	Mesure et résultats expérimentaux	72
4.2	Test de prototype sans eau	74
4.3	Test de prototype avec de l'eau	77
4.4	Température de l'eau et de l'huile	80
4.5	Effet de l'irradiation solaire sur la température de l'eau	81
4.6	Caractéristiques du système pour l'eau de chauffage solaire par rapport à l'eau de chauffage électrique	81
4.7	Pertes thermiques en nuit	85
4.8	Conclusion	86
Conclusion générale		87
References.....		89
Annexes I		
Article publié		
Annexes II		
Article conférence		

Liste des Tableaux

Tableau 2.1	Régions du spectre solaire	24
Tableau 2.2	potentiel de l'énergie solaire en Algérie [15]	27
Tableau 3.1	Paramètres de conception des dimensions du système et des panneaux thermiques	46
Tableau 3.2	Classifications de viscosité des huiles moteur	53
Tableau 3.3	Équations d'équilibre de transfert de chaleur pour le système [52]	54
Tableau 3.4	Mesure mensuelle des paramètres météorologiques moyens à Bousmail (2016)	69

Liste des Figures

Fig. 2.1	Le soleil [29]	24
Fig. 2.2	Les différentes composantes du rayonnement solaire [33]	25
Fig. 2.3	Pyrhéliomètre pour la mesure du rayonnement direct [34]	26
Fig. 2.4	Pyranomètre ombré pour la mesure du rayonnement diffus [35]	26
Fig. 2.5	Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global [36]	26
Fig. 2.6	Irradiation horizontale globale de l'Algérie [40]	27
Fig. 2.7	Voies de conversion de l'énergie solaire	28
Fig. 2.8	Centrales à énergie solaire à concentration [44]	29
Fig. 2.9	parking solaire réalisé au niveau de l'URER-MS Adrar [46]	30
Fig. 2.10	prototype d'un voiture électrique algérienne	31
Fig. 2.11	prototype d'un robot mobile solaire[48].....	31
Fig. 2.12	prototype d'un voiturette solaire [49].....	33
Fig. 2.13	Composants du chauffe-eau solaire.....	34
Fig. 2.14	Collecteur solaire à plaque plate	35
Fig. 2.15	Collecteur à tube sous vide	36
Fig. 2.16	Collecteur à concentrateur parabolique.....	37
Fig. 2.17	Collecteur cylindro-parabolique.....	38
Fig. 2.18	Collecteur d'air à plaque plate [51].....	39
Fig. 3.1	Diagramme des composants globaux du système [52].....	44
Fig.3.2	Principaux composants du prototype: (1) Canalisation d'huile ; (2) Entrée d'huile ; (3) Panneau photovoltaïque de 25W ; (4) Huile moteur usagée ; (5) Cadre en aluminium; (6) Sortie d'huile ; (7) Réservoir d'eau avec isolation thermique ; (8) Eau ; (9) Échangeur de chaleur en cuivre ; (10) Couche d'isolation thermique ; (11) Chauffage électrique ; (12) Pompe à huile [52].....	45
Fig. 3.3	Le prototype réalisé du chauffe-eau solaire développé [52].....	46
Fig. 3.4	Conception et spécifications du collecteur thermique [52].....	47
Fig. 3.5	principe de fonctionnement de la circulation forcée d'huile.....	48
Fig. 3.6	La pompe à huile installée dans le prototype.....	49
Fig. 3.7	Principaux composants du système de poursuite solaire: (1) support	

	métallique en aluminium ; (2) moteur électrique avec réducteur mécanique ; (3) panneaux photovoltaïques ; (4) capteur optique.....	50
Fig. 3.8	Moteur électrique de suiveur solaire avec réducteur mécanique.....	50
Fig. 3.9	Panneau PV avec collecteur thermodynamique, (A) avec huile et (B) sans huile [52].....	51
Fig. 3.10	Huile usée pour moteurs à combustion.....	52
Fig. 3.11	Circuit équivalent électrique idéal du générateur photovoltaïque.....	58
Fig. 3.12	Circuit électrique équivalent de générateur photovoltaïque (modèle à pertesohmiques.....	59
Fig. 3.13	Circuit électrique équivalent de cellule photovoltaïque (modèle à une diode).....	59
Fig. 3.14	Configuration du champ photovoltaïque.....	60
Fig. 3.15	Bloc global de PV simulateur.....	60
Fig. 3.16	Le modèle détaillé basé sur un modèle à diode.....	61
Fig. 3.17	Simulation des caractéristiques I-V et P-V du module I- 75 W.....	62
Fig. 3.18	Simulation des caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque (N _{ss} = 3, N _{pp} = 2).....	63
Fig. 3.19	Organigramme de gestion de commande électrique	64
Fig. 3.21	Simulation du système électrique	67
Fig. 3.22	Capteur de température utilisé dans le prototype.....	68
Fig. 3.23	l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) (Photo satellitaire).....	69
Fig. 4.1	Le placement des thermocouples dans le système principal.....	71
Fig. 4.2	L'effet de la variation du rayonnement solaire sur la température de l'huile.....	74
Fig.4.3	Une image du prototype, qui est sur le terrain et des expériences appliquées.....	75
Fig. 4.4	L'effet du rayonnement solaire sur le capteur thermique sans échange de chaleur avec l'eau.....	75
Fig. 4.5	L'efficacité du capteur thermique dans des conditions météorologiques appropriées.....	76
Fig. 4.6	Evolution de la température de l'eau et de l'irradiation solaire du système avec réservoir d'eau intégré en septembre.....	77
Fig. 4.7	Evolution de la température de l'eau et de l'irradiation solaire du système avec réservoir d'eau intégré en février.....	78
Fig. 4.8	Evolution de l'efficacité énergétique et thermique en septembre.....	79
Fig. 4.9	Evolution de la puissance et de l'efficacité thermique en février.....	79

Fig. 4.10	La température de l'eau par rapport à la température d'huile d'entrée et de sortie du collecteur	80
Fig. 4.11	Température de l'eau par rapport à l'irradiation solaire: (a) faible jour d'irradiation solaire; (b) journée d'irradiation solaire élevée.....	81
Fig. 4.12	Chauffage solaire contre résistance électrique.....	81
Fig. 4.13	Variation de puissance de l'eau chauffée.....	83
Fig. 4.14	Efficacité thermique dans les deux heures suivant l'irradiation maximale.....	84
Fig. 4.15	Perte d'eau de température en cas d'absence de rayonnement solaire.....	85

Liste des Abréviations

Nomenclature

Acronymes

CPC	Concentrateur Parabolique Composé
DC	Courant Continu
HTF	Fluide de transfert de chaleur
PV	Photovoltaïque

Symboles

C_i	Capacité Calorifique Spécifique ($J. kg^{-1}. K^{-1}$)
D_H	Diamètre hydraulique (m)
l_i	Épaisseur (m)
h_c	Coefficient de transfert de chaleur par conduction ($W. m^{-2}. K^{-1}$)
h_r	Coefficient de transfert de chaleur radiatif ($W. m^{-2}. K^{-1}$)
h_v	Coefficient de transfert de chaleur par convection ($W. m^{-2}. K^{-1}$)
G	Rayonnement solaire global ($W. m^{-2}$)
L	Longueur (m)
W	Largeur (m)
M_i	masse d'un composant i (kg)
\dot{m}	Débit Massique ($kg. s^{-1}$)
Pr	Nombre de Prandtl
n	Nombre de données
Nu	Nombre de Nusselt
$Q_{u,th}$	Puissance thermique utile (W)
S	surface de capteur (m^2)
T	Temperature ($^{\circ}C$)
θ	angle d'inclinaison

t Temps (s)

V Vitesse (m/s)

Symboles grecs

η	Rendement
λ	Conductivité thermique ($W. m^{-1}. K^{-1}$)
τ	Transmissivité
α	Absorptivité
ρ	Densité ($kg. m^{-3}$)
γ	Facteur d'idéalité
ε	Emissivité

Subscripts

a, amb	Ambiant
Af	Fluide en conduite supérieur
C	Cellule solaire, capteur
F	Fluide (air)
Lf	Fluide en conduite inférieur
G	Verre, vitrage, vide
Gc	Couverture vitrée
In	Isolant
P	Plaque
Th	Thermique
U	Utile
W	Vent

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Les sources d'énergie renouvelables jouent un rôle important dans la production d'énergies diverses utilisées par les êtres humains dans le monde [1]. De plus, il y a un intérêt environnemental à travers un développement durable pour minimiser l'impact de la pollution [2];[3]. Une eau, de chauffage solaire, provient d'un appareil qui recueille et utilise l'énergie thermique solaire pour répondre partiellement ou entièrement aux besoins domestiques en eau chaude

Ce type de chauffage est généralement soutenu par d'autres types de systèmes de chauffage qui utilisent d'autres sources d'énergie conventionnelle (électricité, combustibles fossiles, biomasse, etc.) [4]. Sous certaines conditions, lieux isolés, il peut les remplacer complètement. L'énergie solaire étant renouvelable, ce remplacement peut effectivement limiter les émissions de gaz à effet de serre ainsi qu'éventuellement de la production de déchets nucléaires [1]. Le dispositif est généralement composé d'un ou plusieurs capteurs solaires, d'un ballon de stockage et d'un système de circulation du fluide caloporteur, qui transfère la chaleur générée par les capteurs solaires vers le réservoir de stockage. Le type de chauffage solaire le plus utilisé au monde est le chauffe-eau solaire direct [5].

Il semble que le système solaire photovoltaïque / thermique hybride soit une des solutions parmi les plus prometteuses aux problèmes de chauffage de l'eau. Ce travail consiste à utiliser des produits industriels ou domestiques à des fins de développement durable et donc à contribuer à l'environnement écologique. L'étude a ensuite été faite sur un dispositif expérimental d'eau de chauffage, alimenté par l'énergie solaire. L'objectif de ce travail est basé sur une approche innovante qui a prouvé avec succès son efficacité à absorber l'énergie de l'irradiation solaire et à la transférer en chaleur par un liquide (eau). En effet, la fonction principale de ce dispositif repose sur trois sous-systèmes qui sont un collecteur thermique, un réservoir de stockage de chaleur et un panneau photovoltaïque. L'étude proposée porte sur le premier type de réchauffeurs de surface à plaques plates en utilisant l'huile moteur usagée comme moyen alternatif, aux systèmes traditionnels, d'absorption de chaleur et fluide caloporteur (HTF) en même temps. Le HTF est inclus dans le fonctionnement principal de la majorité des collecteurs absorbeur à plaques planes [6].

Il est bien connu que les huiles utilisées pour les moteurs à combustion interne, en particulier les moteurs d'automobiles, sont un matériau dangereux et polluant pour l'environnement selon plusieurs études [7]. Ils sont recyclés dans plusieurs pays pour réduire la pollution de l'environnement mais malheureusement, dans d'autres pays, en particulier les

pays du tiers monde, dont l'Algérie, l'huile moteur usagée est rejetée dans l'environnement en raison de la non-disponibilité d'installations de traitement et de recyclage de [8]. Dans ce travail, nous proposons une solution qui peut être utilisée pour recycler et utiliser une partie de ce matériau de manière utile, en raison de ses caractéristiques thermo-physiques et thermodynamiques.

L'objectif principal de cette étude est de démontrer l'efficacité et la faisabilité de l'utilisation de l'huile de lubrification usagée dans un système de chauffage solaire en général et de chauffage de l'eau en particulier.

Selon la littérature, il semble qu'aucun travail de recherche n'ait utilisé l'huile usagée comme absorbeur et HTF dans les systèmes de chauffe-eau solaires. Jusqu'à présent, la plupart des études se concentrent sur les trois types connus de chauffe-eau. À la connaissance des auteurs, aucun travail de recherche de ce type n'a été effectué auparavant pour améliorer l'efficacité thermique en considérant la configuration d'un chauffe-eau solaire qui est basé sur l'huile usagée comme principe de fonctionnement et pour augmenter l'efficacité.

Cette étude propose une solution environnementale à deux problèmes de recyclage de l'huile usagée et de la technique de chauffage écologique de l'eau en utilisant simultanément de l'huile moteur usagée dans un environnement de transfert de chaleur. Cette recherche pourrait être considérée comme un appareil respectueux de l'environnement qui utilise une ressource d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire, pour lutter contre la crise de la pollution dans tous les pays du monde. En plus de contribuer à réduire les émissions de GES, en utilisant les l'huile usagée, l'eau de ce système obtient une température de chauffage encore meilleure des autres systèmes similaires car l'huile ajoute de la chaleur supplémentaire au capteur en raison de ses bonnes capacités d'absorption de la chaleur du soleil. En conséquence, l'efficacité du système a considérablement augmenté. Le chauffe-eau solaire conventionnel qui a été utilisé dans les recherches précédentes fait défaut à ce type de principe.

Afin de présenter l'essentiel de notre travail, nous avons donné à la thèse, la structure suivante :

Après avoir présenté en introduction, le contexte et l'objectif de l'étude, nous présentons dans le premier chapitre, La revue de la littérature sur les systèmes de chauffage solaire de l'eau et de ses applications. Il présente aussi brièvement différents résultats expérimentales selon des études connues.

Le deuxième chapitre présente l'aspect général de l'énergie solaire, le gisement solaire en Algérie, les voies d'utilisation de l'énergie solaire, ses applications ainsi qu'une brève référence aux prototypes qui ont été réalisés et qui ont un lien avec les applications de l'énergie solaire.

Le troisième chapitre est consacré à une description d'un nouveau prototype chauffe-eau solaire qui utilise à la fois de l'huile usagé d'engin comme absorbeur et fluide caloporteur pour chauffer l'eau situé à l'intérieur du réservoir via une pompe électrique. De plus le modèle physique et la formulation mathématique du système y sont présentés.

Dans le dernier chapitre, nous analysons expérimentalement le comportement thermique du prototype avec et sans eau. Enfin, nous présentons les résultats de la variation de la température de l'eau par rapport à la température de l'huile et à la température du verre extérieur du capteur thermique et étudions l'impact de l'effet de l'irradiation solaire sur la température de l'huile et son transfert, comme fluide caloporteur, et établir une caractéristique du système pour l'eau de chauffage solaire par rapport à l'eau de chauffage électrique.

Enfin, ce travail se terminera par une conclusion générale en mettant en valeur les principaux résultats obtenus.

Partie 1 :

***Chauffe-eau solaire : généralité, Systèmes solaires,
Systèmes de chauffe-eau solaire et caractérisation***

Chapitre 1

État de l'art

Sommaire

1.1	Introduction.....	18
1.2	Réalisation selon différentes études.....	18
1.3	Evolution de l'efficacité des capteurs solaire	19
1.4	Conclusion.....	20

1.1 Introduction

Ce chapitre introductif du manuscrit est consacré à la revue de la littérature sur les systèmes de chauffage solaire de l'eau et de ses applications. Il présente ainsi brièvement différents résultats expérimentaux selon des études connues.

1.2 Réalisations selon différentes études

Les archives des capteurs solaires aux États-Unis datent d'avant 1900, impliquant un réservoir peint en noir monté sur un toit.

En 1896, Clarence Kemp de Baltimore a enfermé un réservoir dans une boîte en bois, créant ainsi le premier « chauffe-eau par lots » comme on l'appelle aujourd'hui.

Des capteurs plats pour le chauffage solaire de l'eau ont été utilisés en Floride et en Californie du Sud dans les années 1920. L'intérêt s'est accru en Amérique du Nord après 1960, mais surtout après la crise pétrolière de 1973 [9].

Au début des années 80, en Algérie, le premier chauffe-eau solaire a été achevé. Ce chauffe-eau solaire était constitué de deux capteurs sous la forme de deux boîtiers carrés et d'un réservoir cylindrique. L'un d'eux est en bois, l'autre est constitué d'une plaque métallique. Il était recouvert d'un couvercle en verre de 6 mm d'épaisseur. La forme du réservoir de stockage est cylindrique, en fibres de ciment posées verticalement, sans système d'isolation thermique.

Au cours des années 84 et 85 et après diverses études théoriques et expérimentales menées au centre de développement des énergies renouvelables (CDER), un nouveau système de chauffe-eau solaire à thermosiphon est né, ayant une cuve cylindrique à carénage parallélépipédique [10].

Plusieurs prototypes sur divers types de systèmes de chauffage solaire ont été réalisés à différents endroits et leurs études rapportées par Al-Kayiem, H.H., Yassen, T.A., 2015, Garnier, C., Muneer, T., Currie, J., 2018, Li, B., Zhai, X., Cheng, X., 2018, Seddegh, S., Wang, X., Henderson, A.D., Xing, Z., 2015,] Smyth, M., Pugsley, A., Hanna, G., Zacharopoulos, A., Mondol, J., Besheer, A., Savvides, A., 2019 ont montré de très bonne disposition et ont donné satisfaction [11 ;12 ;13 ;14 ;15].

En 2018, Garnier et al. [12] ont donné une évaluation numérique et empirique d'un bâtiment dans un système de chauffe-eau solaire à stockage intégré.

La configuration et la géométrie proposées intègrent un élément chauffant intégré afin de fournir une eau chaude résidentielle autonome. Ils présentent une analyse de la dynamique des fluides numérique (DFN) des écoulements internes et des régimes de transfert de chaleur.

En 2019, Harmim et al de l'URERMS Adrar. [23] ont présenté la conception, la construction et l'expérimentation d'un chauffe-eau solaire à accumulation intégré au bâtiment. Le bâtiment est équipé d'un réflecteur parabolique linéaire comme dispositif concentrateur. Le système est conçu pour répondre aux besoins en eau chaude en hiver.

Les différences dans les chauffe eau résident dans les capteurs solaires thermiques qui ont des structures basées sur différents principes de fonctionnement tels que présentés par Esen, M, en 2000 [9].

En particulier, le capteur solaire thermique est l'une des technologies d'énergie renouvelable les plus efficaces et il a déjà démontré un énorme potentiel sur le marché comme rapporté par Yassen, T.A., Mokhlif, N.D., Eleiwi, M.A., en 2019 [10].

Le chauffage solaire de l'eau est généralement divisé en trois types de capteurs : les capteurs plaque plats (CPP), concentrateurs paraboliques composés (CPC) et les capteurs à tubes sous vide (SCV) tel que décrit par Emam, E.A., Shoaib, A.M., 2013 [16].

1.3 Evolution de l'efficacité des capteurs solaire

Selon des études connues, l'efficacité varie d'un type à l'autre. L'efficacité des capteurs plats est estimée entre 45% et 60% . Ceci a été rapporté par Chun, W., Kang, Y.H., Kwak, H.Y., Lee, Y.S., en 1999 [17]. Kalogirou, S., 2003 a montré que l'efficacité des capteurs paraboliques composés stationnaires est comprise entre 60% et 75%, et l'efficacité des capteurs à tube sous vide est comprise entre 80% et 90% [18].

Plusieurs études ont abordé ce sujet parmi elles ; Jaisankar et al [19] et Shukla et al [20] ont rapporté que pour le capteur solaire Flat plate et ses différentes configurations, des recherches ont montré que la température de sortie du capteur varie entre 27 et 60° C, pour le réservoir d'eau.[21] Le système de chauffe-eau est couplé à un matériau à changement de phase pour le stockage d'énergie.

Il a remarqué que le chauffe-eau solaire domestique fonctionne plus efficacement avec un débit constant que dans des conditions d'exposition.

En 2019, Agathokleous et al. [22] ont présenté la conception et les performances énergétiques d'un capteur solaire thermique à air plat intégré dans une façade de bâtiment. Le type prototype est conçu avec des matériaux économiques et a une conception beaucoup plus simple, par rapport aux collecteurs commerciaux existants.

En 2016, Daghigh et Shafieian. [24] ont effectué une analyse théorique et expérimentale d'un capteur solaire de chauffage à eau avec un caloduc à tube sous vide pour évaluer la performance énergétique du système. Ils ont présenté un modèle mathématique selon l'analyse thermique et énergétique. Le système a été construit et testé expérimentalement dans des conditions réelles de fonctionnement. Le modèle mathématique a été validé de manière optimale pour 15 tuyaux collecteurs.

En 2018, Shabgard et al. [25] ont analysé un système intégré de chauffage et de refroidissement de l'eau à énergie solaire utilisant le stockage d'énergie thermique latente.

Le système est intégré dans un immeuble résidentiel situé dans une zone de climat chaud. Les résultats ont montré que des économies d'énergie annuelles de plus de 80 % peuvent être réalisées en utilisant 10 m² de surface de capteurs solaires intégrés combinés à un système de stockage d'énergie thermique latente de 29 kWh.

En 2018, Ge et al. [26] ont résumé la situation actuelle et les perspectives futures du chauffage et du refroidissement solaires. Ils ont constaté qu'un grand intérêt était porté à ce type de système à travers diverses investigations et développements tous azimuts.

1.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout ce qui concerne les recherches et les expérimentations qui ont été menées par les chercheurs dans ce domaine.

CHAPITRE 2

Systèmes solaires

Sommaire

2.1 Introduction	23
2.2 L'énergie solaire	23
2.2.1 Le soleil.....	23
2.2.2 Mesure du rayonnement solaire	25
2.2.3 Energie solaire en Algérie	26
2.3. Voies d'utilisation de l'énergie solaire	28
2.3.1 Énergie solaire à concentration (CSP)	29
2.3.2 Photovoltaïque	29
2.3.3 Systèmes de chauffage solaire	32
2.3.4 Éclairage solaire	32
2.3.5 Voitures solaires	32
2.4. Système de chauffe-eau solaire	33
2.4.1 Système passif	34
2.4.2 Système actif	34
2.5. Composants du chauffe-eau solaire	34
2.5.1 Collecteur solaire	35

2.5.1.1	Collecteur solaire à plaque plate (CPP).....	35
2.5.1.2	Collecteur à tube sous vide.....	36
2.5.1.3	Le collecteur à concentrateur parabolique	36
2.5.1.4	Collecteur cylindro-parabolique	37
2.5.1.5	Collecteurs d'air solaires	38
2.6	Conclusion	39

CHAPITRE 2 : Systèmes solaires

2.1 Introduction

Ces dernières années, l'énergie solaire a été fortement encouragée en tant que source d'énergie viable. Ce chapitre introductif du manuscrit est consacré à l'aspect général de l'énergie solaire et de ses applications. Il présente aussi brièvement différents prototypes réalisés par l'auteur qui ont un lien avec les applications de l'énergie solaire.

Parmi les applications les plus simples et les plus directes d'énergie solaire c'est la conversion du rayonnement de l'énergie solaire en chaleur.

Par conséquent, le secteur domestique peut réduire son impact sur l'environnement en installant des capteurs solaires à plaques plates pour chauffer l'eau. Il faut toutefois dire que certains de ces collecteurs sont en service depuis 40 à 50 ans sans que de réels changements significatifs soient apportés à leur conception et leurs principes de fonctionnement. Il semble opportun de rappeler le principe de la conversion de l'énergie solaire qui transforme la lumière en énergie électrique ou thermique. Enfin, une revue des différents types de chauffe-eau solaires est présentée.

2.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes par rapport à d'autres sources renouvelables telles que l'énergie éolienne, bio-thermique et géothermique Elle est locale, gratuite, propre, silencieuse et durable. L'énergie solaire peut être utilisée sur toute la surface de la terre ou presque, il suffit donc de capter celle-ci et de l'utiliser [27].

2.2.1 Le soleil

Le soleil est la principale source d'énergie lumineuse atteignant la terre (voir Fig. 2.1). Sa lumière met 8 minutes et 18 secondes pour parvenir sur terre. Le soleil est une sphère de matière gazeuse, composée principalement d'hydrogène et d'hélium, dont le diamètre atteint 1390000 km. La puissance émise par ce dernier est 1.7×10^{23} kW dont une partie, de l'ordre de 8.5×10^{13} kW, atteint le globe terrestre. Seul 70% (environ 6×10^{13} kW) de cette puissance pénètrent l'atmosphère. [27]

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique composé de particules de lumière appelée photons. L'énergie E_{ph} de chaque photon est directement liée à sa longueur d'onde λ , qui est donnée par [28]:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad [11]$$

Où :

h : constante de Planck, c : vitesse de la lumière.

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique, qui est approximativement celui émis par un corps noir à la température 6000 ° K. Le radiation solaire couvre une très large gamme de longueurs d'onde, appelée spectre solaire, allant de 10^{-4} micromètres (μm) jusqu'à 10^{-6} centimètres (cm) [29]. Ce spectre solaire peut être divisé en trois régions principales (voir tableau 2.1) :



Fig. 2.1. Le soleil [29]

Tableau 2.1 Régions du spectre solaire.

Spctre solaire	Longueur d'onde (μm)
Ultra-violet (UV)	$\lambda < 0.4$
Visible	$0.4 < \lambda < 0.7$
Infrarouge	$\lambda > 0.7$

2.2.2 Mesure du rayonnement solaire

Avant de commencer, il est plus approprié de donner la définition de certains termes concernant l'intensité du rayonnement solaire:

Le radiation est la mesure de la densité de puissance de la lumière solaire et est mesurée en W/m^2 . Le radiation est donc une quantité instantanée [30].

L'irradiation est la mesure de la densité énergétique de la lumière solaire et est mesurée en kWh/m^2 . L'énergie étant une puissance intégrée dans le temps, l'irradiation fait partie intégrante de la radiation. Normalement, le délai d'intégration est d'un jour, ce qui signifie, bien sûr, pendant les heures de clarté [31].

Pendant que le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il peut être transmis, absorbé (puis réémis), réfléchi et diffusé. Pour cette raison, il existe quatre types de rayonnement solaire qui sont illustrés dans la Fig. 2.2 [32] :

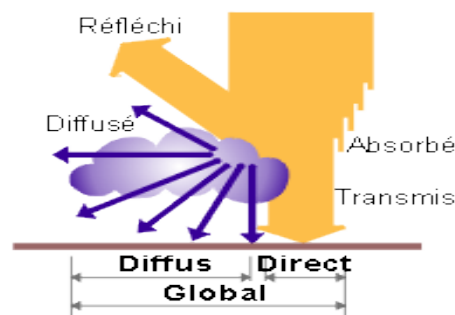


Fig. 2.2. Les différentes composantes du rayonnement solaire [33]

- Le rayonnement direct reçu directement du soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre (voir Fig. 2.3).
- Le rayonnement diffus est un rayonnement provenant de toutes les directions. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre ombré (voir Fig. 2.4).
- Le rayonnement solaire réfléchi ou albédo est un rayonnement réfléchi par le sol ou par des objets à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).

- Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre non ombré (voir Fig. 2.4).



Fig. 2.3. Pyrhéliomètre pour la mesure du rayonnement direct [34].



Fig. 2.4. Pyranomètre ombré pour la mesure du rayonnement diffus [35].



Fig. 2.5. Pyranomètre pour la mesure du rayonnement global [36].

2.2.3 L'énergie solaire en Algérie

La situation géographique de l'Algérie présente plusieurs avantages pour l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable en raison des conditions climatiques appropriées, en

particulier dans les régions sahariennes. L'Algérie est le plus grand pays d'Afrique avec une superficie de 2 381 741 km² dont 86% dans les régions désertiques. Il est situé au centre de l'Afrique du Nord entre les 38–35° de latitude nord et 8–12° de longitude est, limité par la mer au nord et par le Sahara au sud. Le rayonnement de la région proche de la mer est influencé par les saisons. Les régions du nord de l'Algérie sont plus couvertes que celles du sud. Les régions sahariennes reçoivent une plus grande quantité d'énergie et se caractérisent par une température de l'air plus élevée [38]–[39]. La Fig. 1.6 et le tableau 2.2 résument le potentiel d'énergie solaire de l'Algérie.

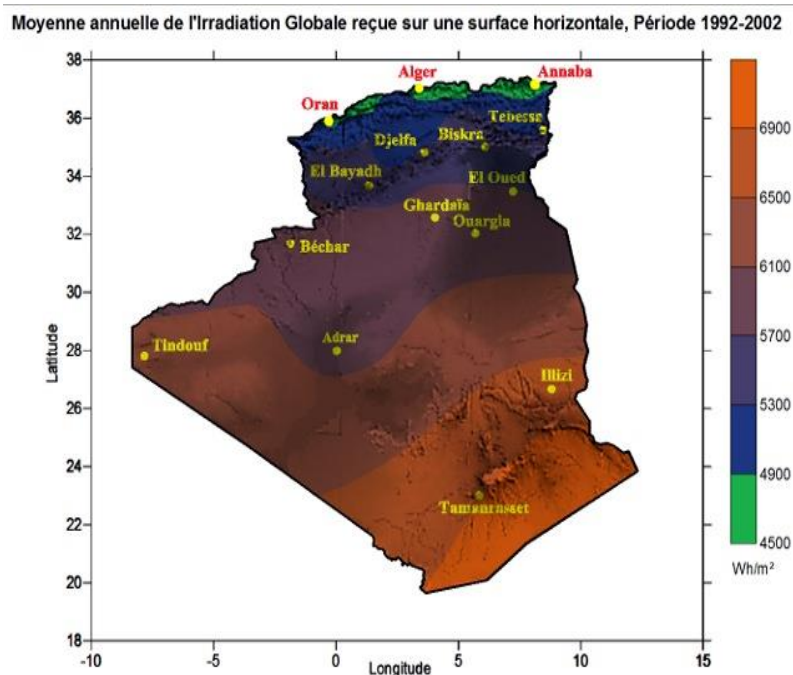


Fig. 2.6. Irradiation horizontale globale de l'Algérie [40].

Tableau 2.2 potentiel de l'énergie solaire en Algérie [41].

Régions	Côtière	Hautes plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Surface (km ²)	95.27	238.174	2.048.297
Durée moyenne d'ensoleillement quotidienne (h)	7.26	8.22	9.59
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Énergie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650
Solar daily energy density(kWh/m ²)	4.66	5.21	7.26

2.3. Voies d'utilisation de l'énergie solaire

L'énergie solaire peut être utilisée de différentes manières, comme le montre la Fig. 2.7. La conversion thermique solaire implique la capture de la chaleur solaire et son utilisation dans de nombreux processus. Le solaire photovoltaïque et le thermo photovoltaïque sont les moyens de conversion de l'énergie solaire directement en électricité. L'énergie solaire thermique est captée par les différents types de capteurs solaires. L'effet solaire photovoltaïque est obtenu par les dispositifs semi-conducteurs qui peuvent produire directement de l'électricité lorsque les photons y sont incidents. Les appareils thermo photovoltaïques convertissent directement la chaleur en électricité [42].

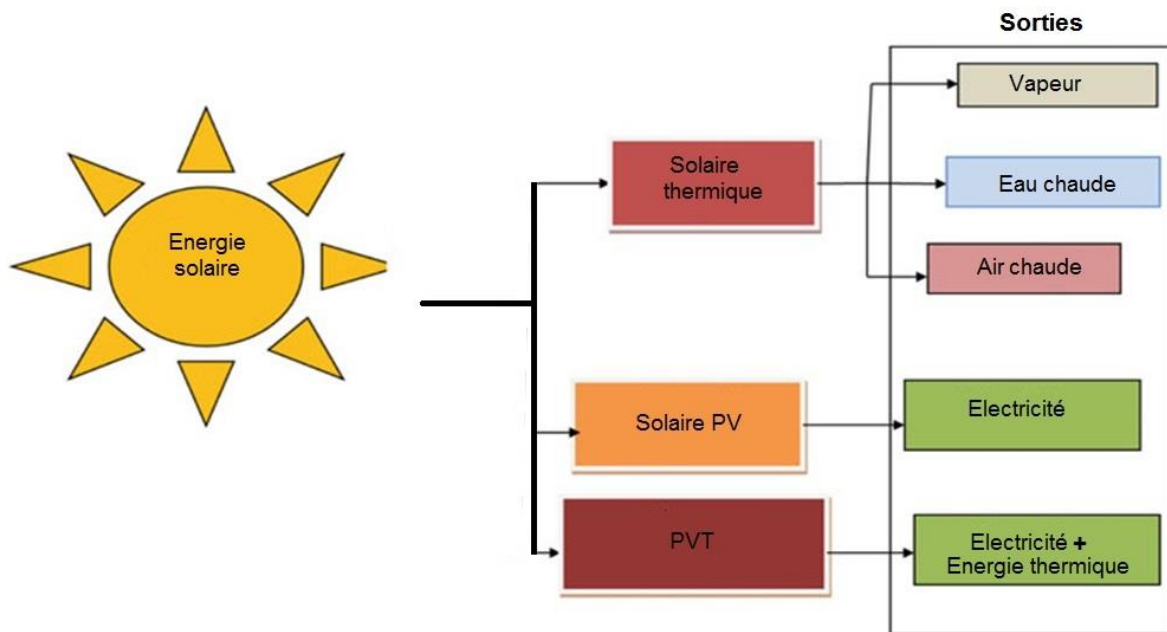


Fig. 2.7. Voies de conversion de l'énergie solaire.

2.3.1 Énergie solaire à concentration (CSP)

Les centrales à énergie solaire à concentration (CSP) sont des générateurs à grande échelle qui produisent de l'électricité à l'aide de miroirs ou de lentilles pour concentrer efficacement l'énergie solaire. Les quatre principales technologies CSP sont les auge paraboliques, les systèmes de moteur plat-Stirling, les récepteurs centraux et les systèmes photovoltaïques à concentration (CPV) [43](voir Fig.2.8).

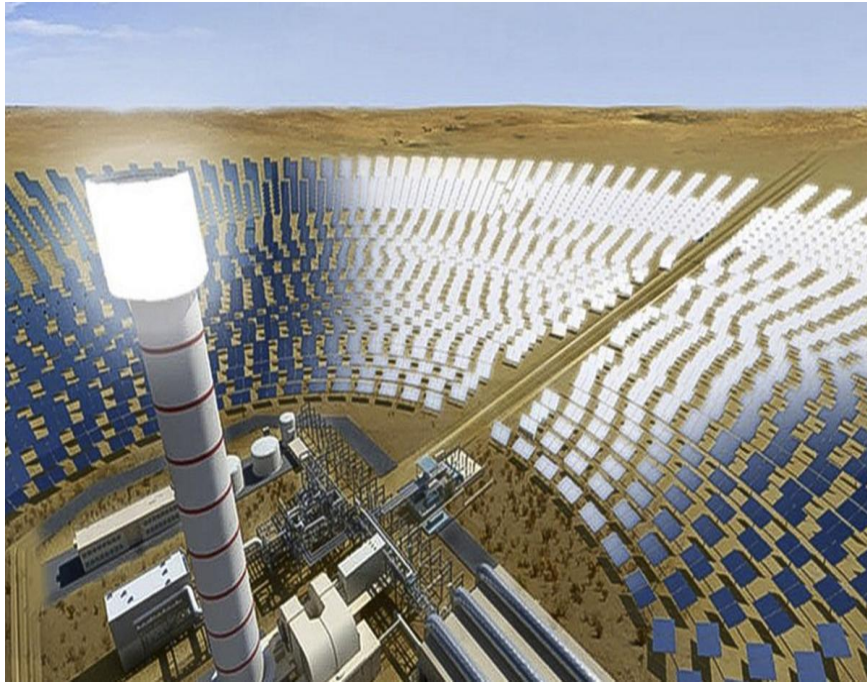


Fig. 2.8. Centrales à énergie solaire à concentration [44].

2.3.2 Photovoltaïque

La technologie photovoltaïque ou PV utilise des cellules solaires ou des panneaux solaires photovoltaïques pour convertir l'énergie du soleil en électricité. Les cellules solaires produisent de l'électricité en courant continu à partir des rayons du soleil, qui peut être utilisée pour alimenter l'équipement ou recharger les batteries. De nombreux calculateurs de poche intègrent une seule cellule solaire, mais pour les applications plus importantes, les cellules sont généralement regroupées pour former des modules PV qui sont à leur tour disposés en panneaux solaires. Dans ce cas les panneaux solaires peuvent être utilisés pour alimenter par exemple : le réseau électrique des villes (pompage PV au réseau), les moyennes de transport (tel que les voitures électrique, bus électrique, tramway...) voir Fig. 1.9, 1.10 et 1.12, les satellites en orbite et autres engins spatiaux (par exemple les robots mobile solaire voire Fig. 2.11), et dans les régions éloignées comme source d'énergie pour les téléphones d'urgence routiers, la télédétection et la protection cathodique des pipelines [45].

La Fig.2.9 montre le prototype d'un parking solaire qui a été réalisé au niveau de l'URER-MS par Touaba Oussama[46]. Cette réalisation a été faite pour la production d'énergie électrique écologique et économique avec zéro pollution dans un premier temps, comme surface de parking ombragé pour stationner et comme borne pour recharger les voitures électrique.

L'énergie électrique produite de ce parking peut charger trois véhicules électrique ou hybride chaque jour.

La puissance globale des panneaux générée par estimation théorique environ de $13\text{kW}\pm 10\%$ [46].



Fig. 2.9. parking solaire réalisé au niveau de l'URER-MS Adrar [46].

La Fig. 2.10 montre un prototype d'une voiture électrique réalisé par M. Touaba Oussama et le Pr. AIT CHEIKH Mohamed Salah, Professeur (ENP, Alger) [21]. Cette réalisation qui convient aux zones urbaines avec zéro émission de polluants toxique et de gaz à effet de serre peut atteindre une vitesse de 40km/h. Cette voiture 100% Algérienne comporte deux places, deux moteurs d'une puissance de 1,2 kilowatts (équivalente à 1.7 Chevaux) variable selon la puissance des batteries. Cette voiture électrique détient un brevet d'invention déposé à l'INAPI [47].



Fig. 2.10. prototype d'un voiture électrique algérienne.

La Fig. 2.11. Montre un prototype d'un robot mobile solaire réalisé par Touaba Oussama [48]. Le prototype est constitué de quatre roues et deux moteurs de traction, un moteur de direction et d'un générateur photovoltaïque constitué de quatre modules photovoltaïques. Le prototype est réalisé avec des matériaux légers tel que l'aluminium. La commande à distance du robot peut être assurée par un réseau de troisième ou quatrième génération ou même à travers le GPS. Parmi les applications de ce prototype, on peut citer l'observation et l'exploration des zones inaccessible, telles que les zones toxiques ou radioactives nucléaires [48].



Fig. 2.11. prototype d'un robot mobile solaire[48].

2.3.3 Systèmes de chauffage solaire

Les systèmes solaires d'eau chaude utilisent l'énergie du soleil pour chauffer l'eau. Les systèmes sont composés de capteurs solaires thermiques et d'un réservoir de stockage. Ils peuvent être des systèmes actifs, passifs ou discontinus [43].

2.3.4 Éclairage solaire

Également connu sous le nom d'éclairage naturel, il s'agit de l'utilisation de la lumière naturelle pour fournir un éclairage afin de compenser la consommation d'énergie dans les systèmes d'éclairage électrique conventionnels et ainsi de réduire la charge de refroidissement des systèmes HVAC. Les fonctions d'éclairage naturel comprennent l'orientation du bâtiment, l'orientation des fenêtres, l'ombrage extérieur, les toits en dents de scie, les fenêtres à claire-voie, les étagères lumineuses, les puits de lumière et les tubes d'éclairage. Les tendances architecturales reconnaissent de plus en plus la lumière du jour comme une pierre angulaire de la conception durable [43].

2.3.5 Voitures solaires

Une voiture solaire est un véhicule électrique alimenté par l'énergie obtenue à partir de panneaux PV sur la surface de la voiture qui convertissent directement l'énergie solaire en énergie électrique (voir Fig. 2.11). Les voitures solaires ne sont pas actuellement un moyen de transport pratique puisqu'elles ne peuvent fonctionner que sur des distances limitées sans soleil. Les équipes de développement ont concentré leurs efforts sur l'optimisation de l'efficacité du véhicule par rapport au volume de l'habitacle bien que pour le moment les modèles actuels n'ont suffisamment de place que pour une ou deux personnes [49].

La Fig. 2.12. Montre un prototype d'une voiturette solaire réalisé au niveau de l'URER-MS par T Oussama [49], cette réalisation est un véhicule à trois roues, qui nécessite un panneau photovoltaïque comme générateur d'énergie qui est stocké dans des batteries. Ces dernières sont mises à contribution lorsqu'il y a moins de lumière ou pour pouvoir accélérer lorsque l'apport direct d'énergie solaire est insuffisant. Afin d'optimiser la charge, le véhicule est équipé d'un système de poursuite automatique du rayonnement solaire [49].



Fig. 2.12. prototype d'un voiturette solaire [49].

2.4. Système de chauffe-eau solaire

Le système de chauffage solaire de l'eau utilise la technologie thermique solaire, qui est basée sur le système de conversion du rayonnement solaire en chaleur et de sa transmission à un milieu de tel que l'eau, l'antigel ou l'air. Ce système est souvent réalisable pour remplacer l'électricité et les combustibles fossiles utilisés pour le chauffage de l'eau. Généralement, le système est très simple car il ne nécessite que du rayonnement solaire pour chauffer l'eau. Il fonctionne lorsque le fluide utilisé est mis en contact avec une surface sombre (très absorbante), qui est exposée au rayonnement solaire, ce qui provoque alors une augmentation de la température du fluide. Ce transfert peut être provoqué par le chauffage direct de l'eau, système direct, ou bien à travers un fluide caloporteur (tel qu'un mélange de glycol ou d'eau) qui passe à travers une forme d'échangeur de chaleur, système indirect. Ces systèmes peuvent être classés en deux catégories principales; système actif et système passif [45].

2.4.1 Système passif

Ce type de système solaire utilise la convection thermique comme principe pour faire circuler l'eau ou le fluide caloporteur sans dispositifs mécaniques. Il permet de faire circuler de l'eau ou un autre fluide entre le collecteur et un réservoir de stockage [45].

2.4.2 Système actif

Ce type de système solaire utilise des pompes pour faire circuler le fluide de travail. Deux systèmes différents peuvent être trouvés dans cette catégorie, le premier est la circulation directe, où l'eau est le fluide qui circule en boucle entre le réservoir de stockage et le capteur solaire, tandis que la circulation indirecte utilise un fluide caloporteur qui circule en boucle fermée entre un échangeur de chaleur et le capteur solaire. Le fluide caloporteur cède l'énergie à l'eau via un échangeur de chaleur [45].

2.5. Composants du chauffe-eau solaire

Généralement, le chauffe-eau solaire se compose de plusieurs composants de base; le panneau de capteur du rayonnement solaire, le réservoir de stockage et le fluide caloporteur, comme illustré sur la Fig. 2.13. En outre, il existe également plusieurs composants supplémentaires tels que la pompe (nécessaire uniquement dans le système actif), les résistances du chauffage d'appoint, les canalisations et l'échangeur de chaleur [45].

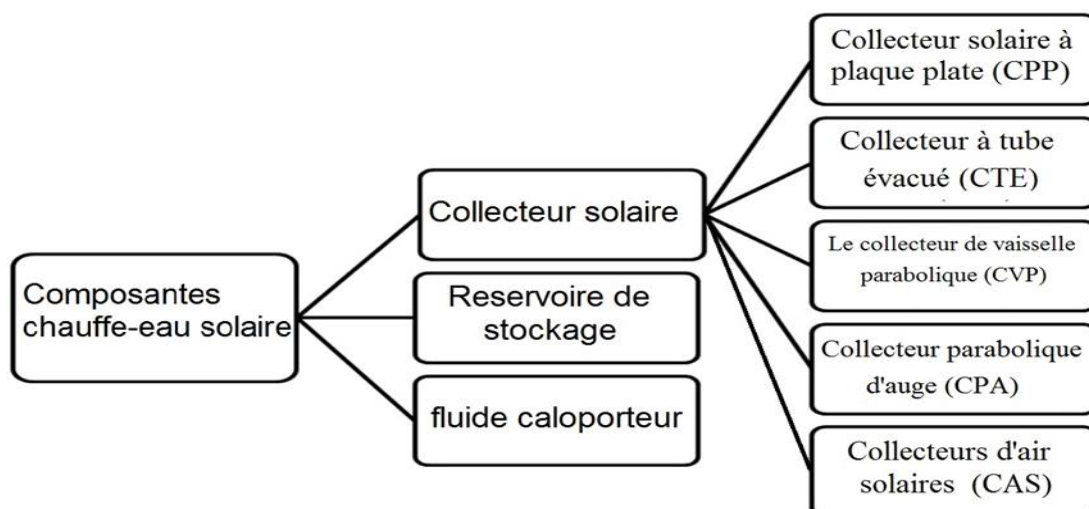


Fig. 2.13. Composants du chauffe-eau solaire.

2.5.1 Collecteur solaire

La principale composante du chauffe-eau solaire est le capteur solaire. Il s'agit d'un type spécial d'échangeur de chaleur qui transforme l'énergie du rayonnement solaire en énergie interne du milieu de transport lequel absorbe le rayonnement solaire entrant et le convertit en chaleur, puis transfère cette chaleur à un fluide (généralement de l'air, de l'eau ou de l'huile) s'écoulant travers le collecteur [50].

2.5.1.1. Collecteur solaire à plaque plate

En se référant à la Fig. 2.14, le rayonnement solaire pénètre dans le collecteur à travers le couvercle vitré. Les absorbeurs de chaleur reçoivent l'énergie et transfèrent le rayonnement thermique au fluide qui coule à travers. Cela augmente la température de la substance, atteignant des températures allant jusqu'à 80 °C. Le liquide chauffé est dirigé vers des tubes (généralement équipés d'ailettes chauffantes pour augmenter la surface zone d'absorption maximale), où le fluide s'écoule vers le réservoir de stockage. Ce type de capteur peut atteindre des températures de l'eau jusqu'à 80 °C. La Fig. 2.14 montre comment l'eau froide s'écoule du réservoir de stockage vers le collecteur où il est chauffé et par l'action du thermosiphon, reflue vers le réservoir. Ce processus se répète sans arrêt pour maintenir une température élevée de l'eau dans le réservoir de stockage [50].

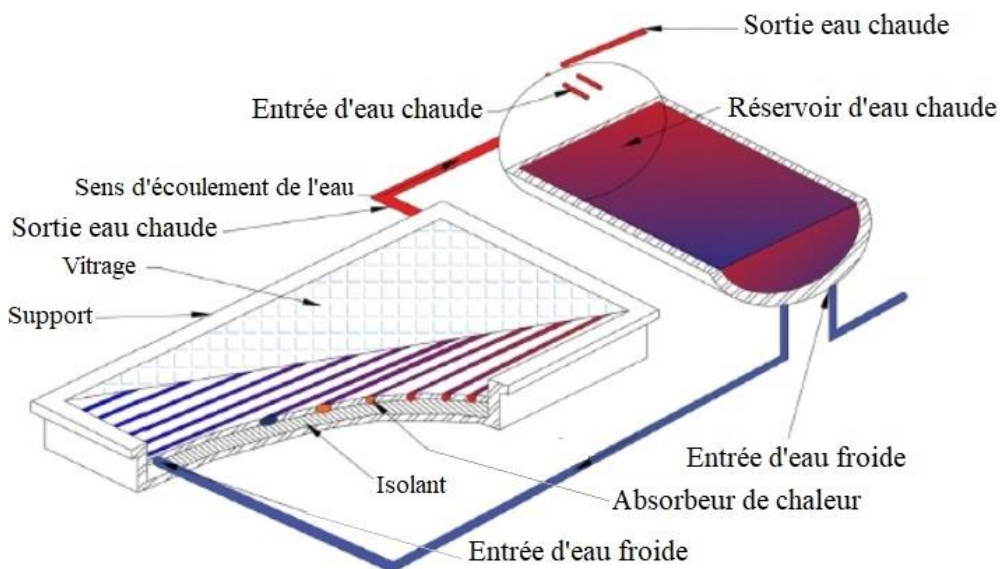


Fig. 2.14. Collecteur solaire à plaque plate (CPP).

2.5.1.2 Collecteur à tube sous vide

La couche supérieure du collecteur à tubes sous vide, se compose d'un boîtier en tube de verre, est conçu pour empêcher la chaleur absorbée par les composants dans le collecteur de se volatiliser. Le rayonnement thermique passe à travers la couche supérieure du tube évacué et est absorbé par un tuyau collecteur cylindrique (tube de fluide). Le collecteur cylindrique est recouvert d'un revêtement noir, pour une absorption maximale de la chaleur. Un transfert de fluide à l'intérieur du tube, absorbe le rayonnement thermique, qui monte vers la tête de l'échangeur de chaleur. Les têtes d'échangeur de chaleur se terminent dans un collecteur isolé. L'eau coule depuis la tête de l'échangeur dans le collecteur et gagne en énergie. La température de l'eau peut atteindre 100 ° C, dans des conditions météorologiques favorables. Grâce à cette action, le fluide de transfert est refroidi et retourne à la partie inférieure pour de nouveau se réchauffer, comme illustré à la Fig. 2.15. L'eau passe du collecteur au réservoir de stockage par des tuyaux, en raison de la convection naturelle. Le fluide de transfert à l'intérieur est évacué des tubes grâce aux propriétés antigel, pour les pays qui connaissent fréquemment le gel [50].

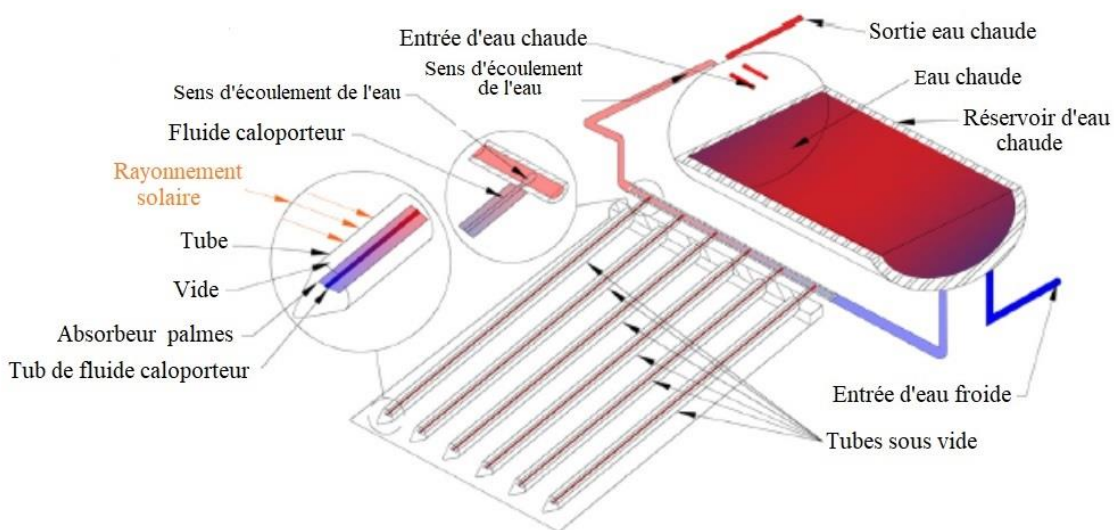


Fig. 2.15. Collecteur à tube sous vide (CTV).

2.5.1.3 Le collecteur à concentrateur parabolique

Le collecteur à concentrateur parabolique de la Fig. 2.16 utilise des concentrateurs d'énergie solaire pour chauffer un récepteur de chauffage d'eau au point focal du plat. Le collecteur suit le mouvement du soleil sur deux axes, afin de maximiser l'absorption de

l'énergie solaire. Durant la journée. Le système de suivi nécessite de l'énergie électrique pour faire fonctionner le mécanisme de suivi solaire. Le récepteur absorbe de l'énergie solaire focalisée et la transfère au fluide circulant à l'intérieur. Le fluide caloporteur peut être un réfrigérant ou de l'eau. L'eau coule dans le réservoir de stockage pour la recirculation. Plusieurs études expérimentales signalent que ce collecteur peut chauffer l'eau à des températures allant jusqu'à 60 °C [50].

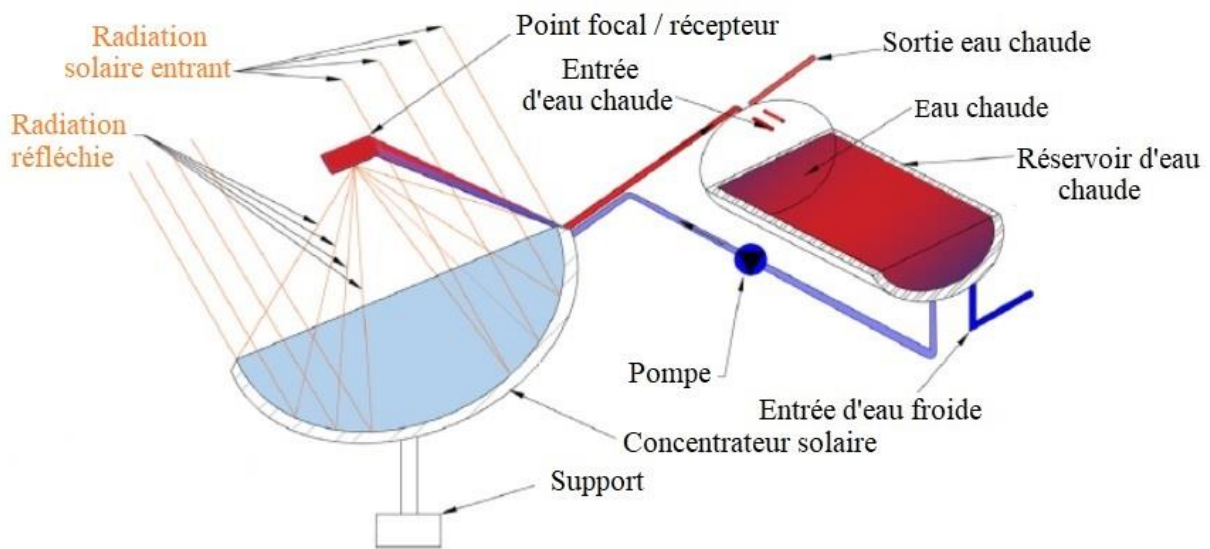


Fig. 2.16. Collecteur à concentrateur parabolique.

2.5.1.4 Collecteur cylindro-parabolique

Le Collecteur cylindro-parabolique fonctionne sur le même principe que le PDC. Ce système a cependant un suivi solaire à axe unique, où le suivi solaire a lieu uniquement sur l'axe horizontal. Ce système a une ligne focale plutôt qu'un point de réception. Le concentrateur se compose d'un métal réfléchissant semi-circulaire, qui se concentre sur l'énergie solaire sur la ligne focale. Un tube est monté à l'intérieur de la ligne focale avec l'eau ou un autre fluide de transfert. Le fluide est chauffé grâce à l'absorption de l'irradiation solaire réfléchie. Le tube est enfermé dans le verre avec un revêtement noir. La circulation s'effectue à l'aide d'une pompe de circulation. Des températures allant jusqu'à 60 °C peuvent être atteintes pour le capteur de type domestique. Cependant, des températures significativement plus élevées ont été signalées pour des systèmes plus importants. Il est

généralement recommandé de placer le capteur face au nord afin qu'une absorption maximale puisse avoir lieu en hiver. La Fig. 2.17 présente la configuration du système et le fonctionnement du collecteur parabolique [50].

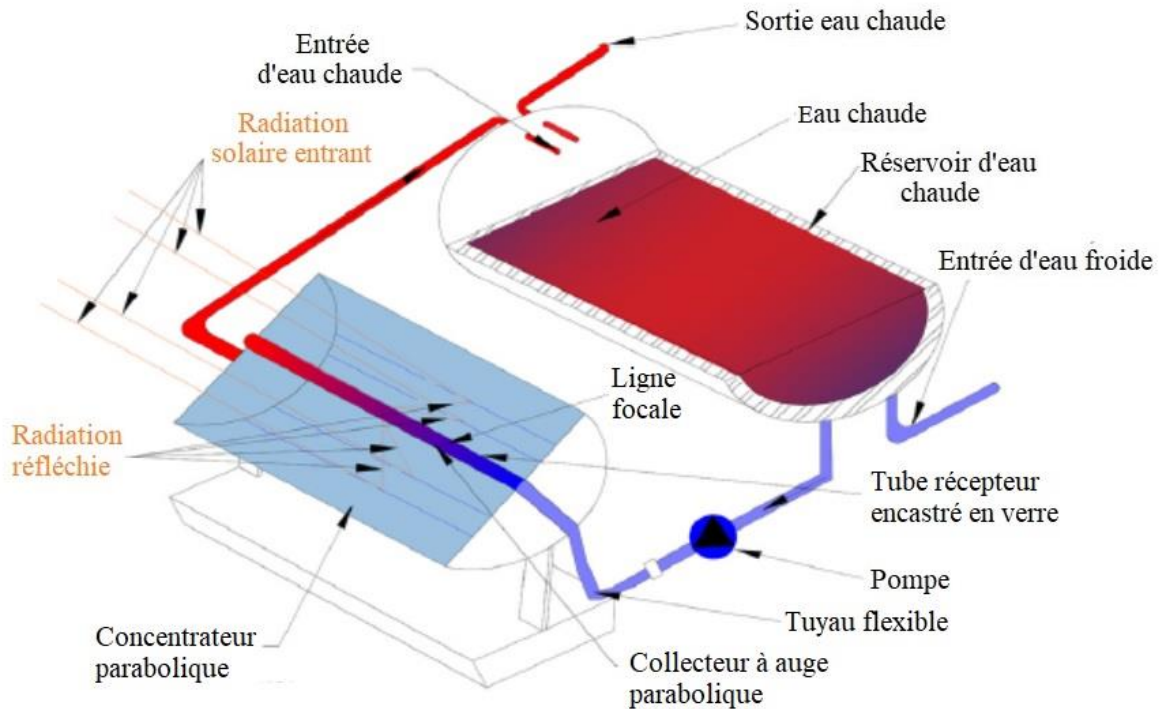


Fig. 2.17. Collecteur cylindro-parabolique.

2.5.1.5 collecteurs d'air solaires

Les collecteurs d'air solaires fonctionnent de la même manière que les collecteurs de liquide à la différence que l'air circule à travers le capteur pour provoquer un transfert de chaleur. Les collecteurs d'air sont de simples collecteurs à plaques plates utilisés principalement pour le chauffage des locaux. La Fig. 2.18, présente la configuration du système et le fonctionnement du collecteur d'air solaire [51].

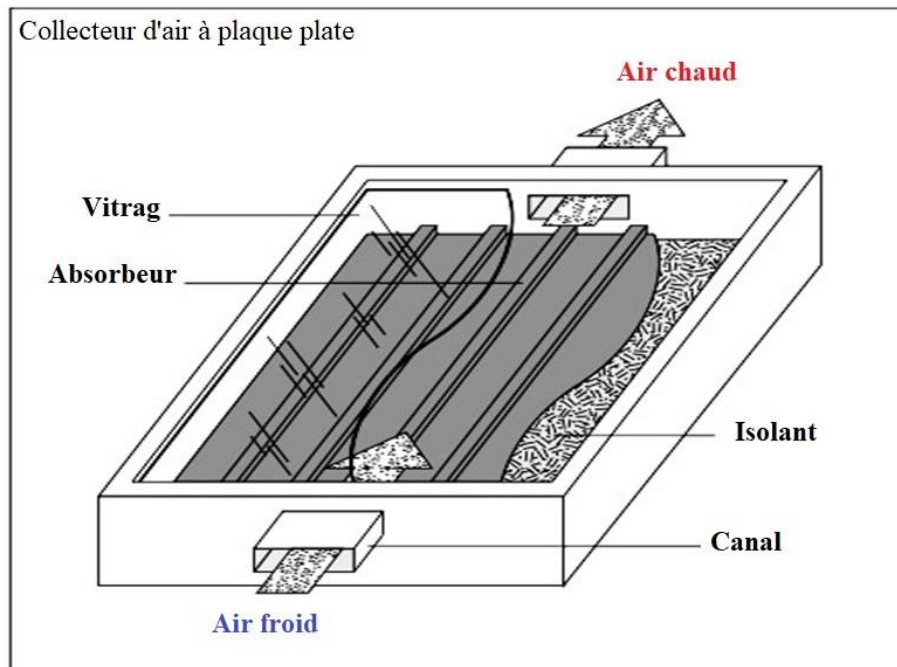


Fig. 2.18. Collecteur d'air à plaque plate [51].

Les plaques absorbantes dans les collecteurs d'air peuvent être des tôles, des couches d'écran ou des matériaux non métalliques. Les plaques absorbantes du collecteur d'air peuvent être non remplies ou ondulées pour créer une turbulence d'air qui aide la chaleur à se focaliser sur la plaque. L'air circule à travers l'absorbeur soit par convection naturelle, soit forcé par un ventilateur. L'inconvénient de cette conception est qu'elle peut également augmenter la quantité d'énergie nécessaire aux ventilateurs et donc augmenter les coûts d'exploitation du système [51].

2.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner des définitions superficielles sur différents types de systèmes solaires thermodynamiques. Nous avons commencé par donner quelques notions sur le soleil et l'énergie solaire et sur les moyens de mesure du rayonnement solaire. Nous avons présenté des données sur les capacités de l'Algérie, en termes d'énergie solaire, qui sont considérées comme très importantes. Par la suite nous avons commencé par des généralités sur les applications de l'énergie solaire photovoltaïque et thermique et l'identification de certains des prototypes que nous avons réalisés et testés avec succès et qui sont inclus dans les applications d'énergie solaire. Par ailleurs, nous avons donné des définitions des différents systèmes de chauffage solaire pour avoir une idée du choix du type de système qui répondrait à certaines exigences.

PARTIE 2:

***Réalisation et résultats: description technique,
Caractéristiques, modélisation, et validation
expérimental***

CHAPITRE 3 :

Prototype Proposé

Sommaire

3.1 Introduction	43
3.2 Description de l'idée proposée du système	43
3.3 Description technique du prototype	44
3.3.1. Composants du prototype	44
3.3.2. Système d'alimentation photovoltaïque	47
3.4. Mode de fonctionnement	50
3.5 Caractéristiques de l'huile usagée	52
3.5.1 Classification de l'huile	52
3.6 Modèle physique et formulation mathématique	54
3.6.1 Bilan énergétique	54
3.6.2 Coefficient de transfert de chaleur	55
3.6.2.1 Radiative	55
3.6.2.2 Conductivité	55
3.6.2.3 Convective.....	56
3.6.3 Performance énergétique	56

3.6.3.1	Energie thermique	56
3.6.3.2	Efficacité thermique	57
3.6.3.3	Perte thermique	57
3.7	Simulation et Modélisation du circuit électrique du prototype	57
3.7.1	Partie générateur photovoltaïque.....	57
3.7.1.1	Modèle idéal.....	57
3.7.1.2	Modèle avec pertes ohmiques.....	59
3.7.1.3	Modèle à une diode (modèle 1D).....	59
3.7.1.4	PV Simulateur sous Matlab / Simulink.....	62
3.7.1.5	Simulation des caractéristiques I-V/ P-V.....	63
3.7.2	Description et simulation du circuit de commande sous Proteus	63
3.7.2.1	Algorithme de gestion de prototype réalisé.....	63
3.7.2.2	Circuit électrique de commande.....	65
3.8	Sites d'expérimentation	68
3.9	Conclusion	70

CHAPITRE 3 : Prototype Proposé

3.1 Introduction

Ce chapitre donne une description d'un nouveau prototype chauffe-eau solaire qui utilise de l'huile usagée d'engin, comme absorbeur et fluide caloporteur pour chauffer de l'eau à l'intérieur d'un réservoir, via une pompe électrique. Dans un premier temps, nous clarifions l'objectif de cette étude, puis décrivons les composants du prototype proposé et son principe de fonctionnement. Une explication détaillée des caractéristiques techniques du prototype et les huiles usagées est aussi donnée. Dans la deuxième étape, le modèle physique et la formulation mathématique du système sont présentés, ceci en utilisant les équations de transfert de chaleur et de puissance thermique et l'équilibre de transfert de chaleur pour chaque composant du capteur solaire. Enfin, nous fournissons aussi les caractéristiques météorologiques et géographiques du site où s'est fait l'étude.

3.2 Description de l'idée proposée du système

Les principaux éléments du système global proposé présentés dans cette étude sont illustrés à la Figure. 3.1 [52]. Le dispositif se compose de trois parties, le premier est placé devant le soleil pour absorber et convertir l'irradiation en chaleur. Le second convertit l'irradiation en électricité grâce à un panneau photovoltaïque pour alimenter les différents composants électriques du système, tels que l'électropompe et les circuits électriques de commande. En l'absence de lumière solaire, l'appareil fonctionne également automatiquement avec l'électricité domestique qui est équipée d'un système intelligent conciliant l'utilisation de l'énergie solaire et l'économie en électricité. La troisième partie est basée sur un phénomène d'échange qui délivre de la chaleur à des fins générales. Comme nous le verrons, l'utilisation d'huile minérale usée exposée au soleil montre qu'elle donne de meilleurs résultats en termes d'absorption de chaleur, du fait de sa couleur sombre et de ses caractéristiques thermiques. Il montre une très bonne caractéristique d'absorption pour ce type d'huile, le S15w40, qui est l'huile la plus utilisée dans les moteur du parc algérien [52].

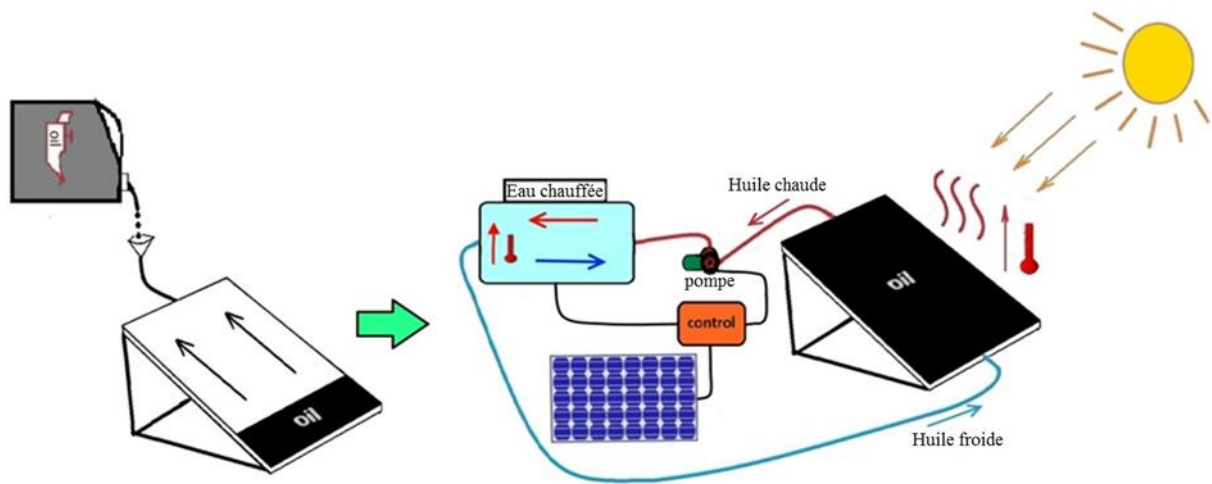


Fig. 3.1. Diagramme des composants globaux du système [52].

La Fig. 3.2 décrit et montre les principaux composants du prototype réalisé, qui se compose d'une plaque sombre remplie d'huile usée noire, d'un réservoir d'eau muni d'un échangeur thermique en cuivre et d'une résistance électrique utilisée pour compenser le système en l'absence de lumière solaire [52].

3.3 Description technique du prototype

Un mini-prototype a été réalisé pour vérifier l'efficacité de l'étude. Il se compose d'un système photovoltaïque et d'un capteur thermique monté sur une structure en aluminium avec un angle optimal (38°) selon la région de l'expérience afin d'optimiser la capture d'un maximum d'énergie. Pour ce faire, l'huile est placée entre deux plaques de verre trempé, distantes de 5 mm, qui supportent la chaleur. Une pompe électrique permet la circulation de l'huile chauffée entre les deux plaques réalisées et le réservoir d'eau, transférant ainsi la chaleur de l'huile à l'eau. L'utilisation du prototype a donné des résultats considérables. De nombreuses expériences ont été testés sur ce prototype, illustré par la Fig. 3.3, afin de d'évaluer son utilisation future dans le domaine industriel [52].

3 3.1.Composants du prototype

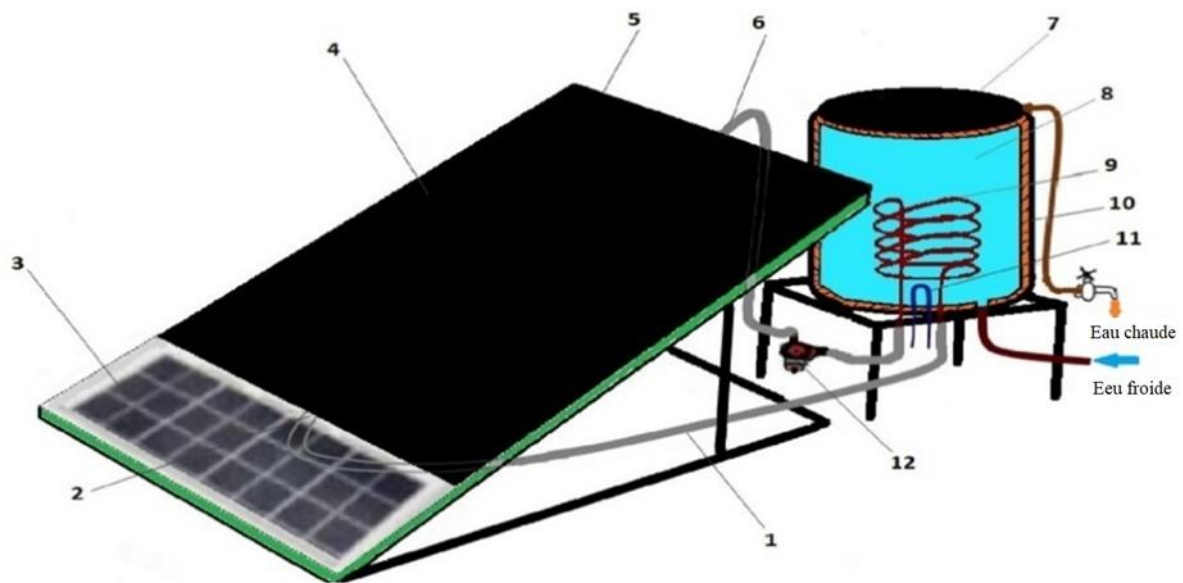


Fig.3.2. Principaux composants du prototype: (1) Canalisation d'huile ; (2) Entrée d'huile ; (3) Panneau photovoltaïque de 25W ; (4) Huile moteur usagée ; (5) Cadre en aluminium; (6) Sortie d'huile ; (7) Réservoir d'eau avec isolation thermique ; (8) Eau ; (9) Échangeur de chaleur en cuivre ; (10) Couche d'isolation thermique ; (11) Chauffage électrique ; (12) Pompe à huile [52].

Le prototype réalisé est basé sur les principaux composants suivants:

- Une pompe à huile DC 12V, 15W DC.
- Un panneau photovoltaïque 12V, 25 W.
- Un réservoir d'eau de 50L.
- Une résistance chauffante électrique de 600 W intégrée au réservoir d'eau.



Fig. 3.3. Le prototype réalisé du chauffe-eau solaire développé [52].

Les paramètres de conception du prototype sont résumés dans le tableau 3.1[52].

La Fig. 3.4 montre les différentes parties des éléments du capteur solaire thermique.

Tableau 3.1 Paramètres de conception des dimensions du système et des panneaux thermiques

Symbole	Caractéristique	Valeur
S_c	surface thermique exposée à la lumière	0.6 m ²
l_p	longueur des tuyaux	400cm
S_e	surface de l'échangeur de chaleur	0.17m ² (300 × 1.8 × πcm ²)
V_e	volume d'huile dans l'échangeur	0.3L
V_t	volume d'huile dans les tuyaux avec isolation thermique	0.4L
V_c	volume d'huile dans le collecteur de chaleur exposé à la lumière	3.4L
V_o	volume total d'huile	4.1L ($V_e + V_t + V_c$)
L	Longueur du panneau thermique	105 cm
R	Largeur du panneau thermique	96 cm
H	Hauteur du panneau thermique	62 mm
a	Épaisseur d'isolation thermique	25 mm
b	Épaisseur du verre trempé	04 mm
c	Épaisseur du canal d'huile	05 mm
d	Hauteur d'air d'isolation	30 mm

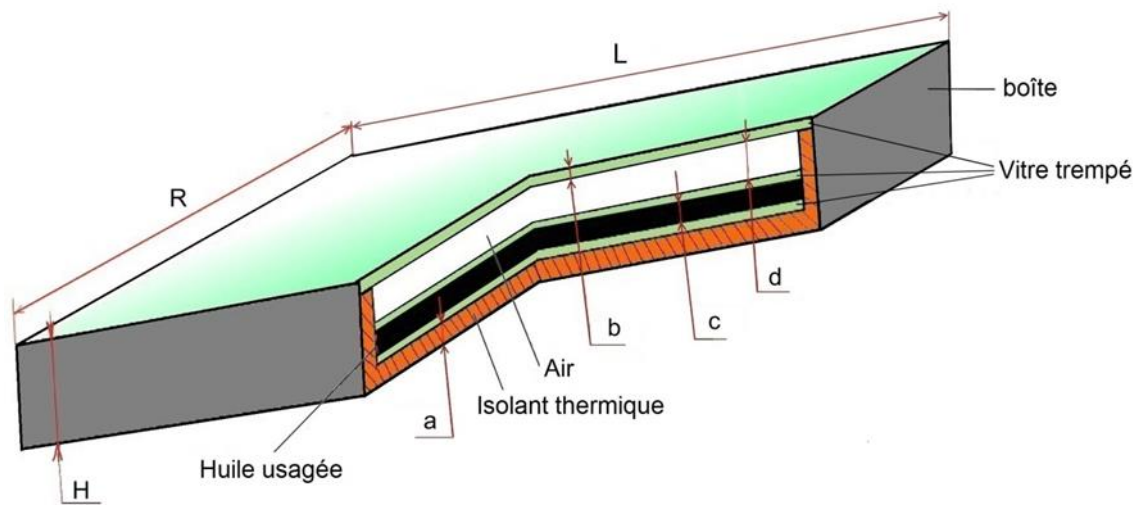


Fig. 3.4. Conception et spécifications du collecteur thermique [52].

3.3.2. Système d'alimentation photovoltaïque

Afin que le système soit 100% solaire, un panneau photovoltaïque d'une capacité de 25 watts et d'une tension de fonctionnement de 12V a été utilisé pour alimenter tous les systèmes électriques et électroniques du prototype (voir Fig. 3.5).

Dans ce cas, on pratique le pompage "au fil du soleil". La pompe et le moteur de traqueur sont couplés directement au panneau photovoltaïque via un contrôleur qui va permettre, entre autres, d'optimiser le rendement journalier du prototype.

Le panneau a été utilisé avec une capacité de 25 watts pour assurer le fonctionnement de la pompe à huile et du moteur de traqueur solaire, et ce même si l'ensoleillement est faible.

Sachant que la pompe à huile consomme entre 10 et 15 watts au maximum, et que le moteur de suiveur ne consomme que 5 watts, et que la consommation de système de contrôle est négligeable, 15 watts suffisent donc pour bien faire fonctionner tous les systèmes de prototype.

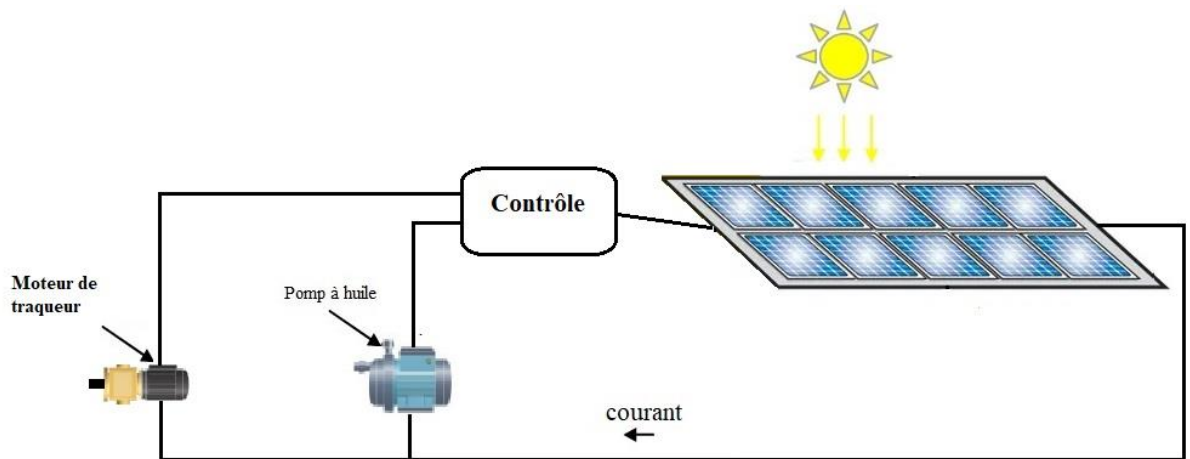


Fig. 3.5. Principe de fonctionnement de la circulation forcée d'huile.

Le panneau solaire alimente trois sections principales:

A- Le circuit de commande principal

Il contient un microcontrôleur programmable et plusieurs capteurs (thermique et optique) pour gérer tous les systèmes de l'appareil (pompe à huile et système de suivi solaire). Ce circuit fonctionne sur un programme qui détermine quand la pompe peut être démarrée et arrêtée. Par exemple, la pompe ne fonctionne pas lorsque la température de l'eau à l'intérieur du réservoir est supérieure à la température de l'huile à l'intérieur du collecteur thermique, afin que le processus inverse ne se réalise pas, situation qui survient le matin lorsque le temps est froid et le rayonnement faible.

B- Pompe à huile

La pompe à huile du prototype a été développée pour s'adapter aux conditions de fonctionnement optimales du prototype. Un moteur à courant continu et un réducteur de vitesse mécanique sont intégrés à une pompe à huile (Fig3.6).

Pour garantir que la pompe à huile ne s'arrête pas à un faible rayonnement solaire, un moteur fonctionnant à une tension de 8 volts à 14 volts a été utilisé. En effet, la tension du panneau solaire change avec le changement de rayonnement solaire.

Le débit d'huile dans la pompe varie en fonction de la vitesse de rotation de la pompe. Il a une relation directe avec l'irradiation solaire et la température de l'huile (fluidité de l'huile). Le débit d'huile moyen dans la pompe est d'environ 1,5 litre par minute.



Fig. 3.6. La pompe à huile installée dans le prototype.

C- Système de poursuite solaire

Dans ce travail, nous présentons la réalisation d'un suiveur solaire automatique à un axe. Il est destiné pour le collecteur thermique solaire et le panneau photovoltaïque (voir Fig.3.7). L'objectif visé est l'amélioration du gain en énergie thermique et électrique du système par rapport au système fixe. Notre dispositif d'instrumentation a été monté sur un héliostat que nous avons réalisé à base d'un moteur à courant continu et d'un réducteur de vitesse mécanique monté sur l'axe de rotation.

L'angle de rotation journalier est 120° et la vitesse de rotation est $6^\circ/s$.

Le système réalisé est capable de suivre fidèlement la position du soleil et il assure à chaque instant une adaptation entre la source et la charge au point de fonctionnement de la puissance maximale.

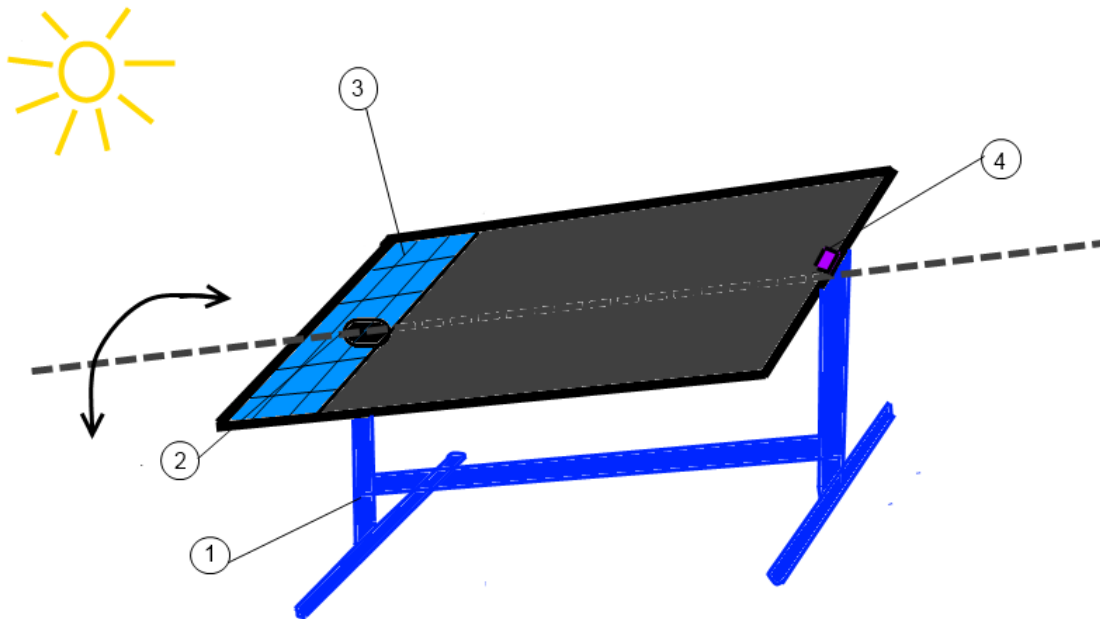


Fig. 3.7. Principaux composants du système de poursuite solaire: (1) support métallique en aluminium ; (2) moteur électrique avec réducteur mécanique ; (3) panneaux photovoltaïques ; (4) capteur optique.



Fig. 3.8. Moteur électrique de suiveur solaire avec réducteur mécanique.

3.4. Mode de fonctionnement

Ce système se comporte comme une serre qui absorbe la chaleur du soleil et la convertit en énergie thermique. La chaleur absorbée par un fluide circulant dans une

canalisation en cuivre, dans notre cas de l'huile usagée, est transmise à l'eau. Cet échange de chaleur se fait à l'intérieur d'un réservoir de stockage comprenant un serpentin [52].

Le prototype du collecteur thermodynamique avec et sans huile usagée accompagné d'un panneau PV est illustré à la Fig. 3.9. Étant donné que les fluides sombres présentent une bien meilleure efficacité d'absorption, le collecteur thermodynamique a été rempli d'huile usagée, Fig. 3.9-A.

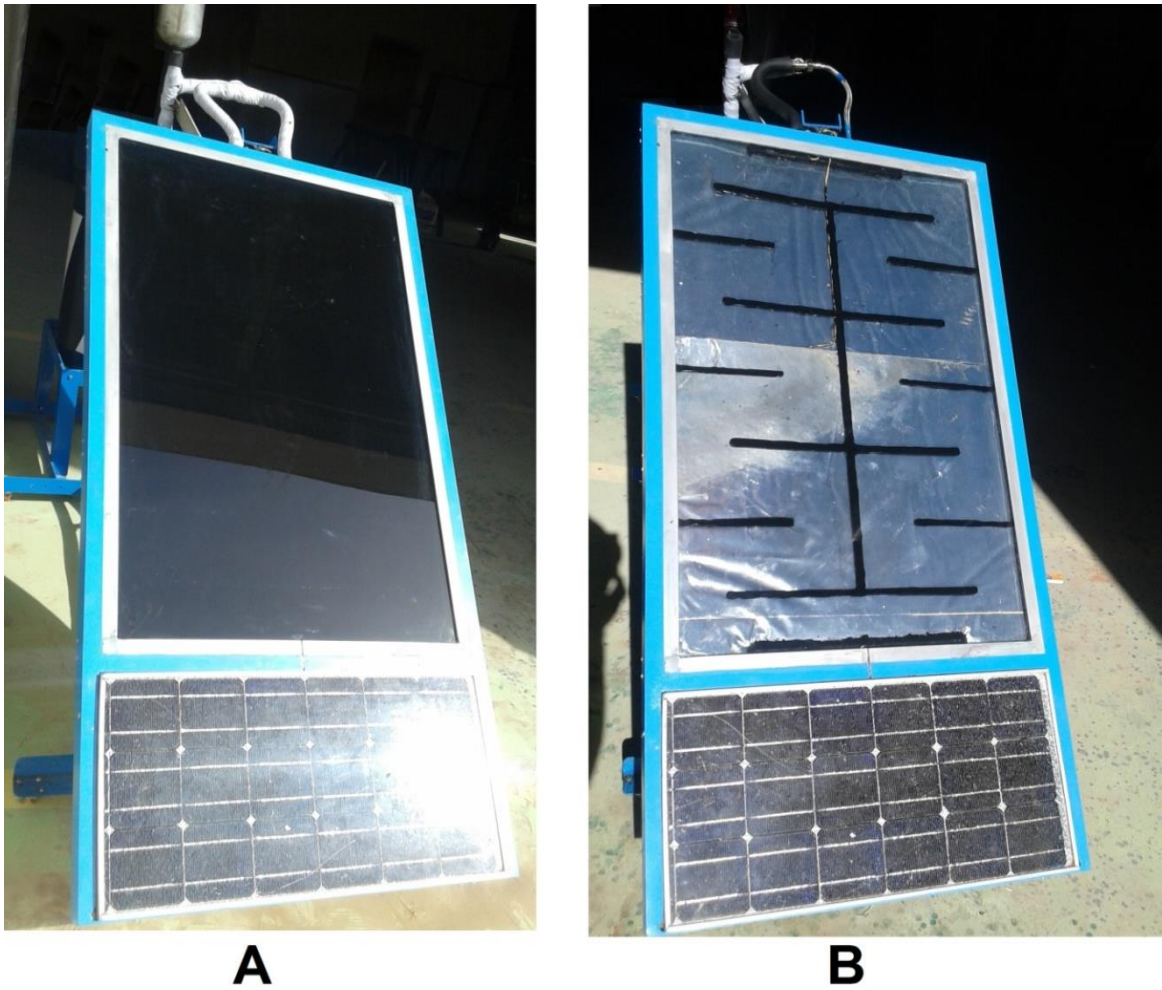


Fig. 3.9. Panneau PV avec collecteur thermodynamique, (A) avec huile et (B) sans huile [52].

3.5. Caractéristiques de l'huile usagée



Fig. 3.10. Huile usagée d'un moteur à combustion.

Les huiles moteur usagées et leurs ressources sont classées en: huile usagée de moteur, déchets aqueux, émulsion d'huile usée, mélanges d'huiles non émulsionnées (Fig. 3.10). L'huile pour moteur est principalement définie en termes de performances et de degré de viscosité. La mesure de la viscosité est proportionnelle au débit de résistance du fluide. Lorsque la viscosité est faible, l'efficacité du système augmente, ce qui facilite la circulation d'huile dans le tuyau et l'échangeur [53]. Cela signifie que l'huile usagée présente des caractéristiques avec de meilleures performances particulièrement quand la viscosité varie inversement avec la température [53,54].

La propriété la plus importante de l'huile lubrifiante est sa viscosité et sa variation avec les changements de température dans les conditions opérationnelles auxquelles elle est soumise. La viscosité dépend fortement de la température et varie en fonction de la pression et de la densité [53,54]. Avec l'augmentation de la température, la viscosité doit être indiquée pour une plage de valeurs de la température. L'huile usagée de moteur présente des avantages intéressants pour les applications d'énergie solaire; elle ne gèle pas à basse température et ne s'évapore pas à des températures élevées par rapport à d'autres liquides de transfert de chaleur.

3.5.1 Classification de l'huile

L'huile de moteur est principalement définie en termes de performances et de degré de viscosité [55]. Le tableau ci dessous montre des classifications de viscosité des huiles moteur, qui sont des lubrifiants automobiles, qui ont été définies et classées par la Society of

Automotive Engineers (SAE) des États-Unis [56]. C'est cette classification qui est utilisée en Algérie.

(SAE) a établi un système de codes numériques pour classer les huiles moteur selon leurs caractéristiques de viscosité. Elle est à l'origine des différents grades de viscosité d'huile (0W, 25W, 20, 60, 5W30, 10W40, etc.)

Plusieurs grandeurs physiques la déterminent, parmi lesquelles la viscosité dynamique et la cinématique

- **Tableau 3.2.** Classifications de viscosité des huiles moteur.

Grade SAE	Viscosité dynamique maximale en mPa.s (cP) à une température de :	Limite de pompabilité	Viscosité cinématique à 100°C en mm ² /S (cSt)	
			Mini	Maxi
0W	3250 à -30°C	60000 à -40°C	3,8	
5W	3500 à -25°C	60000 à -35°C	3,8	
10W	3500 à -20°C	60000 à -30°C	4,1	
15W	3500 à -15°C	60000 à -25°C	5,6	
20W	4500 à -10°C	60000 à -20°C	5,6	
25W	6000 à -5°C	60000 à -15°C	9,3	
20			5,6	9,3
30			9,3	12,5
40			12,5	16,3
50			16,3	21,9
60			21,9	26,1

La viscosité dynamique μ : Propriété qu'a tout fluide d'opposer une résistance aux forces qui tendent à déplacer les unes par rapport aux autres les particules qui le constituent [55].

$\tau = \mu.D$ où τ = contrainte tangentielle (N/m²) et D = gradient de vitesse (n-1)

La solution de cette équation pour la viscosité dynamique donne : $\mu = \tau/D$ en **Pa.s**.

La viscosité cinématique de l'huile : est égale à la viscosité dynamique divisée par la masse volumique du fluide et désignée par la lettre U_h (nu). Tapez une équation ici.

$$U_h = \frac{\mu}{\rho}$$

Unités

(**mPa.s**) : milliPascal.seconde (mPa.s).

μ en Poiseuille | ρ en kg/m³ | U en mm²/s.

Cependant l'unité normalisée pour exprimer la viscosité cinématique est le **mm²/s**, également exprimée en centi-Stokes (cSt).

3.6. Modèle physique et formulation mathématique

Avant de représenter le modèle physique et la formulation mathématique du prototype, nous donnons des détails sur le choix des dimensions du panneau thermique et des spécifications sur la conception illustrées à la Fig. 3.4. Concernant l'épaisseur externe du verre trempé, celui-ci joue un rôle important dans l'isolation thermique par effet de serre. Il assure la protection des autres couches d'une part. D'autre part, puisque ses propriétés optiques peuvent réduire l'efficacité du système, nous avons opté, après quelques tests pour différentes épaisseurs, pour une épaisseur de 4mm qui semble la meilleure.

La Fig. 3.4 montre également d'autres paramètres du dispositif tel que

- une couche d'air de 25 mm qui agit comme un isolant thermique entre les deux couches de verre trempé
- une couche d'absorbeur thermique d'huile usée qui se trouve entre deux couches de verre trempé séparées de 5 mm
- un isolant thermique à l'arrière [52].

3.6.1. Bilan énergétique

Le modèle physique représentant l'équilibre de transfert de chaleur, pour chaque composant du capteur solaire, de la connexion du tube et du réservoir de stockage est donné dans le tableau 3.3 en utilisant l'approche nodale. Le système d'équations permet de donner une approche théorique du modèle physique afin de connaître les différents échanges thermiques au sein du système et les différents paramètres impliqués [57]–[59].

Tableau 3.3. Équations d'équilibre de transfert de chaleur pour le système [52].

Composant	Equation
Collecteur solaire	
vitre de couverture (Vitrage, g)	$M_g C_{p_g} \frac{dT_g}{dt} = S_c [\alpha_g G + h_{r,g-sky}(T_{sky} - T_g) + h_{r,g-g1}(T_{g1} - T_g) - h_{v,g-fc}(T_g - T_{fc}) + h_{v,a}(T_a - T_g)] \quad (1)$
Air confiné	$M_{fc} C_{p_{fc}} \frac{dT_{fc}}{dt} = S_c [h_{v,fc-g1}(T_{g1} - T_{fc}) - h_{v,fc-g2}(T_{fc} - T_{g2})] \quad (2)$
Vitre1 (g1)	$M_g C_{p_g} \frac{dT_{g1}}{dt} = S_c [G \tau_g \alpha_g + h_{r,g1-g2}(T_{g2} - T_{g1}) + h_{v,g1-fc}(T_{fc} - T_{g1}) - h_{c,g1-c}(T_{g1} - T_c)] \quad (3)$
huile usée(LCP)	$\dot{m}_{fc} C_{p_f} \frac{dT_f}{dx} = W_c [\tau_g^2 \alpha_f G + h_{v,f-g1}(T_{g1} - T_f) - h_{v,f-g2}(T_f - T_{g2})] \quad (4)$
vitre 2 (g2)	$M_g C_{p_g} \frac{dT_{g2}}{dt} = S_c [h_{c,g2-a}(T_a - T_{g2}) - h_{v,f-g2}(T_p - T_f)] \quad (5)$
conduites de tubes externe	
	$\dot{m}_f C_{p_f} (T_{ft,i} - T_{ft,o}) = \dot{m}_f C_{p_f} (T_{f,o} - T_{f,i}) - S_t \cdot U_t (T_f - T_a) \quad (6)$
Réservoir de stockage	
Liquid	
Echangeur(huile use)	$\dot{m}_{ft} C_{p_f} (T_{ft,i} - T_{ft,o}) = A \cdot U_{t,st} (T_{ft} - T_{wt}) \quad (7)$
Eau chaude stockée	$m_{wt} C_{p_w} \frac{dT_{wt}}{dt} = \dot{m}_{ft} C_{p_f} (T_{ft,i} - T_{ft,o}) - A \cdot U_1 (T_{wt} - T_a) \quad (8)$

Où: m , \dot{m} , C_p , S_c , W_c ,,, sont la masse, le débit massique, la capacité calorifique spécifique, la surface du collecteur, la largeur du collecteur, l'absorptivité, la transmissivité et l'irradiation solaire respectivement.

La température équivalente du ciel est donnée par la [57]–[59].

$$T_{sky} = 0.0552 T_a^{1.5} \quad (9)$$

3.6.2. Coefficient de transfert de chaleur

3.6.2.1. Radiative

Le coefficient de transfert de chaleur radiatif entre la couverture de verre et le ciel peut être donné par l'équation suivante [60], [61]

$$h_{r,sky-g} = \sigma \varepsilon_g \frac{(T_g^2 - T_{sky}^2)(T_c^2 + T_{sky}^2)}{(T_g - T_a)} \quad (10)$$

Le coefficient de transfert de chaleur radiative entre deux plaques plates parallèles (i et j) est déterminé par l'équation suivante [61], [62].

$$h_{r,i-j} = \sigma \frac{(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_j} - 1} \quad (11)$$

3.6.2.2. Conductivité

Le transfert de chaleur conducteur est effectué à travers les composants adjacents. Le coefficient de transfert de chaleur dans ce cas est exprimé entre deux composants voisins i et j par la relation suivante.

$$h_{c,i-j} = 1 / \left(\frac{l_i}{k_i} + \frac{l_j}{k_j} \right) \quad (12)$$

3.7.2.3. Convective

Le coefficient de chaleur convectif dû au vent est décrit par la relation suivante [62], [63].

$$h_{v,a} = 5.7 + 3.8V_w \quad (13)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection pour un fluide (huile, eau, air) est déterminé en utilisant la relation suivante:

$$h_{v,f} = \frac{NuK_f}{D_H} \quad (14)$$

Où :

Nu et D_H sont le nombre de Nusselt et le diamètre hydraulique respectivement.

Pour déterminer le nombre de Nusselt, certaines corrélations peuvent être utilisées, comme l'ont rapporté plusieurs chercheurs [68]–[71]. Un écoulement peut être caractérisé par sa nature de convection (forcée ou naturelle) et son régime (laminaire, transitoire et turbulent). Pour le régime de l'écoulement, les corrélations rapportées par Sieder-Tate et Hausen, [65]–[67], peuvent être utilisées.

En cas de convection naturelle réalisée dans une cavité rectangulaire inclinée, le nombre de Nusselt est utilisé avec la corrélation rapportée par Hollands et al, [68]–[71].

3.6.3. Performance énergétique

Les indices de performance comme le gain thermique et le rendement thermique sont exprimés ci-dessous.

3.6.3.1. Energie thermique

La puissance thermique utile du système est donnée en suivant la relation:

$$Q_{th} = m_{wt} C_{p_w} \frac{\Delta T_{wt}}{\Delta t} = \frac{m_{wt} C_{p_w}}{t_j - t_i} (T_{w,j} - T_{w,i}) \quad (15)$$

3.6.3.2. Efficacité thermique

Les rendements thermiques instantanés calculés en utilisant la relation suivante:

$$\eta_{in} = \frac{dq_{th}}{G_{i,A}} = m_{wt} C_{p_w} \frac{(T_{w,j} - T_{w,i})}{G_{i,A}(t_j - t_i)} \quad (16)$$

Alors que l'efficacité thermique globale est calculée en utilisant la relation suivante:

$$\eta_{ov} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} dq_{th} dt}{A \int_{t_i}^{t_f} G_i dt} \quad (17)$$

3.6.3.3. Perte thermique

Pendant la nuit, la perte globale d'énergie thermique peut être calculée en utilisant la relation suivante:

$$P_{los} = \int_{t_i}^{t_f} dq_{th} dt \quad (18)$$

3.7 Simulation et Modélisation du circuit électrique du prototype

3.7.1 Partie générateur photovoltaïque

3.7.1.1 Modèle idéal

Le circuit équivalent du générateur photovoltaïque (voir figure 3.11) choisi est celui constitué d'une seule diode connectée en parallèle avec une source de photo-courant I_{ph} , qui est directement proportionnelle à l'irradiation solaire, ce modèle a été décrit par la formulation donnée ci-dessous [72], [73].

En utilisant la loi de Kirchhoff, le courant de sortie du générateur est :

$$I = I_{ph} - I_d \quad (19)$$

Où

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (20)$$

L'équation finale du courant photovoltaïque est donnée par:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{qV}{akT}\right) - 1 \right] \quad (21)$$

Avec

I est le courant de sortie

V est la tension de sortie

I_{ph} est le courant généré par la lumière solaire incidente

I_d est le courant de la diode Shockley

I_0 est le courant de saturation inverse de la diode

q est la charge électronique ($1,6 \times 10^{-19}$ C)

k est la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J / K)

T est la température de jonction

a est le facteur d'idéalité de la diode

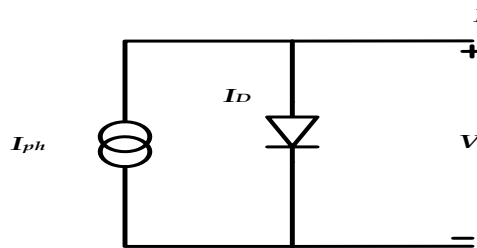


Fig. 3.11 Circuit équivalent électrique idéal du générateur photovoltaïque.

3.7.1.2 Modèle avec pertes ohmiques

Une résistance a été ajoutée en série avec le modèle idéal pour une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule. Le modèle résultant est illustré par la figure 3.12. Cette résistance (R_s) inclut les pertes existantes durant le fonctionnement [74], [75].

L'équation du courant est donnée par:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right] \quad (22)$$

Avec

$$V_T = \frac{kT}{q}, V_T \text{ est la tension thermique}$$

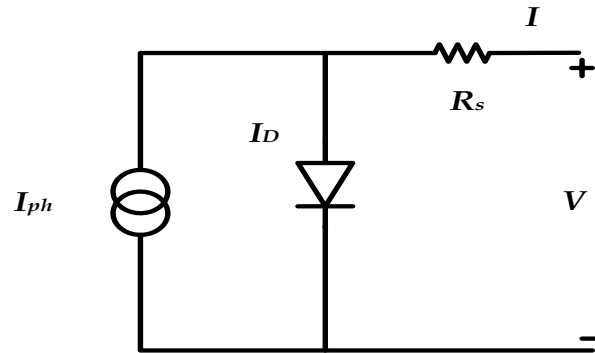


Fig. 3.12 Circuit électrique équivalent de générateur photovoltaïque (modèle à pertes ohmiques).

3.7.1.3. Modèle à une diode (modèle 1D)

Ce modèle est également appelé modèle \$R_p\$ car il prend en compte non seulement la perte de tension exprimée par la résistance série \$R_s\$ mais également les courants de fuite exprimés par la résistance parallèle \$R_p\$, qui est utilisée par les fabricants pour fournir les caractéristiques techniques de leurs panneaux [75]. Le courant de sortie peut être écrit comme [76],[77]:

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V+IR_s}{aV_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (23)$$

Le circuit électrique équivalent est présenté sur la figure 3.13.

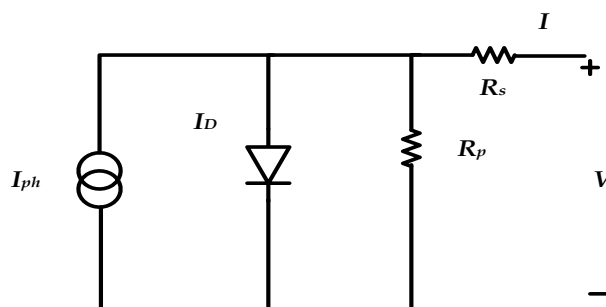


Fig. 3.13 Circuit électrique équivalent de cellule photovoltaïque (modèle à une diode).

3.7.1.4. PV Simulateur sous Matlab / Simulink

Le simulateur sous Matlab / Simulink est basé sur le modèle à une diode. Il a été développé pour simuler n'importe quel champ \$N_{ss} \times N_{pp}\$ (voir Figure 3.14), où \$N_{pp}\$ représente le nombre de branche connectés en parallèle et \$N_{ss}\$ représente le nombre de modules connectés en série

pour chaque branche. L'équation du courant de sortie écrite pour les modèles à une diode devient:

$$I = I_{ph}N_{pp} - I_0N_{pp} \left[\exp \left(\frac{V + I \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) R_s}{aV_T N_{ss}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right) R_s}{R_p \left(\frac{N_{ss}}{N_{pp}} \right)} \quad (24)$$

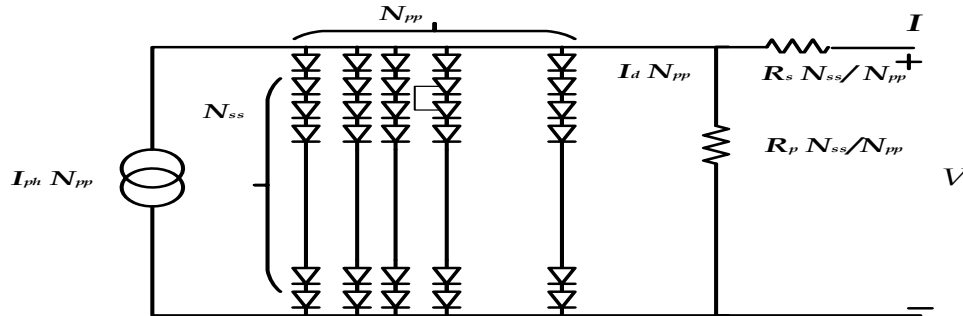


Fig. 3.14 Configuration du champ photovoltaïque.

La figure 3.15 montre le bloc global sous Matlab / Simulink d'un générateur photovoltaïque avec une configuration parallèle et série ($N_{ss} \times N_{pp}$). Le modèle détaillé basé sur un modèle à diode est illustré dans les figures 3.16.

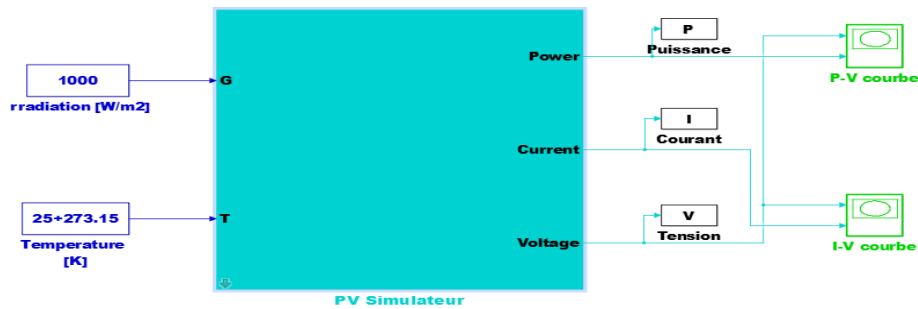


Fig. 3.15 Bloc global de PV simulateur.

Discrete,
Ts = 0.0001 s.

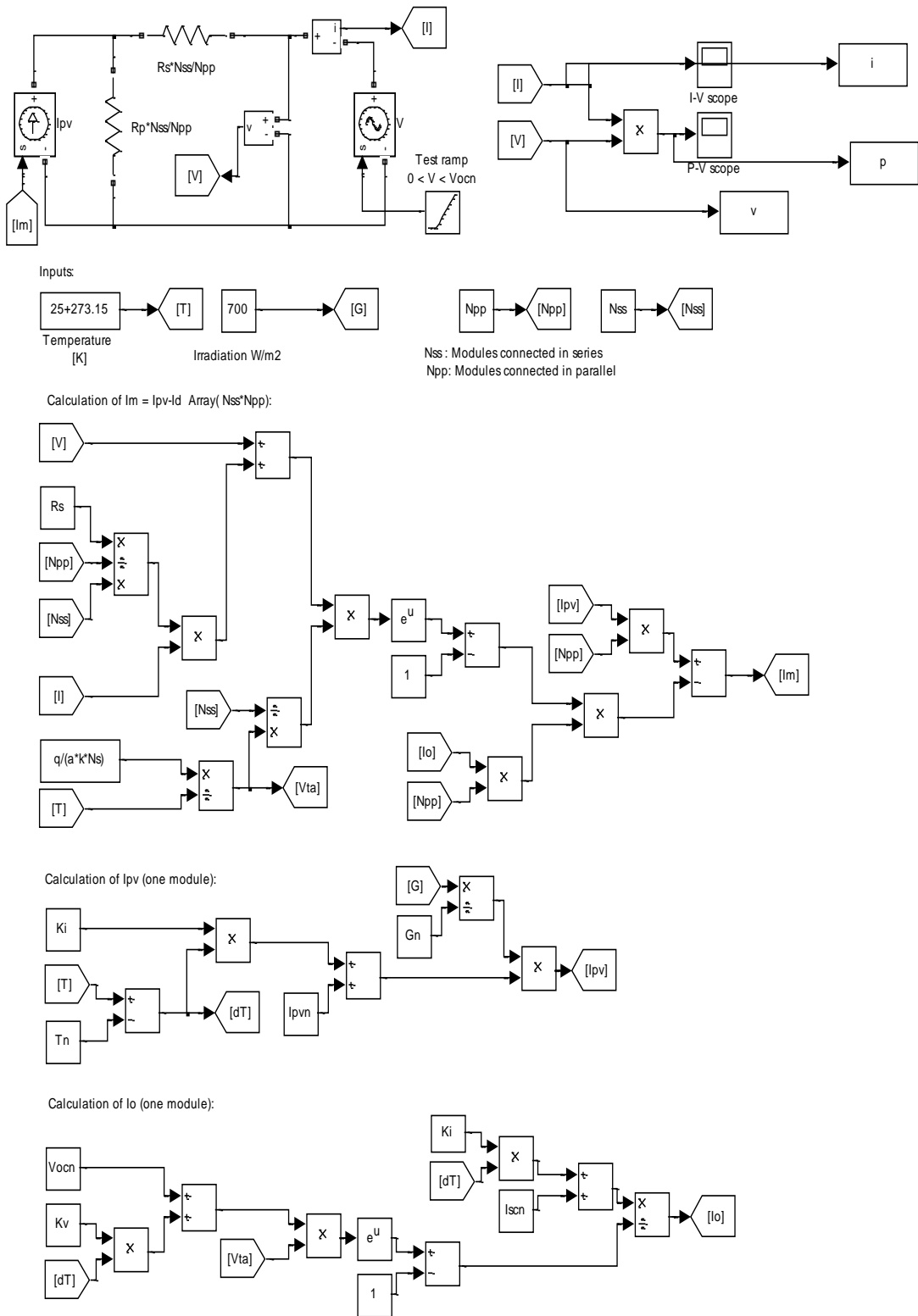


Fig. 3.16 Le modèle détaillé basé sur un modèle à diode.

3.7.1.5. Simulation des caractéristiques I-V/ P-V

Dans cette partie, la simulation des caractéristiques I-V et P-V du module I-75 et d'un champ composé d'une configuration série / parallèle ($N_{ss} = 3$, $N_{pp} = 2$) sous les conditions standard (1000 w/m^2 et $25 \text{ }^\circ\text{C}$) sont représentés dans les figures(fig3.17, fig3.18)

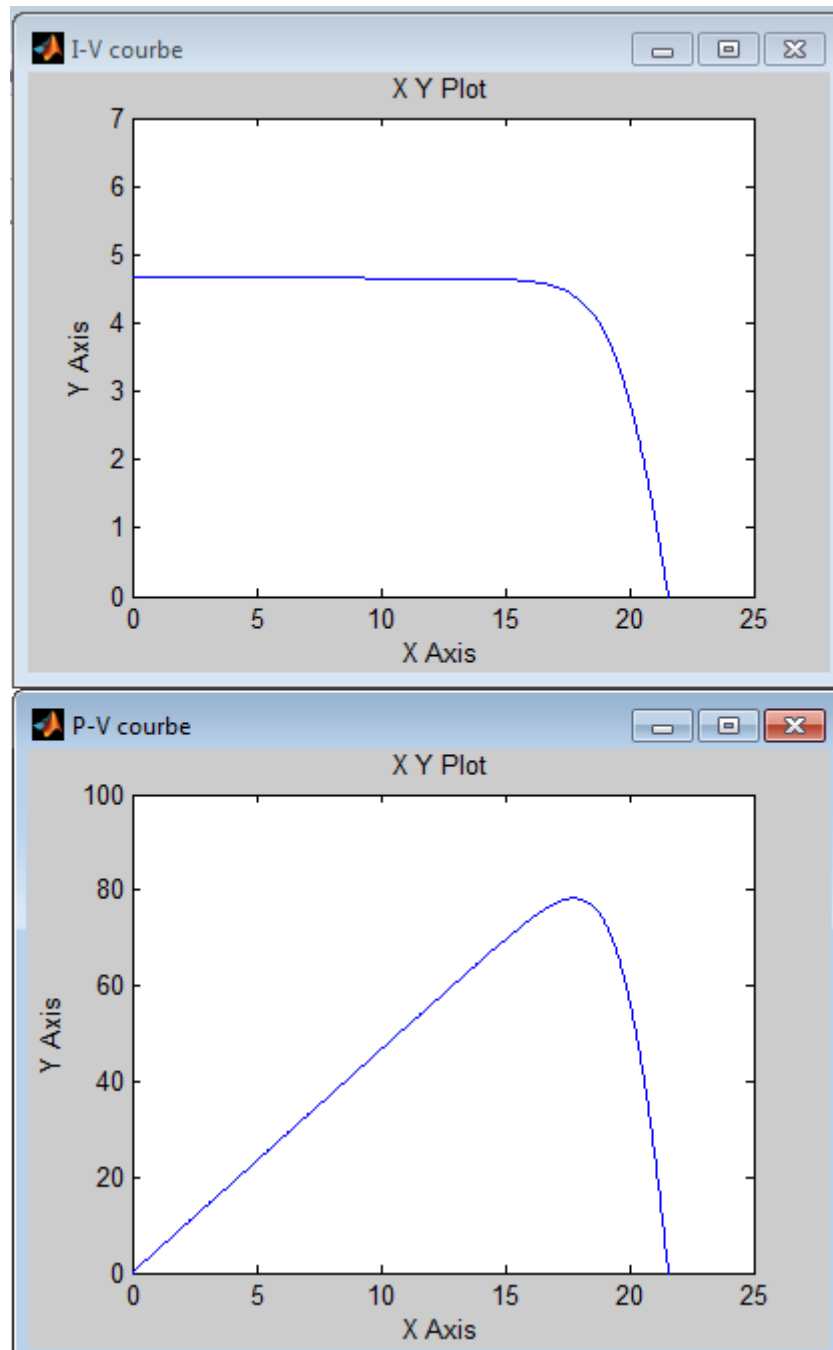


Fig. 3.17 Simulation des caractéristiques I-V et P-V du module I- 75 W.

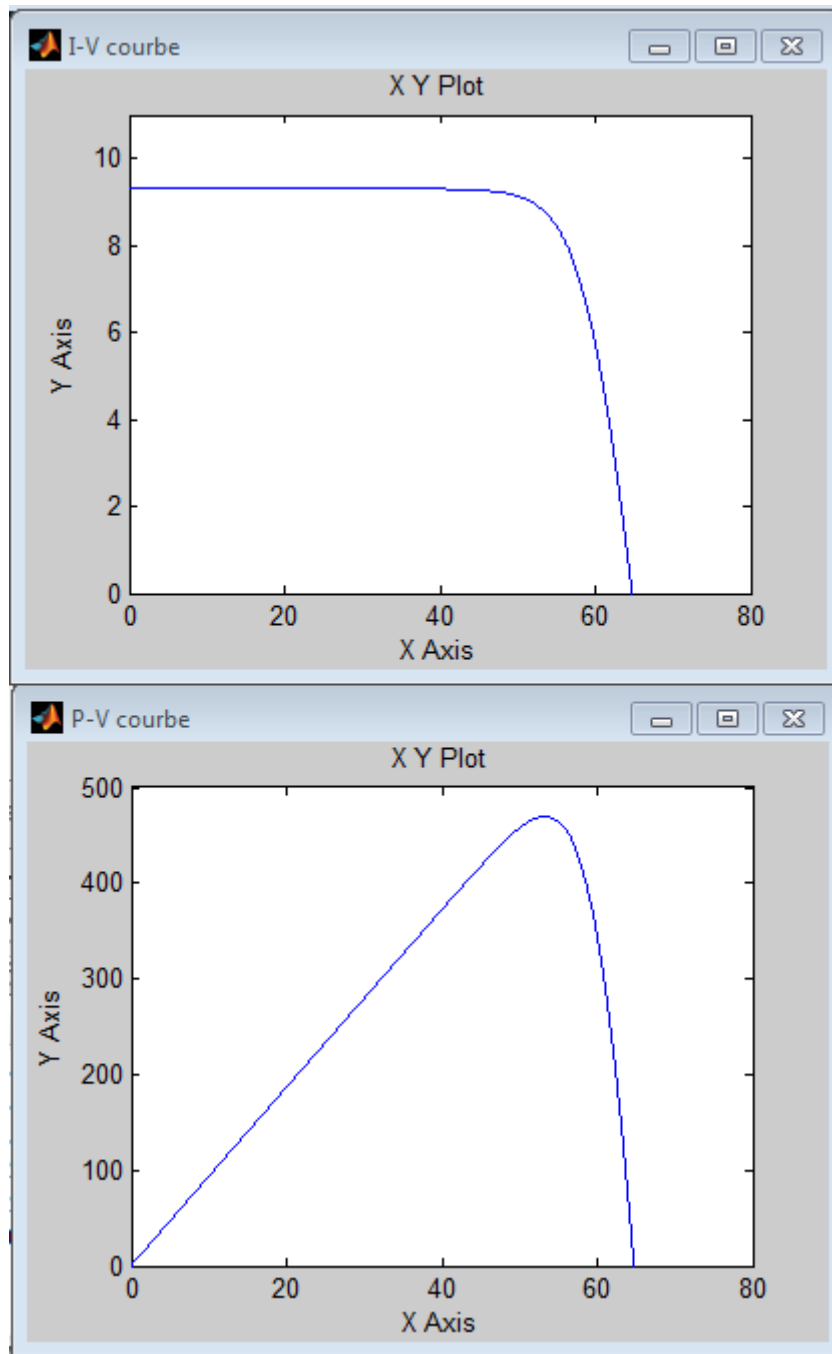


Fig. 3.18 Simulation des caractéristiques I-V et P-V du champ photovoltaïque ($N_{ss}= 3$, $N_{pp}= 2$).

3.7.2 Description et simulation du circuit de commande sous Proteus

3.7.2.1 Algorithme de gestion de prototype réalisé

Pour avoir un bon fonctionnement des systèmes électriques, il est nécessaire de mettre en place un bon plan de gestion, que ce soit lorsque le système est en état de fonctionnement par chauffage solaire ou par chauffage à l'électricité domestique. Cela est obtenu grâce à des algorithmes d'économie énergétique.

L'algorithme proposé dans notre cas est représenté ci-dessous :

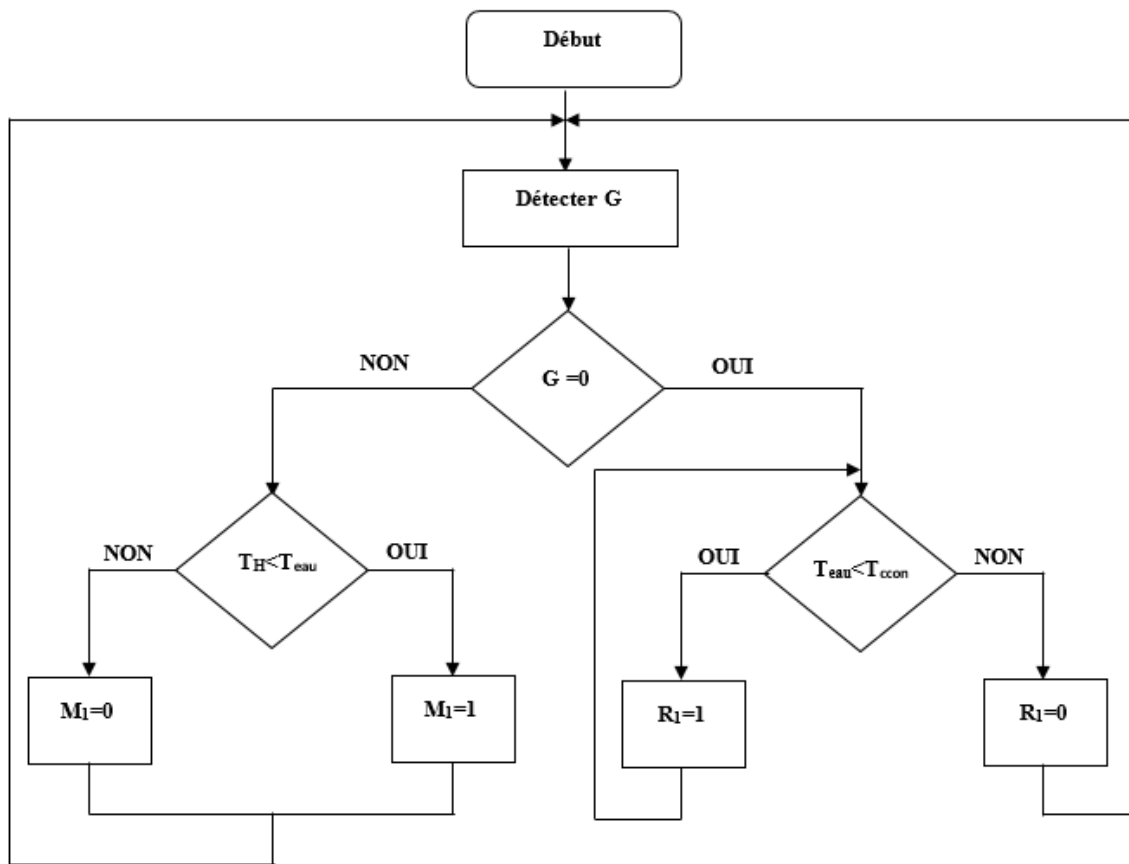


Fig. 3.19 Organigramme de gestion de commande électrique

L'algorithme présenté, figure 3.19, illustre l'aspect de fonctionnement du chauffage pour une économie d'énergie. L'algorithme compare la température d'huile dans le capteur thermique et la température d'eau dans le réservoir selon que :

1. le rayonnement solaire est suffisant (le panneau solaire fournit un courant électrique suffisant). Si la température d'huile est supérieure à la température d'eau ($T_{eau} < T_H$), l'algorithme de contrôle envoie une commande pour démarrer la pompe à huile pour chauffer l'eau, et le chauffage se fait par la chaleur du soleil.
2. le cas contraire ($T_H < T_{eau}$), l'algorithme de contrôle donne l'ordre d'arrêter la pompe à huile malgré la présence de rayonnement solaire pour maintenir la température de l'eau chaude à l'intérieur du réservoir.
3. le cas d'absence de rayonnement solaire ou durant la nuit : Si la température de l'eau est inférieure à la température de consigne ($T_{eau} < T_{con}$), l'algorithme permet l'alimentation de la résistance électrique pour chauffer l'eau jusqu'à ce que le système s'arrête indiquant que la température de consigne est atteinte. Le cycle est répété selon les conditions énoncées dans le système de programmation.

Où : T_{eau} : température de l'eau

T_{con} : température de consigne

T_{H} : température d'huile

I_{n} : courant nominal de la pompe

I_{G} : courant produit par le PV

3.7.2.2 Circuit électrique de commande

La figure 3.20 montre le circuit réalisé dans cette étude et incorporé sur le prototype. Avant son élaboration ce circuit a d'abord été simulé avec succès avec le software Proteus (voir figure 3.21

Le système électrique se compose de 5 sections (voir figure 3.21)

- Section 1- Le circuit de contrôle est chargé de contrôler tous les systèmes électroniques du prototype. Il est composé de transistors et des comparateurs. Il peut être remplacé par un microcontrôleur. Les informations du système lui sont transmises par des capteurs thermiques et mécaniques, pour le traitement.
- Section 2- La source d'alimentation est composée du panneau PV et d'un convertisseur DC/DC qui stabilise la source d'alimentation. Cette section est responsable d'alimentation des systèmes électriques du prototype.
- Section 3- Le système de pompage, qui est responsable de la circulation de l'huile chaude du collecteur thermique vers le réservoir d'eau. Il se compose d'un moteur à courant continu (M1) et d'un simple circuit de commande. Le système fonctionne lorsque la température de l'huile est plus chaude que la température de l'eau à l'intérieur du réservoir. Ainsi le circuit de contrôle comprend un circuit comparateur et des capteurs thermiques, LM35, pour la mesure des températures de l'eau et de l'huile, En ce qui concerne le circuit expérimental, nous avons utilisé des détecteurs thermiques intégrés avec un amplificateur de signal, figure 3.22
- Section 4- Le système de poursuite solaire, contient un moteur à courant continu M2 avec un réducteur de vitesse mécanique intégré et deux capteurs mécaniques SW4; SW5. Il contient également deux détecteurs optiques, LDR1;LDR2, pour identifier la direction de la source lumineuse. Il contient également aussi une batterie qui alimente uniquement le système de poursuit solaire et le réinitialise en dirigeant vers le lever du soleil pour qu'il fonctionne le lendemain.

- Section 5- Cette section est responsable du chauffage de l'eau avec l'électricité domestique (220v), comme le montre la figure 3.21, elle se compose d'une source de 220 V et d'une résistance chauffante de 600 watts et d'un système de commande simple contrôlé par le circuit de contrôle de la section1.

Remarque: Dans cette partie, nous avons réalisé et installé le système de suivi solaire sur le prototype et il a été testé avec succès. Nous ne l'avons pas utilisé dans les expériences sur terrain qui ont été menées, mais nous l'introduirons avec d'autres expériences de recherche approfondies.

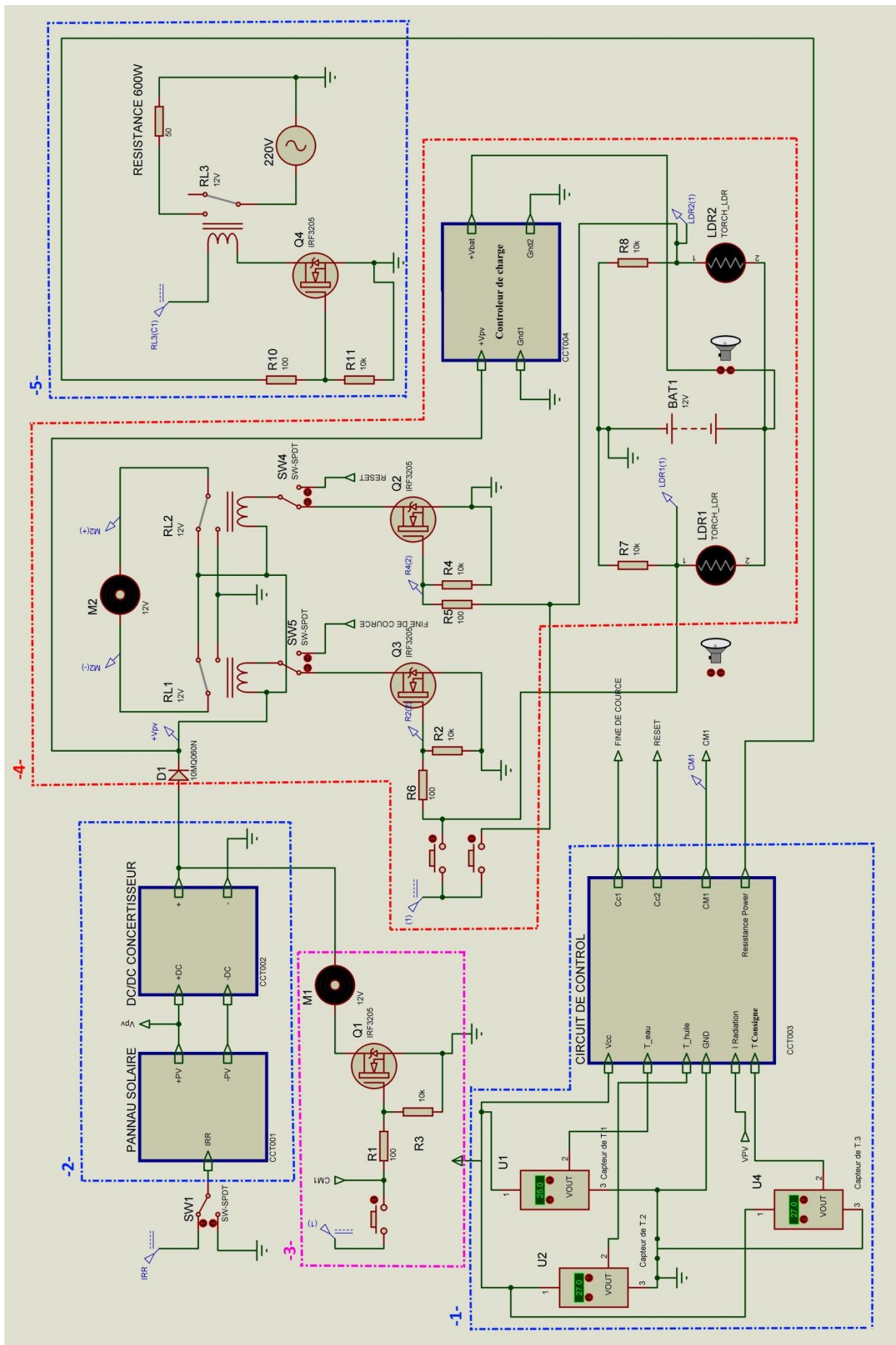


Fig 3.21 Simulation du système électrique



Fig 3.22 Capteur de température utilisé dans le prototype

3.8. Sites d'expérimentation

Les essais expérimentaux ont eu lieu à l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES), située à Bousmail, dans le nord de l'Algérie (voir Fig. 3.10). Cette région est modérément chaude tout au long de l'année. La ville de Bousmail est située aux données géographiques (latitude: $36^{\circ} 38'33''$ nord, longitude: $2^{\circ} 41'24''$ est, pour une altitude de 15 mètres / niveau de la mer).

Le tableau 3.4 fournit le jour moyen mensuel des paramètres météorologiques (irradiation solaire G, températures minimales T_{min} et maximales T_{max}, humidité relative RH).

Tableau 3.4. Mesure mensuelle des paramètres météorologiques moyens à Bousmail (2016)

Mois	G(KWh/m ²)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	RH (%)	Vitesse de vent (m/s)
Janvier	118.55	8.14	23.18	61.08	3.57
Février	119.01	7.20	23.78	57.15	4.32
Mars	157.36	7.00	33.66	60.83	3.65
Avril	146.55	10.25	22.66	65.35	2.67
Mai	144.04	10.54	31.96	65.81	2.79
Juin	161.28	16.24	33.00	66.52	2.56
Juillet	166.84	16.90	37.10	69.62	2.51
Août	176.29	10.42	35.48	69.38	2.40
Septembre	166.14	8.72	34.40	62.35	2.32
Octobre	153.48	16.70	36.8	64.21	2.30
Novembre	106.85	9.60	32.06	57.38	3.21
Décembre	119.30	7.00	26.00	64.03	2.87

Les valeurs de ce tableau ont été extraites de la mesure de la station météorologique à l'unité de développement des équipements solaires.



Fig. 3.23. l'Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) (Photo satellitaire).

3.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de donner une description technique détaillée de notre prototype chauffe-eau solaire qui utilise de l'huile usagée d'engin à la fois comme absorbeur et fluide caloporteur pour chauffer l'eau trouvée dans le réservoir à travers une électropompe. Nous avons commencé par clarifier l'idée et la nouveauté de ce système, suivi d'explications sur le choix des composants du système. De son générateur photovoltaïque et sa fonction d'alimentation de tous les systèmes électriques et électroniques. Enfin, nous avons présenté le système de pompage d'huile et le système de suiveur solaire. Par la suite, nous avons expliqué le mode de fonctionnement du prototype ainsi que la classification des huiles, le modèle physique et la formulation mathématique du système.

Nous avons terminé par la présentation des caractéristiques météorologiques et géographiques du site où le prototype a été testé.

Chapitre 4 :

Validation expérimentale

Sommaire

4.1. Introduction	72
4.1. Mesure et résultats expérimentaux	72
4.2. Test de prototype sans eau	74
4.3. Test de prototype avec de l'eau	77
4.4. Température de l'eau et de l'huile	80
4.5. Effet de l'irradiation solaire sur la température de l'eau	81
4.6. Caractéristiques du système pour l'eau de chauffage solaire par rapport à l'eau de chauffage électrique	81
4.7 Pertes thermiques en nuit	85
4.8. Conclusion	86

CHAPITRE 4 : Validation expérimentale

4.1. Introduction

Ce chapitre présente tous les résultats des études expérimentales qui ont été menées à l'unité de développement des équipements solaire (UDES) Tipaza. Plusieurs axes ont été traités afin de montrer l'effet de l'irradiation solaire sur un nouveau système solaire de Chauffe-eau solaire.

Les étapes essentielles de l'étude expérimentale sont les suivantes:

- Mesure de la variation de température d'huile dans un réservoir vide
- Mesure de la variation de la température de l'eau et de l'huile à l'intérieur d'un réservoir plein d'eau et leur comparaison sur deux jours avec des conditions climatiques différentes (irradiation et température ambiante).
- Comparaison de l'efficacité du système du chauffage solaire sous irradiation ordinaire et chauffage conventionnel à résistance électrique.
- Stockage de chaleur et sa perte dans le réservoir.

4.1. Mesure et résultats expérimentaux

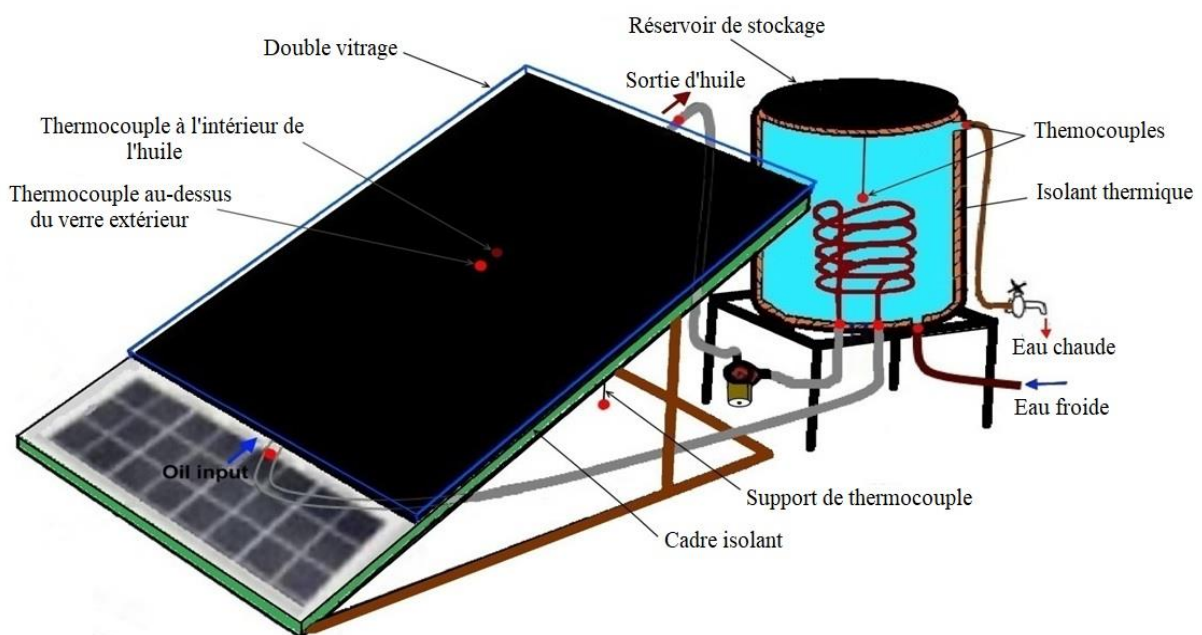


Fig. 4.1. Le placement des thermocouples dans le système principal.

Les différents tests expérimentaux ont été réalisés en septembre 2016 et février 2017. Le prototype était orienté vers la position sud. Plusieurs thermocouples ont été installés à différents endroits du prototype pour assurer la mesure de diverses températures, telles que les températures de la surface du vitrage, de l'huile à l'intérieur de la plaque absorbante, du collecteur d'huile d'entrée et de sortie, de l'eau stockée à l'intérieur du réservoir, de l'eau d'entrée et de sortie. En outre, la température ambiante et le plan vertical horizontal du rayonnement solaire global orienté vers le sud ont été mesurés et échantillonnés à 5 minutes d'intervalle en utilisant un système d'enregistrement de données. Le rayonnement solaire a été mesuré par le pyranomètre CMP11. Toutes les températures ont été mesurées par des thermocouples de type K avec une précision de ± 1.5 C.

Pour mesurer la température de l'eau stockée, trois thermocouples ont été insérés à l'intérieur du réservoir de stockage. Les thermocouples ont été attachés pour mesurer la température de l'eau au centre du réservoir (Fig.4.1). Cette disposition permet de vérifier la stratification de la température de l'eau dans le réservoir de stockage. Ces types de chauffe-eau solaires subissent beaucoup de pertes de chaleur ambiante pendant la nuit. Pour évaluer la capacité de rétention de chaleur de ce système, le coefficient des pertes thermiques de stockage d'eau est calculé pour diverses températures initiales de cette eau. Elle est alors prise en fonction de la différence de température moyenne pendant la nuit. Les premiers tests expérimentaux sur le prototype ont été réalisés fin septembre 2016 avec une température ambiante autour de 23° C et en février 2017 avec une température ambiante ne dépassant pas 18° C.

Les scénarios et étapes suivants ont été mis en place afin d'évaluer la performance du dispositif d'eau de chauffage-solaire proposé.

Première étape: tester le prototype sans eau pour déterminer le niveau de température maximum de l'huile pouvant être obtenu à partir du système et les caractéristiques thermiques du collecteur.

- La deuxième étape: tester le prototype avec de l'eau stockée, afin de déterminer la valeur de la température de l'eau stockée, sous un rayonnement solaire typique.
- La troisième étape: comparer les niveaux de température atteints par les deux fluides (eau stockée et huile usagée) pendant une journée entière;
- Quatrième étape: le comportement de la température de l'eau stockée est examiné sur deux jours différents pour différents niveaux d'irradiation solaire;

- La cinquième étape: pour le même temps de chauffe, la partie eau du prototype, soumise à un rayonnement solaire de $1000\text{W} / \text{m}^2$, est comparée au dispositif de chauffage électrique conventionnel intégré, avec une puissance de 600 W . Les paramètres et les caractéristiques du système sont ensuite extraites, telles que l'efficacité, la puissance ...
- Dernière étape: les pertes thermiques du ballon de stockage pendant la nuit seront estimées afin de tester l'efficacité d'isolation du ballon de stockage.

4.2. Test du prototype sans eau

Dans cette partie, nous avons effectué plusieurs tests sur le prototype exposé sans eau et enregistré la variation de la température de l'huile par rapport à la variation du rayonnement solaire sur une période d'une journée sans échange thermique.

La Fig.4.2 montre la variation de l'irradiation solaire, des huiles usagées et de la température ambiante pour la journée du 29 septembre 2016 du lever au coucher du soleil. On remarque que la température de l'huile atteint $100\text{ }^\circ\text{C}$ vers 13h lorsque le soleil est au zénith ($960\text{ w} / \text{m}^2$). Une telle température est atteinte même si la température ambiante ne dépasse pas $25\text{ }^\circ\text{C}$ avec des pertes de chaleur de l'appareil. De cette figure nous observons que la température de l'huile suit l'irradiation solaire. La température élevée atteinte par l'huile dans ce cas peut s'expliquer par le rayonnement solaire (temps clair), les propriétés thermo-physiques et optiques de l'huile, ainsi que par l'absence d'échange thermique direct avec l'eau dans le réservoir.

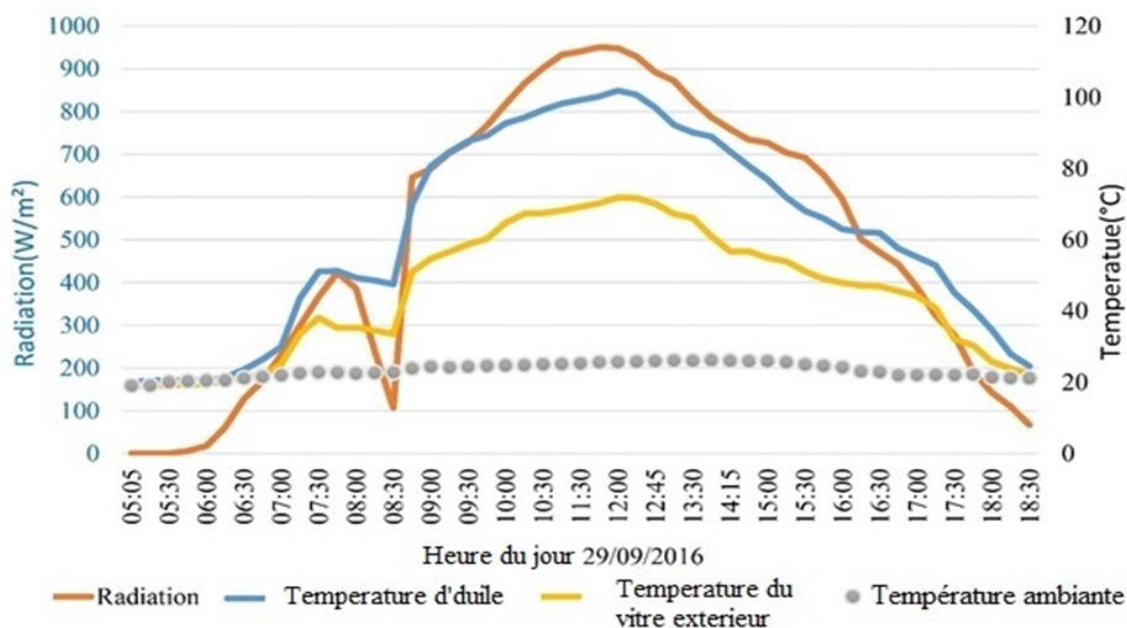


Fig. 4.2. L'effet de la variation du rayonnement solaire sur la température de l'huile.

Cette expérience est très importante, car nous avons placé le capteur solaire sous un ensoleillement idéal (1000 W / m^2) et que la température du capteur est égale à la température ambiante. Nous avons par la suite mesuré la variation de la température de l'huile à l'intérieur du capteur thermique jusqu'à la saturation.

Cette expérience nous permet de mesurer l'efficacité thermique et les caractéristiques thermiques du collecteur ceci pour un volume d'huile de 3,4L à l'intérieur du capteur thermique et une surface du capteur de $0,6 \text{ m}^2$.



Fig.4.3. Une image du prototype

La Fig. 4.3 montre cette expérience pour une journée ensoleillée et un ciel clair où la température de l'huile à l'intérieur du système a atteint $94 \text{ }^\circ \text{C}$ après 20 minutes avec un rayonnement solaire estimé à environ 1000 W / m^2 .

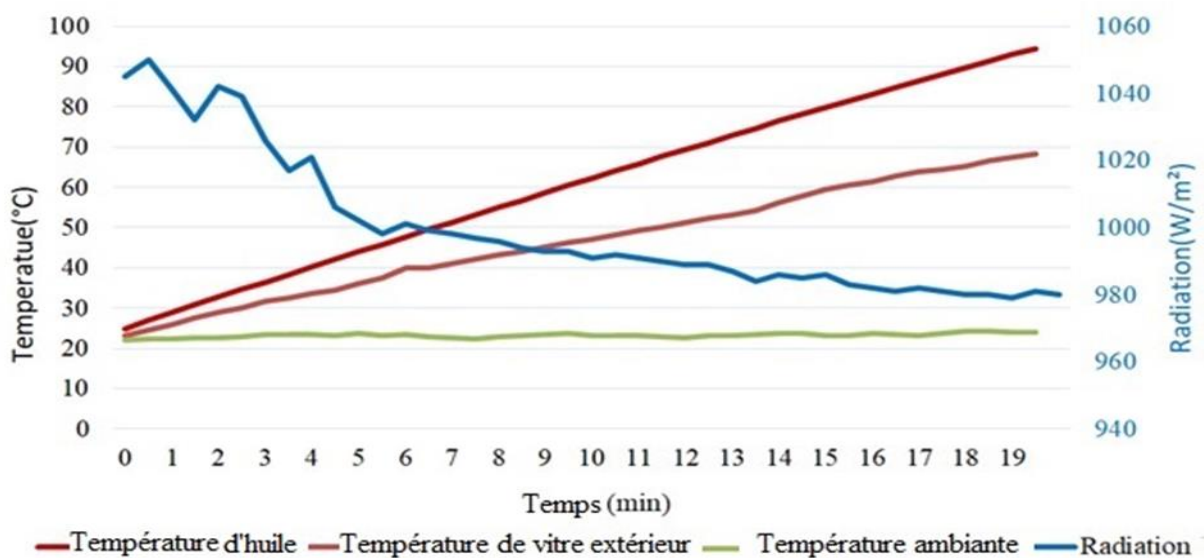


Fig. 4.4.L'effet du rayonnement solaire sur le capteur thermique sans échange de chaleur avec l'eau.

De la Fig.4.4. Nous notons que sous un rayonnement solaire variant entre 980 W / m^2 et 1050 W / m^2 , la température de l'huile augmente pour atteindre $94 \text{ }^\circ \text{C}$ alors que la température ambiante ne dépasse pas $24 \text{ }^\circ \text{C}$. Il est important de spécifier des pertes de chaleur se produisent puisque le verre extérieur du collecteur atteint $68 \text{ }^\circ \text{C}$.

L'efficacité a été calculée durant les 20 premières minutes de l'expérience et que la variation de température est linéaire, pour éviter l'état de saturation.

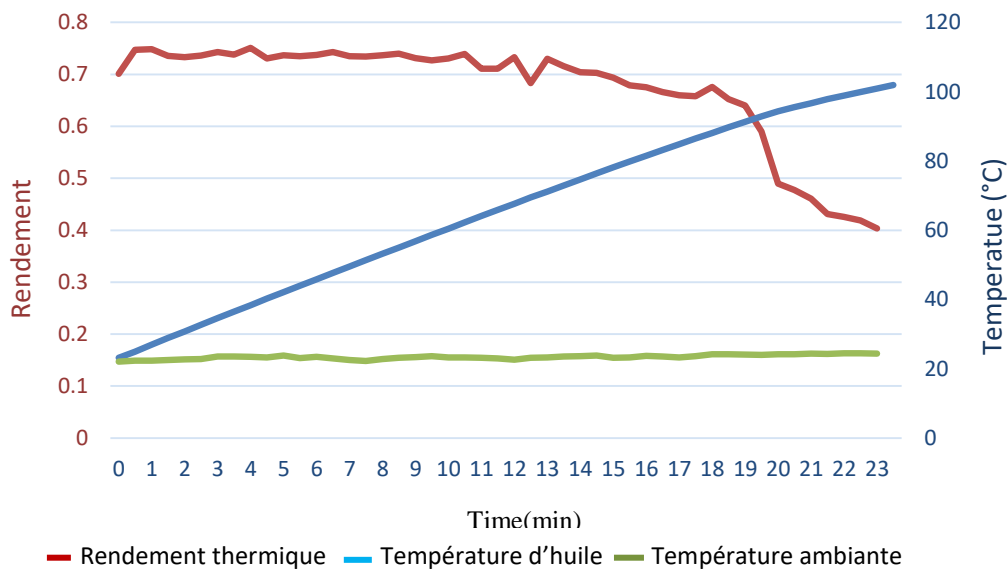


Fig. 4.5. L'efficacité du capteur thermique dans des conditions météorologiques appropriées.

Grâce aux résultats expérimentaux de cette expérience, et après avoir calculé l'efficacité du capteur thermique à l'aide de l'équation (17) du chapitre 3, les principales expectatives ont été obtenues, elles sont illustrées par les résultats de la Fig. 4.5. Nous remarquons que l'efficacité du capteur thermique est excellente de sorte qu'elle dépasse 70%. Elle est constante durant les dix premières minutes du fait de la variation linéaire de la température de l'huile puis commence à diminuer jusqu'à atteindre 40% après environ 23 min. Cela peut s'expliquer par le début de la saturation du système puisque l'huile, durant cette période, n'emmagasine pas beaucoup de chaleur en comparaison avec les premières minutes de l'expérience et c'est ce qui est observé par la courbure de la courbe température de l'huile.

Nous concluons que l'efficacité moyenne du collecteur prototype est $\eta_c = 71\%$. Le chauffage commence de $23 \text{ }^\circ \text{C}$ à $94 \text{ }^\circ \text{C}$ en 20 minutes, dans les conditions météorologiques suivantes: rayonnement solaire $G = 1000 \text{ W / m}^2$, et la température ambiante $T_{am} = 23 \text{ }^\circ \text{C}$.

4.3. Test de prototype avec de l'eau

Dans cette étape, deux expériences ont été menées sur le prototype avec un réservoir d'eau de 50 litres, une en septembre 2016 et la seconde en février 2017. A partir des données analysées, nous observons que la température de l'eau continue d'augmenter malgré la baisse de l'irradiation solaire pendant la journée. Cela est possible grâce à la quantité de chaleur stockée dans l'huile usagée. Cela signifie que la température de l'huile est supérieure à la température de l'eau et que l'échange thermique entre l'eau et l'huile est toujours efficace (Fig. 4.10).

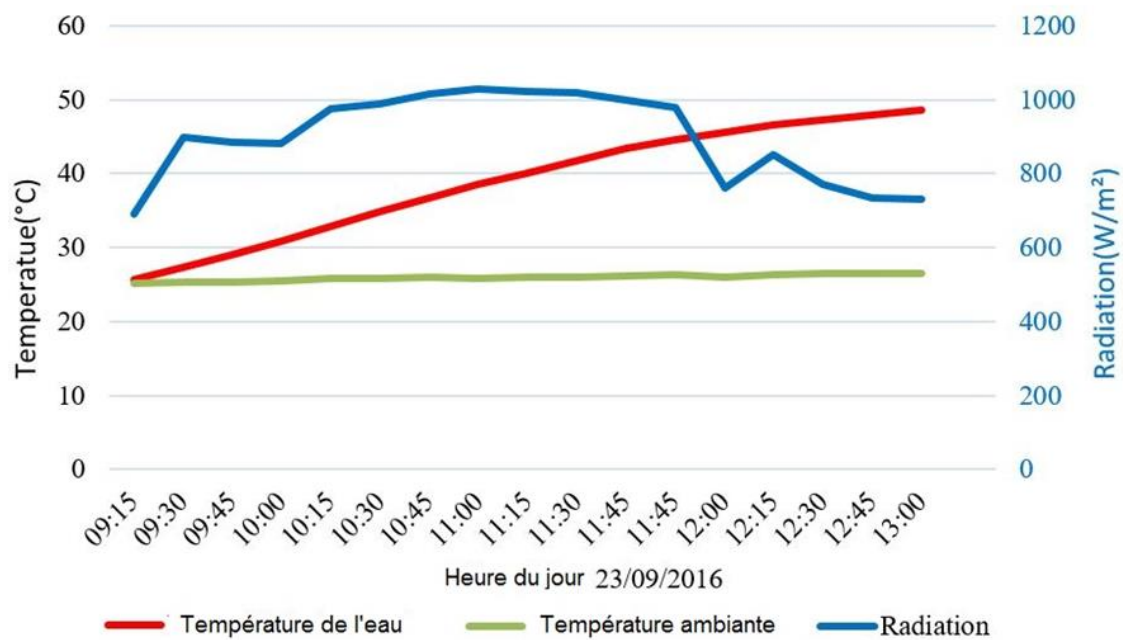


Fig. 4.6. Evolution de la température de l'eau et de l'irradiation solaire du système avec réservoir d'eau intégré en septembre.

L'expérience de la Fig.4.6 a été effectuée le 23/09/2016, à partir de 09h00 et s'est arrêtée lorsque la température de l'eau s'est stabilisée autour de 49 ° C, qui a été atteinte vers 13h00, pour une température ambiante inférieure à 27 ° C et des pertes de chaleur. À partir de ces résultats, l'énergie produite par le transfert de chaleur, qui est calculée à l'aide de l'équation (15) du chapitre 3, est comparée à l'équation d'énergie disponible pour la lumière solaire totale, équation 10, chapitre 3.

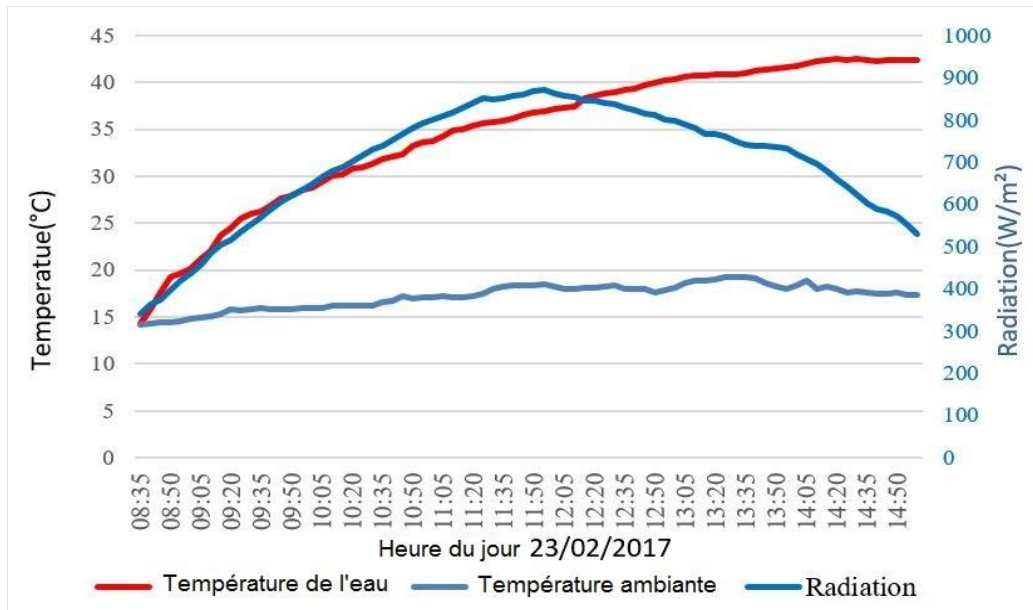


Fig. 4.7. Evolution de la température de l'eau et de l'irradiation solaire du système avec réservoir d'eau intégré en février.

La Fig. 4.7 montre que la température de l'eau augmente pour atteindre 42 °C alors que la température ambiante ne dépasse pas 19 °C. À partir de ces résultats, nous pouvons conclure que notre système fonctionne correctement. En effet, si l'eau n'atteint pas les températures de septembre, c'est à cause de l'environnement ambiant, qui refroidit le système. On peut également supposer que l'effet de l'irradiation solaire est à peu près le même qu'en septembre.

Fig. 4.8 montre que l'efficacité augmente au début et atteint un maximum de 80%. Cela est dû à la grande différence entre les températures de l'eau et de l'huile. Puis, à partir de 10h00, l'efficacité diminue jusqu'à 30%. Cela est dû à la faible variation de température entre l'eau et l'huile et à la saturation du système, malgré la présence d'une irradiation solaire importante.

Comme pour la Fig. 4.8, la Fig. 4.9 montre presque le même comportement qu'en septembre. On constate une augmentation en début de journée puis une diminution, pendant presque toute la journée, suite au déclin de l'irradiation solaire.

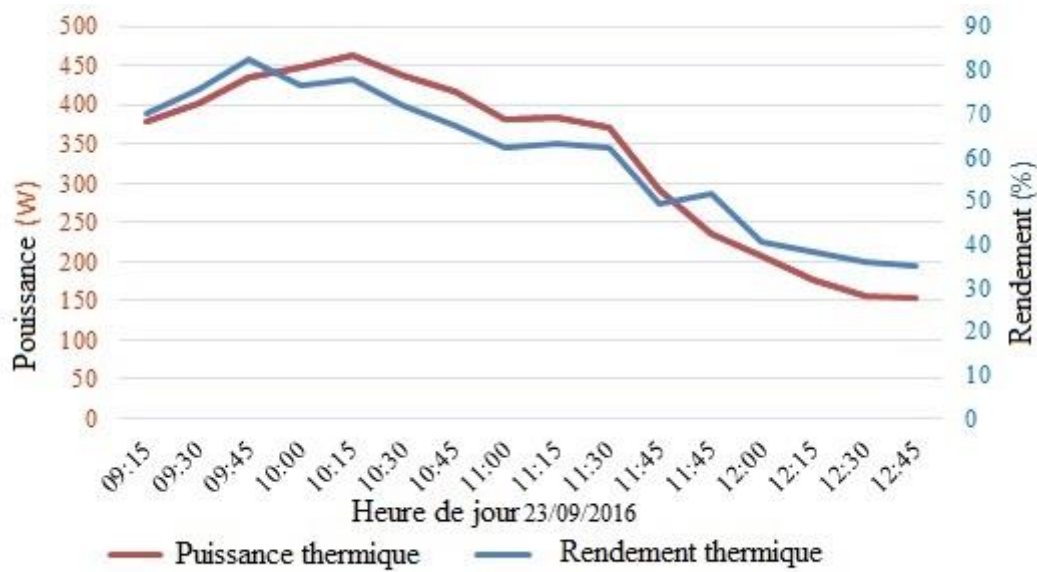


Fig. 4.8. Evolution de l'efficacité énergétique et thermique en septembre.

L'efficacité moyenne η (%) du système dans cette expérience atteint, en septembre, une valeur importante de 62% alors que celle de février atteint 50%. Ceci est dû à l'effet des températures basses de l'hiver sur le système.

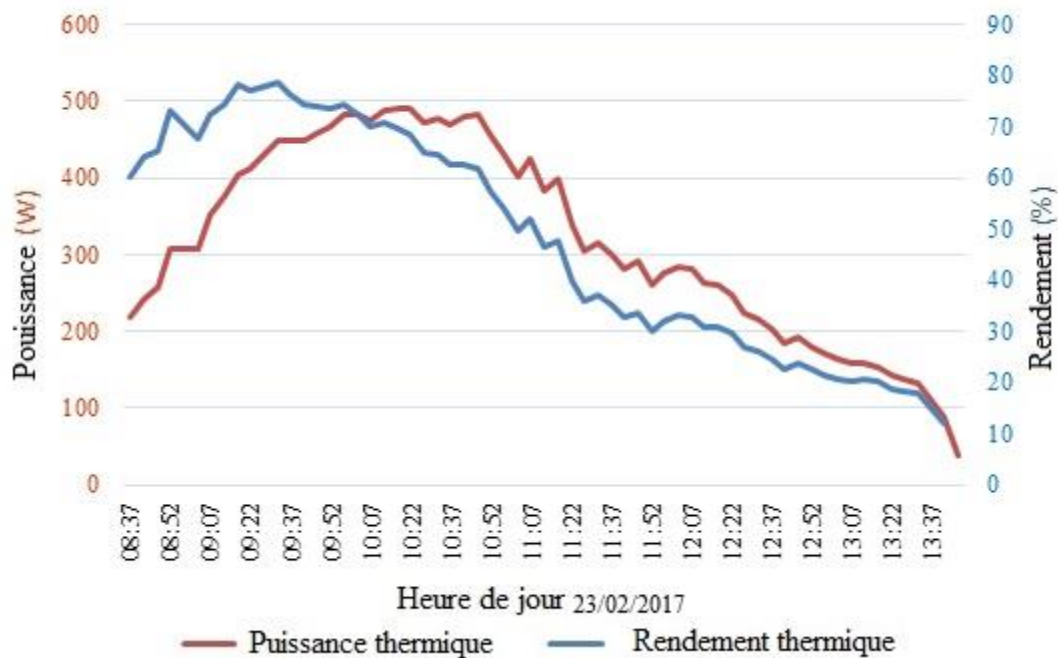


Fig. 4.9. Evolution de la puissance et de l'efficacité thermique en février.

4.4. Température de l'eau et de l'huile

Dans cette étape, nous observons la variation et le comportement de la température de l'eau par rapport à la température de l'huile et la température extérieure du verre du capteur thermique.

La Fig. 4.10 montre le comportement de la température d'huile de sortie; provenant du capteur thermodynamique et allant à l'échangeur de chaleur, et la température de l'huile d'entrée, sortant de l'échangeur de chaleur.

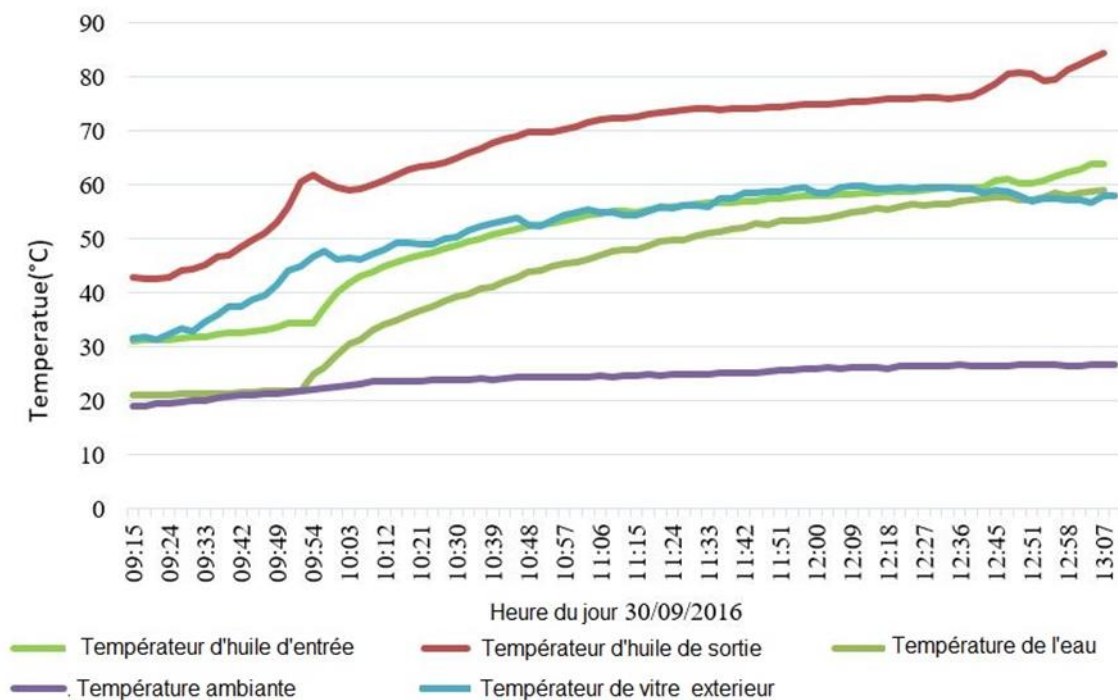


Fig. 4.10. La température de l'eau par rapport à la température d'huile d'entrée et de sortie.

Comme le montre la Fig.4.10 à 9h54, la pompe à huile est déclenchée et le prototype commence à fonctionner. On note que la température de l'eau dans le réservoir augmente parallèlement au pétrole. On remarque également que la température de l'eau est légèrement la même que la température de l'huile, provenant de l'échangeur de chaleur. Bien que le gradient de température ambiante augmente légèrement de 19 ° C à 27 ° C, nous pouvons conclure que notre prototype se comporte avec une grande efficacité. On voit également que la différence de température d'huile entre l'entrée et la sortie de l'échangeur thermique en cuivre est d'environ 14 ° C.

4.5. Effet de l'irradiation solaire sur la température de l'eau

Grâce à la Fig. présentée ci-dessous, la relation proportionnelle entre le rayonnement solaire et la température est évidente, car nous observons que lorsque la quantité de rayonnement solaire est de 1000, le taux de chaleur est maximal, ce qui élève la température de l'eau à 60 ° C comme le montre la Fig. 4.11. , et vice versa lorsque le taux de rayonnement diminue, la température de l'eau atteint un minimum de 45 ° C.

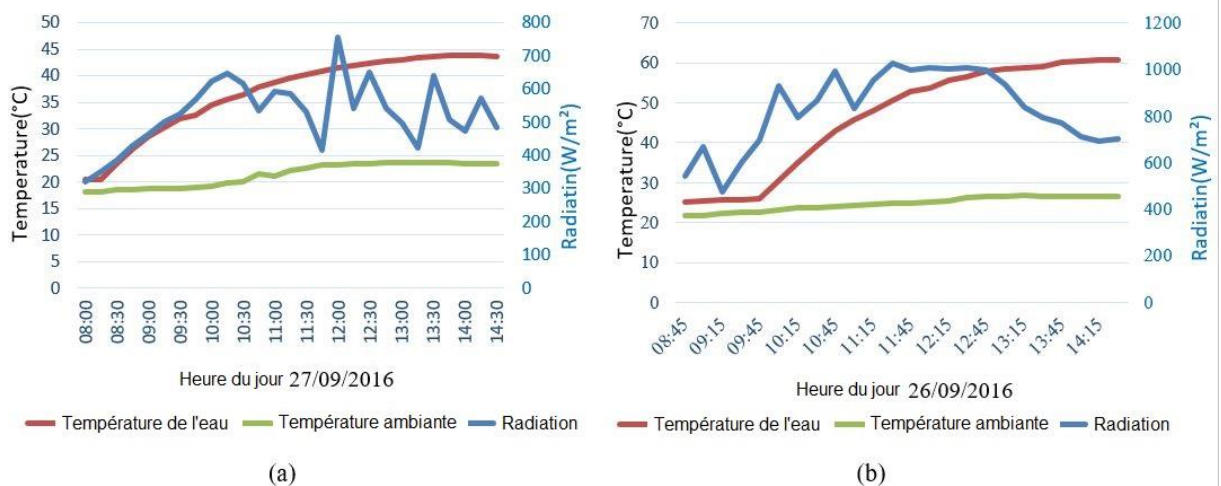


Fig. 4.11. Température de l'eau par rapport à l'irradiation solaire: (a) faible jour d'irradiation solaire; (b) journée d'irradiation solaire élevée.

4.6. Caractéristiques du système pour l'eau de chauffage solaire par rapport à l'eau de chauffage électrique

Pour montrer les performances du système proposé, une comparaison avec un chauffe-eau à résistance électrique a été réalisée.

Le chauffage de l'eau via le prototype proposé a été réalisé de 12h05 à 14h40, lorsque le soleil est au zénith et lorsque l'irradiation est à son apogée. Au cours de la même période, les données ont été collectées à l'aide d'une résistance électrique. Les résultats sont présentés sur la Fig. 4.12.

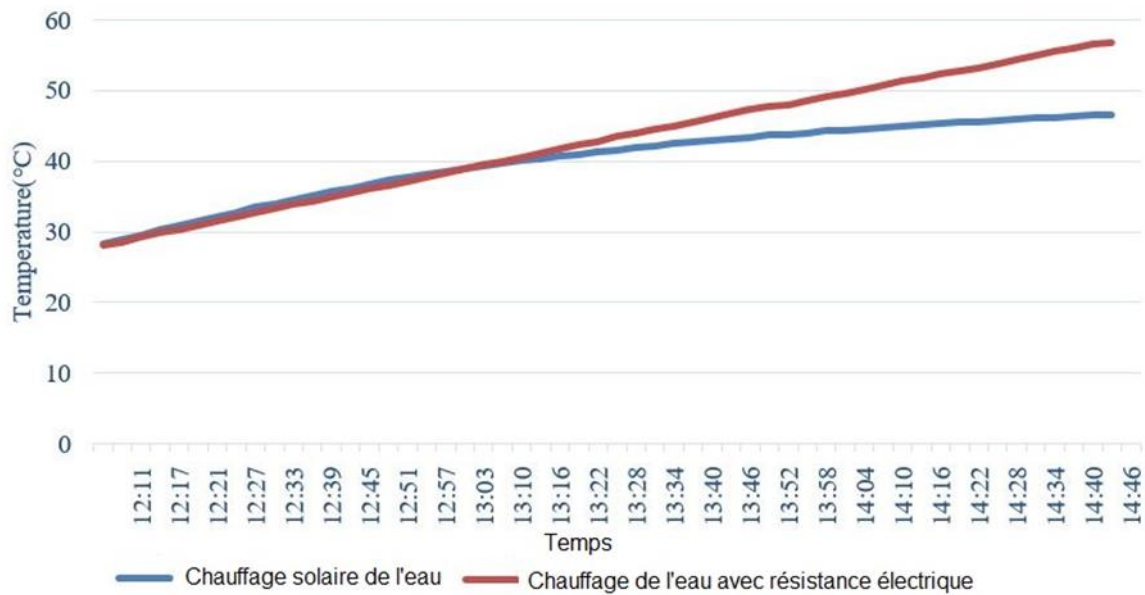


Fig. 4.12. Chauffage solaire contre résistance électrique.

Fig. 4.12. Montre que tant que le soleil est au zénith, le système de chauffage solaire est en concurrence avec une résistance électrique de 600 watts. A partir de 13h15, lorsque le soleil commence à décliner, l'irradiation solaire est moins puissante. Néanmoins, la température de l'eau augmente toujours avec une petite pente.

- Le système de chauffage a une grande efficacité chaque fois que l'eau est froide ou à basse température, en particulier pendant la période comprise entre 12h10 et 13h10. À partir de ce moment, le système est dans un état de saturation et la température de l'eau du prototype proposé subit une petite augmentation en raison de la restriction de l'intensité d'irradiation solaire.

Pour obtenir le taux d'efficacité, nous devons calculer l'énergie thermique absorbée par l'eau et la comparer à l'énergie solaire absorbée par le système.

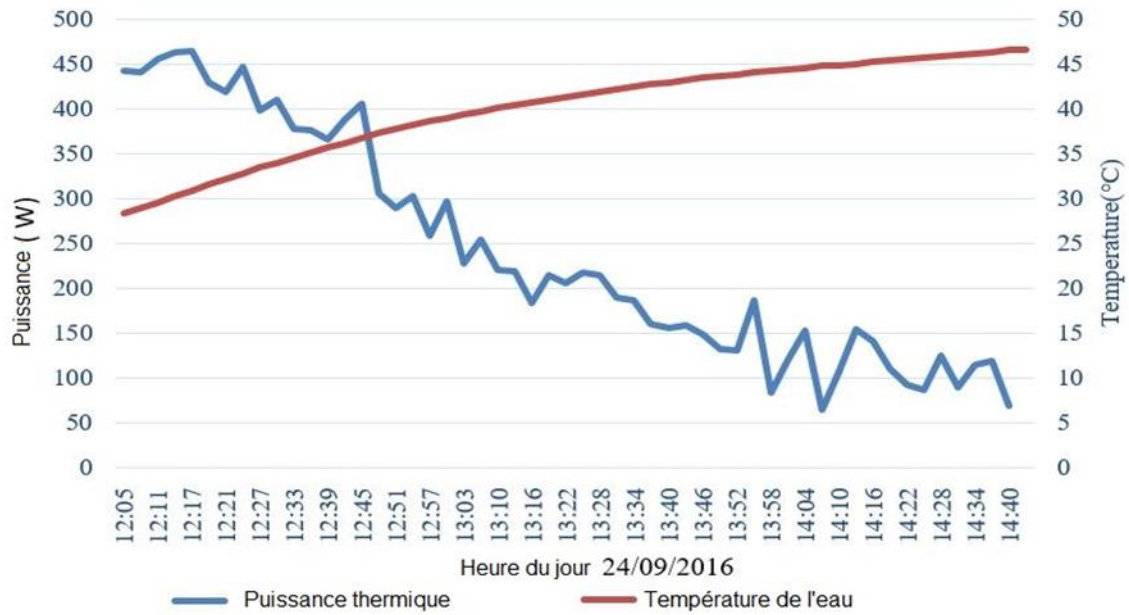


Fig. 4.13. Variation de puissance de l'eau chauffée.

Après avoir mesuré la puissance, on observe à partir de la courbe (Fig. 4.13) que la capacité d'absorption est maximale dans le cas d'une eau à basse température, puisqu'elle atteint 450 watts et aussi à cause de la puissance d'irradiation solaire qui dépasse $1000 \text{ W} / \text{m}^2$, Fig.3.14, entre la période de 12h00 à 12h20. Ensuite, la puissance de chauffage diminue à 100 watts en dépit de la présence d'une irradiation solaire importante.

Sur la base de ces résultats expérimentaux, nous concluons que le système de chauffage a une grande efficacité chaque fois que la température de l'eau est basse et que le rayonnement solaire est au maximum.

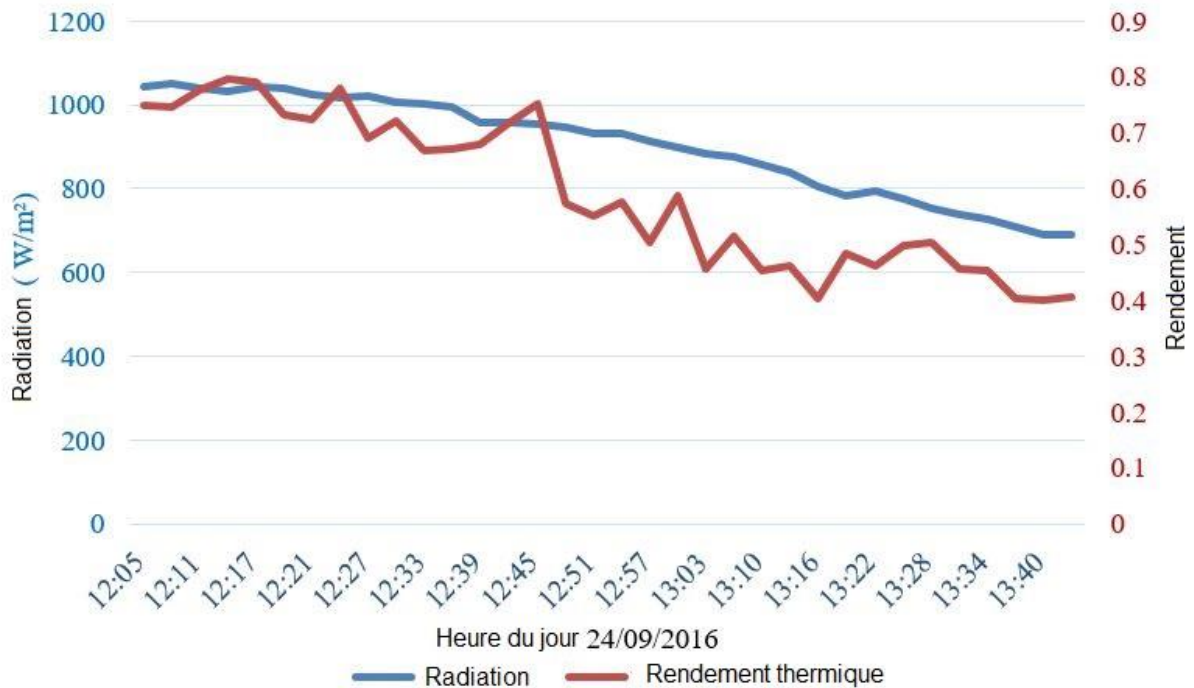


Fig. 4.14. Efficacité thermique dans les deux heures suivant l'irradiation maximale.

Fig. 4.14. montre que l'efficacité atteint un maximum de 80% et cela se produit à midi. A partir de ce moment, l'efficacité diminue jusqu'à 40%. Malgré la puissance d'irradiation plein soleil. Cela en raison de la température élevée de l'eau.

L'efficacité moyenne η (%) du système dans cette expérience atteint une valeur importante de 65%.

Deux expériences ont été réalisées, l'une de 9h30 à 12h45, Fig 4.13, et la seconde de 12h00 à 14h00, Fig. 4.14. Il semble que notre système, par rapport aux systèmes d'eau de chauffage similaires dans les collecteurs à plaques plates, présente un bien meilleure efficacité, puisque l'efficacité moyenne des autres systèmes est estimée entre 45% et 60% alors que notre système atteint une moyenne de 65%.

Nous concluons, à partir des résultats, que le système proposé peut rivaliser avec d'autres systèmes similaires.

- Pour avoir une excellente efficacité, il faut consommer de l'eau chaude et recharger le ballon de telle sorte que le système semble être réinitialisé
- Pour obtenir une température élevée de l'eau de chauffage, nous augmentons l'espace de capture thermodynamique exposé au soleil.

Remarque: La raison pour ne pas augmenter la température de l'eau à des degrés élevés dans les expériences précédentes, malgré la haute efficacité est due à la petite surface du capteur thermique, estimée à seulement 0,6 m² pour chauffer 50 L d'eau.

4.7 Pertes thermiques en nuit

La Fig. 4.15 montre l'effet de l'absence d'irradiation solaire sur la température de l'eau. On voit que tant que l'eau n'est pas utilisée, la température de l'eau a une petite baisse, autour de 10°.

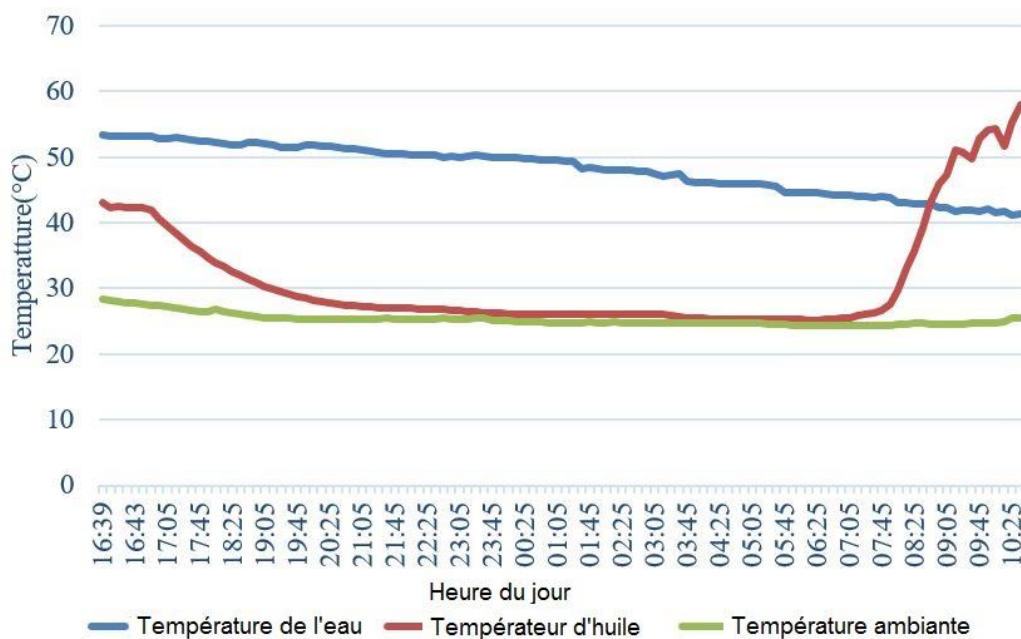


Fig. 4.15 Perte d'eau de température en cas d'absence de rayonnement solaire.

À partir de la Fig. 4.15, on peut observer que la chaleur de l'eau perd plus de 10 ° C de sa température de 16h50 à 9h30 en raison d'une isolation thermique non idéale dans le prototype et d'une diminution de la température ambiante pendant la nuit. Après avoir calculé la perte d'énergie totale pendant cette période, l'équation (18; chapitre 3) des pertes d'énergie thermique totale est **Plos = 39,48 Wh**.

Grâce aux résultats de cette étude, il est très possible de développer ce prototype industriellement pour devenir un appareil efficace pour le chauffage de l'eau à usage domestique. Ce principe peut également être utilisé pour le chauffage en général, en particulier dans les pays du tiers monde, pour plusieurs raisons: l'huile de moteur utilisée dans

les pays du tiers monde est gratuite et non recyclée, ce qui contribue à réduire le prix de ce type des réchauffeurs et réutiliser ces huiles pour préserver l'environnement.

Ce système est également très efficace par rapport à des systèmes similaires, où nous avons remarqué à travers l'étude que le rendement peut atteindre 65% lorsque les conditions appropriées sont remplies.

4.8. Conclusion

Nous concluons, à partir des résultats, que le système proposé peut rivaliser avec d'autres systèmes similaires.

- Pour avoir une excellente efficacité, il faudra constamment recharger le réservoir d'eau et utiliser des pompes plus puissantes afin que le débit du fluide caloporteur soit plus important.
- Pour obtenir une température élevée de l'eau de chauffage, nous augmentons l'espace de capture thermodynamique exposé au soleil.

Conclusion générale

Compte tenu du réchauffement climatique de la Terre, la transition vers des systèmes d'énergie renouvelable est indispensable. Le recyclage des huiles usagées, fait partie du développement durable. Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont été menés dans le but de faciliter l'intégration de l'énergie solaire et le recyclage des huiles dans le domaine du chauffage domestique.

L'un des objectifs de la thèse était de développer un nouveau système de chauffage de l'eau à partir du rayonnement solaire. Pour cela de plusieurs tests expérimentaux ont été réalisés à l'unité de développement des équipements solaires de la ville de Bousmail (Algérie). Les scénarios et étapes suivants des tests ont été mis en place afin d'évaluer la performance du dispositif d'eau de chauffage solaire proposé.

- Première étape: tester le prototype sans eau pour déterminer le niveau de température maximum de l'huile pouvant être obtenu à partir du système et les caractéristiques thermiques du collecteur.

- La deuxième étape: tester le prototype avec de l'eau stockée, afin de déterminer la valeur de la température de l'eau stockée, sous un rayonnement solaire typique.

- La troisième étape: comparer les niveaux de température atteints par les deux fluides (eau stockée et huile usagée) pendant une journée entière;

- Quatrième étape: le comportement de la température de l'eau stockée est examiné sur deux jours différents pour différents niveaux d'irradiation solaire;

- La cinquième étape: pour un même temps de chauffe, la partie eau solaire du chauffage du prototype, soumise à un rayonnement solaire de $1000\text{W} / \text{m}^2$, est comparée au dispositif de chauffage électrique conventionnel intégré, avec une puissance de 600 W . Les paramètres et les caractéristiques du système sont ensuite extraites, telles que l'efficacité, la puissance ...

- Dernière étape: les pertes thermiques du ballon de stockage pendant la nuit sont estimées afin de tester l'efficacité d'isolation du ballon de stockage.

Les résultats ont été très satisfaisants puisque nous avons atteint une température de chauffage acceptable pouvant atteindre $60\text{ }^\circ\text{C}$ dans un réservoir d'eau de 50 litres et 71% d'efficacité moyenne du prototype de capteur thermique ainsi qu'un taux d'efficacité de

chauffage de 65%, ce qui est un résultat très acceptable car l'efficacité moyenne des systèmes de chauffage conventionnels similaires ne dépasse pas 70%.

De plus, le fluide de transfert thermique (huile usagée) et les matériaux avec lesquels le collecteur est construit peuvent présenter d'autres avantages tels que :

- Une abondance d'huiles moteur brûlées qui assure la réutilisation (ou le recyclage) des huiles usées et par conséquent un système moins cher.
- Le système de conversion thermique étant basé sur l'utilisation d'huiles usagées (comme un LCP) qui est un fluide non corrosif, le coût de maintenance du système sera plus faible.
- Pendant les jours non ensoleillés, le réservoir de stockage de chaleur est équipé d'une résistance électrique comme système de secours pour assurer une utilisation continue.
- Très utile dans des endroits isolés sans électricité.

Ce système innovant peut être une solution au recyclage réussi des moteurs d'huiles minérales, préservant ainsi l'environnement.

Dans la perspective de ce travail de recherche, et afin de confirmer l'efficacité de ce système actuel, nous allons mener des expériences sur le terrain plus approfondies à différentes saisons afin d'étudier la composition physicochimique des huiles usagées et celles qui conviennent le mieux.

Elargir également l'utilisation de cette technologie dans d'autres domaines tels que le chauffage central domestique et la distillation de l'eau, par exemple.

REFERENCES

REFERENCES

- [1] Robinson, B.H., 2009. E-waste: An assessment of global production and environmental impacts. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv>. 2009.09.044
- [2] Bouraiou, A., Necaibia, A., Boutasseta, N., Mekhilef, S., Dabou, R., Ziane, A., Sahouane, N., Attoui, I., Mostefaoui, M., Touaba, O., 2020. Status of renewable energy potential and
- [3] Mnasri, F., Bahria, S., Slimani, M.E.A., Lahoucine, O., El Ganaoui, M., 2020. Building incorporated bio-based materials: Experimental and numerical study. *J. Build. Eng.* 28. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101088>
- [4] Jaisankar, S., Ananth, J., Thulasi, S., Jayasuthakar, S.T., Sheeba, K.N., 2011a. A comprehensive review on solar water heaters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.009>
- [5] Hossain, M.S., Saidur, R., Fayaz, H., Rahim, N.A., Islam, M.R., Ahamed, J.U., Rahman, M.M., 2011. Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.008>
- [6] Esen, M., 2004. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. *Sol. Energy* 76, 751–757. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.009>
- [7] Nowak, P., Kucharska, K., Kamiński, M., 2019. Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 3002. <https://doi.org/10.3390/ijerph16163002>
- [8] Aleer, S., Adetutu, E.M., Makadia, T.H., Patil, S., Ball, A.S., 2011. Harnessing the hydrocarbon-degrading potential of contaminated soils for the bioremediation of waste engine oil. *Water. Air. Soil Pollut.* 218, 121–130. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0628-1>.
- [9] Site Internet :<http://californiasolarcenter.org/history-solarthermal/>
- [10] Site Internet : https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_022_03.pdf
- [11] Al-Kayiem, H.H., Yassen, T.A., 2015. On the natural convection heat transfer in a rectangular passage solar air heater. *Sol. Energy* 112, 310–318. doi:10.1016/J.SOLENER.2014.11.031.

- [12] Garnier, C., Muneer, T., Currie, J., 2018. Numerical and empirical evaluation of a novel building integrated collector storage solar water heater. *Renew. Energy* 126, 281–295. doi:10.1016/j.renene.2018.03.041.
- [13] Li, B., Zhai, X., Cheng, X., 2018. Experimental and numerical investigation of a solar collector/storage system with composite phase change materials. *Sol. Energy* 164, 65–76. doi:10.1016/J.SOLENER.2018.02.031.
- [14] Seddegh, S., Wang, X., Henderson, A.D., Xing, Z., 2015. Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 517–533. doi:10.1016/J.RSER.2015.04.147.
- [15] Smyth, M., Pugsley, A., Hanna, G., Zacharopoulos, A., Mondol, J., Besheer, A., Savvides, A., 2019. Experimental performance characterisation of a Hybrid Photovoltaic/Solar Thermal Façade module compared to a flat Integrated Collector Storage Solar Water Heater module. *Renew. Energy* 137, 137–143. doi:10.1016/J.RENENE.2018.04.017.
- [16] Emam, E.A., Shoaib, A.M., 2013. Re-refining of used lube oil, I-by solvent extraction and vacuum distillation followed by hydrotreating. *Pet. Coal* 55
- [17] Chun, W., Kang, Y.H., Kwak, H.Y., Lee, Y.S., 1999. An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters. *Appl. Therm. Eng.* 19, 807–817. doi:10.1016/S1359-4311(98)00096-9.
- [18] Kalogirou, S., 2003. The potential of solar industrial process heat applications. *Appl. Energy* 76, 337–361. doi:10.1016/S0306-2619(02)00176-9.
- [19] Jaisankar, S., Ananth, J., Thulasi, S., Jayasuthakar, S.T., Sheeba, K.N., 2011a. A comprehensive review on solar water heaters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.009>
- [20] Shukla, R., Sumathy, K., Erickson, P., Gong, J., 2013. Recent advances in the solar water heating systems: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 19, 173–190. doi:10.1016/J.RSER.2012.10.048.
- [21] Xue, H.S., 2016. Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage. *Renew. Energy* 86, 257–261. doi:10.1016/J.RENENE.2015.08.017.
- [22] Agathokleous, R., Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Kalogirou, S.A., Palombo, A., 2019. Building façade integrated solar thermal collectors for air heating:

- experimentation, modelling and applications. *Appl. Energy* 239, 658–679. doi:10.1016/J.APENERGY.2019.01.020.
- [23] Harmim, A., Boukar, M., Amar, M., Haida, A., 2019. Simulation and experimentation of an integrated collector storage solar water heater designed for integration into building facade. *Energy* 59–71. doi:10.1016/j.energy.2018.10.069.
- [24] Daghigh, R., Shafieian, A., 2016. Theoretical and experimental analysis of thermal performance of a solar water heating system with evacuated tube heat pipe collector. *Appl. Therm. Eng.* 103, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.034.7>
- [25] Shabgard, H., Song, L., Zhu, W., 2018. Heat transfer and exergy analysis of a novel solarpowered integrated heating, cooling, and hot water system with latent heat thermal energy storage. *Energy Convers. Manag.* 175, 121–131. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.08.105>.
- [26] Ge, T.S., Wang, R.Z., Xu, Z.Y., Pan, Q.W., Du, S., Chen, X.M., Ma, T., Wu, X.N., Sun, X.L., Chen, J.F., 2018. Solar heating and cooling: Present and future development. *Renew. Energy* 126, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.06.081>.
- [27] Thèse de Doctorat :GAMA Amor , Ecole Nationale Polytechnique « Optimisation des Dispositifs de Poursuite Solaire da ns les Systèmes à Concentration »2013.
- [28] A. Luque and S. Hegedus, *Handbook of Photovoltaic Science*. John Wiley & Sons Ltd, 2003.
- [29] J. Twidell and T. Weir, *Renewable Energy Resources*, 2nd ed. Taylor & Francis, 2006.
- [30] “Le soleil.” [Online]. Available: <https://www.franceinter.fr/emissions/le-7h43/le-7h43-27-juillet-2018>. [Accessed: 07-Jun-2020].
- [31] M. Roger and V. Jerry, *Photovoltaic Systems Engineering*, 2nd ed. Taylor & Francis, 2004.
- [32] I. Repository, “Solar Spectral Irradiance - Measurement and Application in Photovoltaics,” Doctoral Thesis Loughborough University, 2014.
- [33] “L’irradiation solaire incidente.” [Online]. Available: <https://energieplus-lesite.be/theories/climat8/ensoleillement-d8/>. [Accessed: 06-Jul-2020].
- [34] “Pyrheliometer for direct radiation measurement.” [Online]. Available: <http://sinovoltaics.com/learning-center/components/pyrheliometer-used-solar-energy->

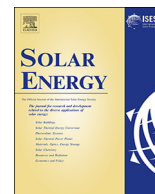
- systems/. [Accessed: 06-Jul-2017].
- [35] “Shaded pyranometer for diffuse radiation measurement.” [Online]. Available: <http://www.kippzonen.com/Product/42/CM121B-C-Shadow-Ring#.WV309oTyjIV>. [Accessed: 06-Jul-2017].
- [36] “Pyranometer for global radiation measurement.” [Online]. Available: <http://www.solarpowerworldonline.com/2015/03/what-is-a-solar-pyranometer/>. [Accessed: 06-Jul-2017].
- [37] A. Boudghene Stambouli, “Algerian renewable energy assessment: The challenge of sustainability,” *Energy Policy*, vol. 39, no. 8, pp. 4507–4519, 2011.
- [38] A. B. Stambouli, “Promotion of renewable energies in Algeria: Strategies and perspectives,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 15, no. 2, pp. 1169–1181, 2011.
- [39] M. Bey, A. Hamidat, B. Benyoucef, and T. Nacer, “Viability study of the use of grid connected photovoltaic system in agriculture: Case of Algerian dairy farms,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 63, pp. 333–345, 2016.
- [40] “Irradiation horizontale globale de l’Algérie.” [Online]. Available: <https://www.cder.dz/spip.php?article40>. [Accessed: 07-Jun-2020].
- [41] A. B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, and Y. Kitamura, “A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4445–4460, 2012.
- [42] H. T. · A. K. Agarwal and P. R. C. · S. Powar, *Applications of Solar Energy*. Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018.
- [43] “Application de l’énergie solaire.” [Online]. Available: <https://technology4life.wordpress.com/applications-of-solar-power/>. [Accessed: 10-Jul-2020].
- [44] “Concentrated Solar Power CSP.” [Online]. Available: <https://pmrpressrelease.com/concentrated-solar-power-csp-market/>. [Accessed: 10-Jul-2020].
- [45] A. Jamar, Z. A. A. Majid, W. H. Azmi, M. Norhafana, and A. A. Razak, “A review of water heating system for solar energy applications,” *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 76, pp. 178–187, 2016.

- [46] Site Internet : <https://www.cder.dz/spip.php?article1970>
- [47] Site Internet : <https://www.cder.dz/spip.php?article3132>
- [48] Performance de la Recherche et de l’Innovation au CDER 2015 page 40.
- [49] Site Internet : <https://www.cder.dz/spip.php?article1972>
- [50] P. A. Hohne, K. Kusakana, and B. P. Numbi, “A review of water heating technologies: An application to the South African context,” *Energy Reports*, vol. 5, pp. 1–19, 2019.
- [51] ORDANOU, GRIGORIOS (2009) Flat-Plate Solar Collectors for Water Heating with Improved Heat Transfer for Application in Climatic Conditions of the Mediterranean Region, Durham theses, Durham University.
- [52] O. Touaba et al., “Experimental investigation of solar water heater equipped with a solar collector using waste oil as absorber and working fluid,” *Sol. Energy*, vol. 199, no. February, pp. 630–644, 2020.
- [53] Christophe Perrier, “Etude des huiles et des mélanges à base d’huile minérale pour transformateurs de puissance – Recherche d’une mélange optimal,” Ecole Docotrale de Lyon, 2005.
- [54] T. Ahamad, B. P. Chadrsekhar, P. N. Mohan, K. S. Joshi, and T. D. R. Sree, “Recycling and Analysis of Spent Engine Oil,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 11, pp. 711–717, 2015.
- [55] S. O. Ogbeide, “An investigation to the recycling of spent engine oil,” *J. Eng. Sci. Technol. Rev.*, vol. 3, no. 1, pp. 32–35, 2010.
- [56] T. Ahamad, B. P. Chadrsekhar, P. N. Mohan, K. S. Joshi, and T. D. R. Sree, “Recycling and Analysis of Spent Engine Oil,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 6, no. 11, pp. 711–717, 2015.
- [57] B. Boumaaraf, H. Boumaaraf, M. E.-A. Slimani, S. Tchoketch_Kebir, M. S. Ait-cheikh, and K. Touafek, “Performance evaluation of a locally modified PV module to a PV/T solar collector under climatic conditions of semi-arid region,” *Math. Comput. Simul.*, vol. 167, pp. 135–154, Jan. 2020.
- [58] B. Boumaaraf, K. Touafek, M. S. Ait-cheikh, and M. E. A. Slimani, “Comparison of electrical and thermal performance evaluation of a classical PV generator and a water glazed hybrid photovoltaic–thermal collector,” *Math. Comput. Simul.*, Sep. 2018.
- [59] R. Sellami, M. Amirat, A. Mahrane, M. E.-A. Slimani, A. Arbane, and R. Chekrouni,

- “Experimental and numerical study of a PV/Thermal collector equipped with a PV-assisted air circulation system: Configuration suitable for building integration,” *Energy Build.*, vol. 190, pp. 216–234, May 2019.
- [60] M. A. Al-Nimr and W. A. Al-Ammari, “A novel hybrid PV-distillation system,” *Sol. Energy*, vol. 135, pp. 874–883, Oct. 2016.
- [61] M. E. A. Slimani, M. Amirat, and S. Bahria, “Analysis of thermal and electrical performance of a solar PV/T air collector: Energetic study for two configurations,” in *3rd International Conference on Control, Engineering and Information Technology, CEIT 2015*, 2015, pp. 1–6.
- [62] O. Rejeb, M. Sardarabadi, C. Ménézo, M. Passandideh-Fard, M. H. Dhaou, and A. Jemni, “Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 110, pp. 367–377, Feb. 2016.
- [63] K. E. Amori and M. A. Abd-AlRaheem, “Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors,” *Renew. Energy*, vol. 63, pp. 402–414, Mar. 2014.
- [64] D. Su, Y. Jia, X. Huang, G. Alva, Y. Tang, and G. Fang, “Dynamic performance analysis of photovoltaic–thermal solar collector with dual channels for different fluids,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 120, pp. 13–24, Jul. 2016.
- [65] A. D. Kraus, A. Aziz, and J. Welty, *Extended surface heat transfer*. John Wiley & Sons, 2002.
- [66] R. W. Serth and T. Lestina, *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb*. Academic Press, 2014.
- [67] M. E. A. Slimani, M. Amirat, S. Bahria, I. Kurucz, M. Aouli, and R. Sellami, “Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: Configuration suitable for an indirect solar dryer,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 125, pp. 209–221, Oct. 2016.
- [68] H. H. Al-Kayiem and T. A. Yassen, “On the natural convection heat transfer in a rectangular passage solar air heater,” *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 310–318, Feb. 2015.
- [69] D. Bahrehmand and M. Ameri, “Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with natural convection,” *Renew. Energy*, vol. 74, pp. 357–368, Feb. 2015.

- [70] K. G. T. Hollands, T. E. Unny, G. D. Raithby, and L. Konicek, "Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers," *J. Heat Transfer*, vol. 98, no. 2, p. 189, May 1976.
- [71] M. E. A. Slimani, M. Amirat, I. Kurucz, S. Bahria, A. Hamidat, and W. B. Chaouch, "A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: Comparative study under Algiers climatic conditions," *Energy Convers. Manag.*, vol. 133, pp. 458–476, Feb. 2017.
- [72] A. Sinha, O. S. Sastry, and R. Gupta, "Nondestructive characterization of encapsulant discoloration effects in crystalline-silicon PV modules," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 155, pp. 234–242, 2016.
- [73] D. C. Jordan, T. J. Silverman, B. Sekulic, and S. R. Kurtz, "PV degradation curves: non-linearities and failure modes," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 25, no. 7, pp. 583–591, 2017.
- [74] A. Pozza and T. Sample, "Crystalline silicon PV module degradation after 20 years of field exposure studied by electrical tests, electroluminescence, and LBIC," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 24, no. 3, pp. 368–378, 2016.
- [75] T. J. Silverman, L. Mansfield, I. Repins, and S. Kurtz, "Damage in Monolithic Thin-Film Photovoltaic Modules Due to Partial Shade," *IEEE J. Photovoltaics*, vol. 6, no. 5, pp. 1333–1338, 2016.
- [76] J. Tanesab, D. Parlevliet, J. Whale, T. Urmee, and T. Pryor, "The contribution of dust to performance degradation of PV modules in a temperate climate zone," *Sol. Energy*, vol. 120, pp. 147–157, 2015.
- [77] S. S. Chandel, M. Nagaraju Naik, V. Sharma, and R. Chandel, "Degradation analysis of 28 year field exposed mono-c-Si photovoltaic modules of a direct coupled solar water pumping system in western Himalayan region of India," *Renew. Energy*, vol. 78, pp. 193–202, 2015.

Annexe I
Article publié



Experimental investigation of solar water heater equipped with a solar collector using waste oil as absorber and working fluid

Oussama Touaba^{a,b}, Mohamed Salah Ait Cheikh (Prof)^a, Mohamed El-Amine Slimani (PhD)^{c,d}, Ahmed Bouraiou (PhD)^{b,*}, Abderrezzaq Ziane (PhD)^b, Ammar Necaibia (PhD)^b, Arezki Harmim^b

^a *Laboratoire des Dispositifs de Communications et de Conversions Photovoltaïques, Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, Avenue Hacén Badi, 16200 El Harrach Algiers, Algeria*

^b *Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien, URERMS, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 01000, Adrar, Algeria*

^c *Department of Energetic and Fluid Mechanics, University of Science and Technology Houari Boumediene (USTHB), 16111 Algiers, Algeria*

^d *Unité de Développement des Equipements Solaires, UDES, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 42415 Tipaza, Algeria*

ARTICLE INFO

Keywords:

Solar water heater
Waste engine oil
Absorber and Working Fluid
Experimentation

ABSTRACT

In this study, a novel solar water heater system is proposed. Its flat plat collector uses waste engine oil as absorber and heat transfer fluid at the same time, and it is equipped with a controlled sun tracker photovoltaic system to maximize the collected solar irradiation. A photovoltaic system is designed and incorporated to supply the various DC electrical devices (electronic control system, oil pump, etc). The various experimental tests carried out under the real climatic conditions of Tipaza, which is located in Algerian coast, showed that this system is effective; it can meet the hot water needs for the households in wintry time. Indeed, the results were very satisfactory since the system reaches an acceptable heating temperature, 50°, in less than three hours; with heating efficiency mean rate convergence of 65% while its maximum efficiency reaches 80%. In addition, the system can work with domestic electricity as an appoint auxiliary source in the case of the absence of sunlight (climatic conditions, cloudy sky or night) with an automatic control device.

1. Introduction

Renewable energy sources play an important role in the various energies production used by human beings in the world (Robinson, 2009). In addition, there is an environmental interest through a sustainable development to minimize the impact pollution (Bouraiou et al., 2020; Mnasri et al., 2020). A solar heating water is a device, which collects and uses solar heat energy to supply partially or entirely the domestic needs with hot water.

This type of heating is usually supported by other kinds of water heating systems using other conventional energy sources (electricity, fossil fuels, biomass, etc.) (Jaisankar et al., 2011a). Under certain conditions, it can replace them completely. Since solar energy is renewable, this replacement can effectively limit the greenhouse gas emissions or the production of nuclear waste (Robinson, 2009). The device is generally composed of one or more solar collectors, a storage tank and a heat transfer fluid circulation system, which transfers the heat generated by the solar collectors to the storage tank. The most widely used solar heating type in the world is the direct solar water

heater (Hossain et al., 2011; Jamar et al., 2016). The literature review represents the general principle of the solar heating systems generally, except that the solar thermal collectors have structures based on different principles of operation such as solar thermal collectors presented in different studies such as (Esen, 2000; Esen and Ayhan, 1996). In particular, the solar thermal collector is one of the most efficient renewable energy technologies and it has already demonstrated a huge market potential (Yassen et al., 2019). Several studies of various kinds of solar heater systems were performed in different locations (Al-Kayiem and Yassen, 2015; Garnier et al., 2018; Li et al., 2018; Seddegh et al., 2015; Smyth et al., 2019; Tanha et al., 2015; Tewari and Dev, 2019).

Solar water heating is generally divided into three types of collectors: Flat-plate collectors, (FPCs), Stationary compound parabolic collectors (CPCs) and Evacuated-tube collectors (ETCs) (Emam and Shoaib, 2013; Kalogirou, 2003). According to known studies, the efficiency varies from one type to another. Flat-plate collectors efficiency is estimated to be between 45% and 60% (Chun et al., 1999; Jaisankar et al., 2011b), Stationary compound parabolic collectors efficiency is between 60% and 75%, and Evacuated-tube collectors efficiency is

* Corresponding author.

E-mail addresses: touabaoussama@yahoo.fr (O. Touaba), muslimani@usthb.dz (M.E.-A. Slimani), bouraiouahmed@gmail.com, bouraiou.ahmed@urerms.dz (A. Bouraiou).

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.064>

Received 27 November 2019; Received in revised form 10 February 2020; Accepted 17 February 2020
0038-092X/ © 2020 International Solar Energy Society. Published by Elsevier Ltd. All rights reserved.

Nomenclature	
<i>Acronyms</i>	
CPC	Compound Parabolic Concentrator
DC	Direct Current
HTF	Heat Transfer Fluid
PV	Photovoltaic
<i>Symbols</i>	
C_i	Specific heat capacity(J. kg ⁻¹ . K ⁻¹)
D_H	Hydraulic diameter(m)
l_i	Thickness(m)
h_c	Conductive heat transfer coefficient(W. m ⁻² . K ⁻¹)
h_r	radiative heat transfer coefficient(W. m ⁻² . K ⁻¹)
h_v	Convective heat transfer coefficient(W. m ⁻² . K ⁻¹)
G	Global solar irradiance(W. m ⁻²)
L	Length(m)
W	Width(m)
M_i	mass of a component i(kg)
\dot{m}	Flow rate (kg. s ⁻¹)
Pr	Prandtl number
n	Data number
Nu	Nusselt Number
$Q_{u,th}$	useful thermal power(W)
S	collector area(m ²)
T	Temperature (°C)
θ	tilt angle
t	Time(s)
V	velocity(m. s ⁻¹)
<i>Greek symbols</i>	
η	Efficiency
λ	thermal conductivity(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
τ	Transmissivity
α	Absorptivity
ρ	Density(kg. m ⁻³)
γ	Ideality factor
ε	Emissivity
<i>Subscripts</i>	
a, amb	Ambient
Af	Fluid in aboveduct
C	Solarcell, collector
F	Fluid (air)
Lf	Fluid in lowerduct
G	Glass, glazing, gap
Gc	Glass Cover
In	Insulator
P	plate
Th	Thermal
U	Useful
W	Wind

between 80% and 90% (Kalogirou, 2003).

Several studies have touched upon this topic among them; Jaisankar *et al* (Jaisankar *et al.*, 2011a) and Shukla *et al* (Shukla *et al.*, 2013) reported that for the Flat plate solar collector and its different configurations, research has shown that the collector outlet temperature ranges between 27 and 60 °C meanwhile the temperature range was between 45 and 65 °C for the water tank.

Xue (2016) investigates the thermal performance of a domestic solar water heater with a solar collector, the water heater system is coupled with phase-change material for energy storage. He noticed that the domestic solar water heater performs more efficiently with a constant flow rate than under the condition of exposure. Agathokleous *et al.* (2019) presented the design and the energy performance of a flat-plate solar thermal air collector integrated in a building facade. The prototype is designed with cost-effective materials and has a much simpler design, compared to the existing commercial collectors. Garnier *et al.* (2018) gave a numerical and empirical evaluation of a building integrated storage solar water heater system. The proposed configuration and geometry incorporate an embedded heating element in order to provide a self-contained residential hot water. They present a computational fluid dynamics (CFD) analysis of internal flows and heat transfer regimes. Harmim *et al* (2019) presented the design, construction and experimentation of a building integrated Storage Solar Water Heater. The building is equipped with a linear parabolic reflector as a concentrator device. The system is designed to meet hot water needs in winter. A numerical model was developed and validated by experimental tests. The influence of some parameters is studied and the results show that the system is effective only during winter period.

Daghigh and Shafeian (2016) have done a theoretical and experimental analysis of a solar water heating collector with an evacuated tube heat pipe to evaluate the energy performance of the system. They presented a mathematical model according to thermal and energy analysis. The system was constructed and experimentally tested under real operating conditions. The mathematical model has been validated

optimally for 15 collector pipes.

Shabgard *et al.* (2018) analyzed an integrated solar powered water heating and cooling system utilizing latent heat energy storage. The system is integrated in a residential building located in a hot climate zone. The results showed that annual energy savings of more than 80% can be achieved by using 10 m² of integrated solar collector area combined with a latent heat energy storage system of 29 kWh.

Ge *et al.* (2018) summarized the current situation and future prospects of solar heating and cooling. They found that a great interest was brought for this type of system through various investigations and development all-out. Particularly, the integration of these systems in buildings, administrative and residential sector.

It seems that the hybrid solar photovoltaic / thermal system is the most promising solution to water heating issues. This work consists of using industrial or domestic used products for the purpose of sustainable development and thus contributing to the ecological environment. The study was done then on an experimenting heating water device supplied by solar energy. The goal of this work is based on an innovative approach which has successfully proven its effectiveness in absorbing solar irradiation and transferring it to heat by liquid (water). Indeed, the principle function of this device is based on three sub-systems that are a thermal collector, a heat storage tank, and a photovoltaic panel. The proposed study deals with the first type of flat plate surface heaters by using the waste engine oil as an alternative way to traditional systems as a heat absorber and a heat transfer fluid (HTF) at the same time, the HTF is included in the operating principle of the majority of flat plate collectors the absorber (Esen, 2004; Esen and Esen, 2005).

It is well-known that the oils used for internal combustion engines, in particular automobile engines, is a hazard and polluting materials for the environment according to several studies (Nowak *et al.*, 2019). They are recycled in several countries to reduce environmental pollution but unfortunately, in other countries, in particular third world countries, including Algeria, the used engine oil is discharged into the

environment due to the non-availability of oil treatment and recycling facilities (Aleer et al., 2011). In this work, we propose a solution that can be used to recycle and use this material in a useful way, due to its thermo-physic, and thermodynamic characteristics; The main objective of this study is to demonstrate the efficacy and feasibility of using the waste engine oil in a solar heating system in general and water heating in particular.

To strengthen this study, a comparative table on the performance of solar heater systems in different research and experiments which have been performed to improve the solar water heater thermal effectiveness. Some of the important research is provided in Table 1 below.

According to the most literature review, it is clearly that no research work used waste oil as an absorber and HTF in solar water heating systems

Till now, most of the studies are done concentrating on the three known types of water heaters. To the best of author knowledge, no such research work has been done previously to improve the thermal efficiency considering the configuration of a solar water heater which is based on the waste oil as the operating principle and to increase the efficiency.

This paper proposes an environmental solution to two problems recycling used oil and eco-friendly water heating technique by using used engine oil in a heat transfer setting at the same time. The present novel research could be considered as a device friendly- to the environment that used a renewable energy resource like solar energy to fight against the pollution crisis in the all countries of the world, in addition the contributing to reducing GHG emission by using the waste oil of engine, the water in this system gets an even better heating temperature from other similar systems, and the oil adds additional heat to the collector due to its good characteristics of absorption of the sun's heat. As a result, the efficiency of the system has been significantly increased the recycling of waste oils of engine harmful to the environment. The conventional solar water heater that was used in previous researches are lack of this type of principle.

2. Material and methods

As for the methodology used in this paper, it is as follows:

We start Initially by clarifying the objective of this study, then describing the proposed prototype components and its operating principle with a detailed explanation of the technical characteristics.

In the second step, the physical model and mathematical formulation of the system is presented, using the heat transfer and thermal power equations and the heat transfer equilibrium for each component of the solar collector.

Finally, after providing the weather and geographic characteristics of the experiment site, the obtained experimental results were

Table 1
Summary of the literature review of the solar water heater.

Ref.	Key results
(Hossain et al., 2011)	The study shows that the thermo-siphon system has an efficiency of 18% higher compared with the conventional system via the reduction of heat loss.
(Jayakanth et al., 2017)	The hybrid solar collector thus fabricated was put to test under the sun, the solar water heater (SWH) efficiency was as high as 60%.
(Kulkarni and Deshmukh, 2015)	The maximum efficiency was observed at the time of 1.00 p.m. on an average of 57%.
(Khan and Islam, 2011)	It was found that the incoming hot tap water was about 30 °C higher than the room temperature during the winter months.
(Mongre and Gupta, 2013)	It increased efficiency up to 55% with the increase of the glass surface.
(Sivakumar et al., 2012)	59.09% efficiency was obtained for the number of riser tubes, and 62.90% efficiency was obtained for winding arrangement of tubes.
(Muhumuza et al., 2019)	The addition of a transparent cover on three-quarter of the absorber vessel for the AFRICaN-ICSSH B variant achieved retention efficiency of 37.6%, and retained hot.
(Panahi et al., 2019)	The results showed that the mirror had a significant average daily efficiency (66.7%), followed by steel plates (47.6%) and aluminum foil (43.7%).
(Esen and Esen, 2005)	The maximum daily of the collection efficiency varies from 46.72% to 55.31% for R410A.
(Dagdougui et al., 2011)	The results showed that the efficiency does not vary and it is equal to 52.11%. The mean temperature then remain constant at 56.42 °C.
Present work	A novel HTF give an average efficiency η (%) of the all system was reached of 65% and the average efficiency of prototype thermal collector is $\eta_c = 71\%$.

presented and discussed and evaluated.

2.1. Description of the proposed idea system

The main components of the proposed overall system presented in this study are shown in Fig. 1. The device consists of three parts, the first one is placed in front of the sun to absorb and convert the irradiation to heat. The second converts irradiation to electricity through a photovoltaic panel to supply the various electrical components of the system such as the electric pump and control electrical circuits. In the absence of sunlight, the device also works automatically with domestic electricity that is equipped by an intelligent system reconciles the use of solar energy and economy in electricity. The third part is based on an exchange phenomenon which delivers heat for general purposes use. As we will see, using used mineral oil exposed to sunlight shows that it gives better results in terms of heat absorption, due to its dark color and thermal characteristics. It shows a very good characteristic where the kind of oil used in the prototype is of type S15w40, which is the most used oil in Algeria's vehicle engine.

Fig. 2 describes and shows the principal components of the performed prototype, which consists of a dark plate filed with black used oil, a water tank provided with a thermal copper exchanger and an electric resistor used to compensate the system during sunlight absence.

A mini-prototype has been completed to demonstrate the effectiveness of the study and is described as follows in this work: it consists of a photovoltaic system and a thermal collector mounted on an aluminum structure with an optimal angle (38°) according to the region of the experiment in order to optimize the capture of a maximum of energy.

To do so, the oil is placed between two tempered glass plates, 5 mm apart, which support the heat. An electric pump allows the circulation of the heated oil between the two plates realized and the water tank, transferring the heat from oil to water. The completion of the prototype has yielded considerable results. Many experiments have been done on the prototype, shown in Fig. 3, in order to evaluate it and its future use in the industrial field.

The realized prototype is based on the following main components:

- A 12 V, 15 W DC oil pump .
- A 12 V, 25 W photovoltaic panel.
- A 50L water tank.
- A 600 W electric heating resistor integrated into the water tank.

The design parameters of the prototype are summarized in Table 2.

Fig. 4 shows the different components dimensions of the solar thermal collector.

The essential steps of the experimental study are as follows:

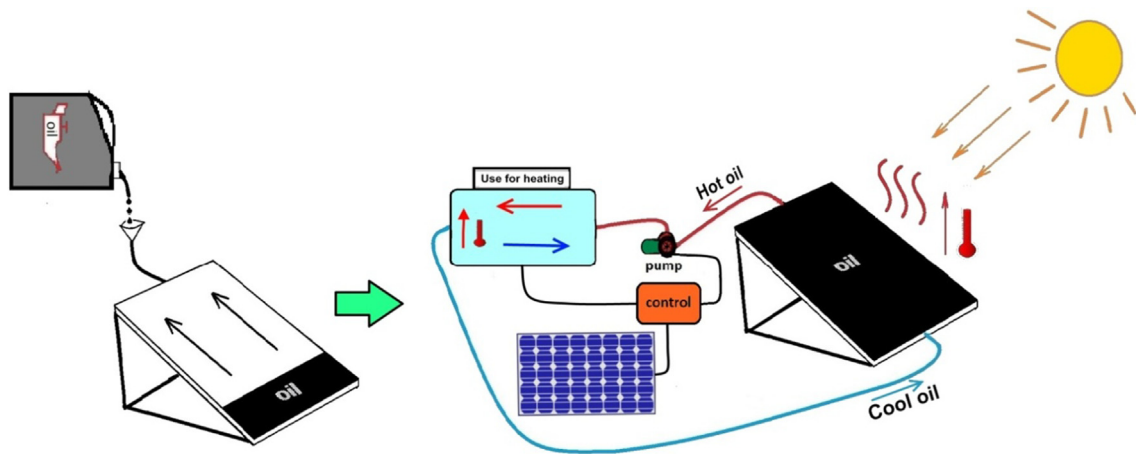


Fig. 1. Diagram of the overall system components.

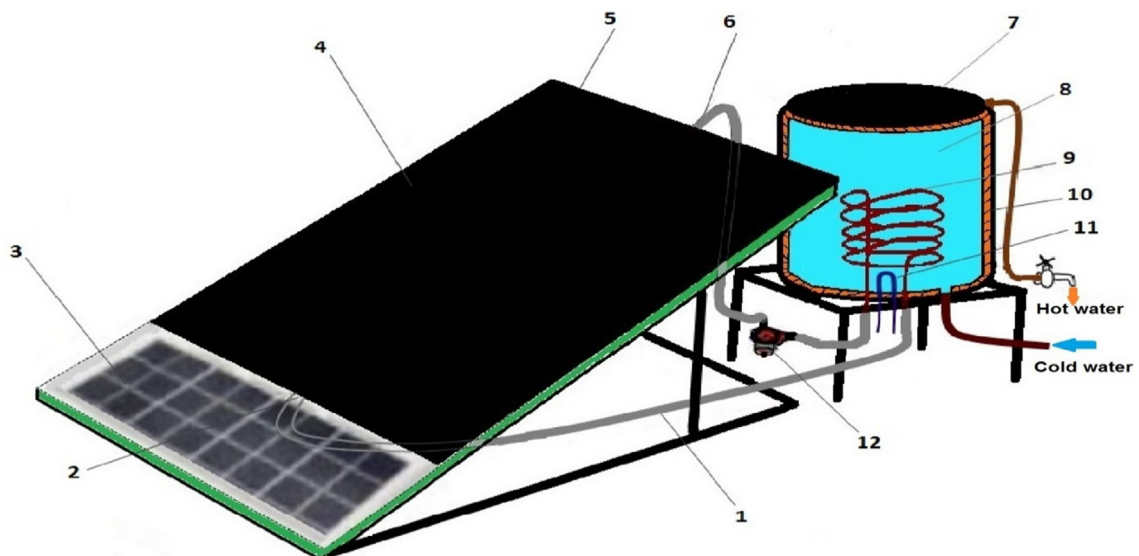


Fig. 2. Main prototype components:(1) Oil pipeline; (2) Oil input; (3) Photovoltaic panel of 25 W; (4) Used engine oil; (5) Aluminum frame; (6) Oil output; (7) Water tank with thermal insulation; (8) Water; (9) Copper heat exchanger; (10) Thermal insulating layer; (11) Electric heater; (12) Oil pump.



Fig. 3. The realized prototype of the developed solar water heater.

Table 2
Design parameter of the system and thermal panel layers dimensions.

Symbol	characteristic	Value
S_c	thermal surface exposed to light	0.6 m ²
l_p	pipes length	400 cm
S_e	heatexchanger surface	0.17 m ² (300 × 1.8 × πcm ²)
V_e	volume of oil in the exchanger	0.3 L
V_t	volume of oil in pipes with thermal insulation	0.4 L
V_c	volume of oil in heat collector exposed to light	3.4 L
V_o	total oil volume	4.1L ($V_e + V_t + V_c$)
L	Thermal panel length	105 cm
R	Thermal panel width	96 cm
H	Thermal panel height	62 mm
a	Thermal insulation thickness	25 mm
b	Tempered glass thickness	04 mm
c	Oil channel thickness	05 mm
d	Insulation air height	30 mm

- Measure of the oil temperature variation in an empty tank to the (stagnated system)
- Measure of the variation in water and oil temperature inside a tank full of water and their comparison on two days with different climatic conditions (irradiation and temperature ambient).
- Efficiency comparison of the solar heating system under ordinary irradiation and conventional electric resistance heating.
- Heat storage and its loss in the tank.

2.2. Operation mode

This system behaves like a greenhouse that absorbs the sun heat and converts it into thermal energy. The heat absorbed is transmitted to water through a pipeline in which the hot engine used oil fluid circulates. This heat exchanger,inside the tank storage, is made from copper.

The Thermodynamic collector prototype with and without waste oil accompanied with a PV panel is illustrated in Fig. 5. Since dark fluids present a much better efficiency of absorption, the thermodynamic collector has been filled with dark used oil, Fig. 5-A

2.3. Waste engine oil characteristics

The waste engine oil and their resources are classified into: spent motor oil, aqueous waste, waste oil emulsion, non-emulsified oil mixtures. Engine oil is mainly defined in terms of their performance and viscosity degree. The measurement of the viscosity is proportional to the fluid resistance flow. When the viscosity is low, the system

efficiency increases, which makes the oil circulation in the pipe and the exchanger easier (Perrier, 2005). It means that whenever the oil is more used, the characteristics have better performance since in this designed application the viscosity varies inversely with temperature (Ahmad et al., 2015; Perrier, 2005).

The most important property of lubricating oil is its viscosity and how it varies with the changes in temperature under the operational conditions to which it is subjected. The viscosity is strongly dependent on the temperature and varies in function of pressure and density (Ahmad et al., 2015; Perrier, 2005). With the increase of the temperature, the viscosity has to be stated for a certain temperature. The waste engine oil presents interesting advantages for solar energy applications; it does not freeze under low temperatures, and does not evaporate in the elevated temperatures when compared with other heat transfer liquids.

3. Physical model and mathematical formulation

Before representing the physical model and the mathematical formulation of the prototype, we will explain the the exact detailed thermal panel dimensions, specifications and design illustrated in Fig. 4. On one hand, the external tempered glass thickness plays an important role in the thermal insulation using the greenhouse effect. It ensures the protection of the other layers. On the other hand, since its optical properties can reduce the efficiency of the system, therefore, after some tests for different thicknesses, we came to realize that thebest thickness is 4 mm.

Fig. 4 shows also other parameters of the device such as an air layer of 25 mm which acts as a thermal insulator between the two tempered glass layers, afterwards the used oil thermal absorber layer whichis found between two tempered glass layers separated by 5 mm and finally the thermal insulator at the rear.

3.1. Energy balance

The physical model representing the heat transfer balance for each component of the solar collector, tube connection, and storage tank is given in the Table 3 using the nodal approach. The system of equations allows us to give a theoretical approach of the physical model in order to know the different thermal exchanges within the system and the various parameters involved.

The equivalent temperature of the sky is given by the relation (Boumaaraf et al., 2020b, 2020a; SELAMI et al., 2019).

$$T_{sky} = 0.0552T_a^{1.5} \tag{9}$$

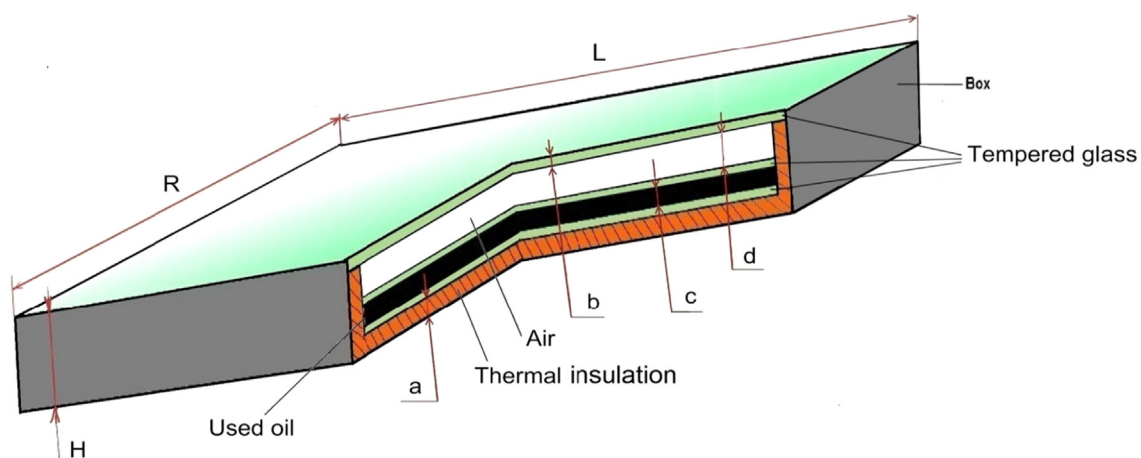


Fig. 4. Thermal collector design and specifications.

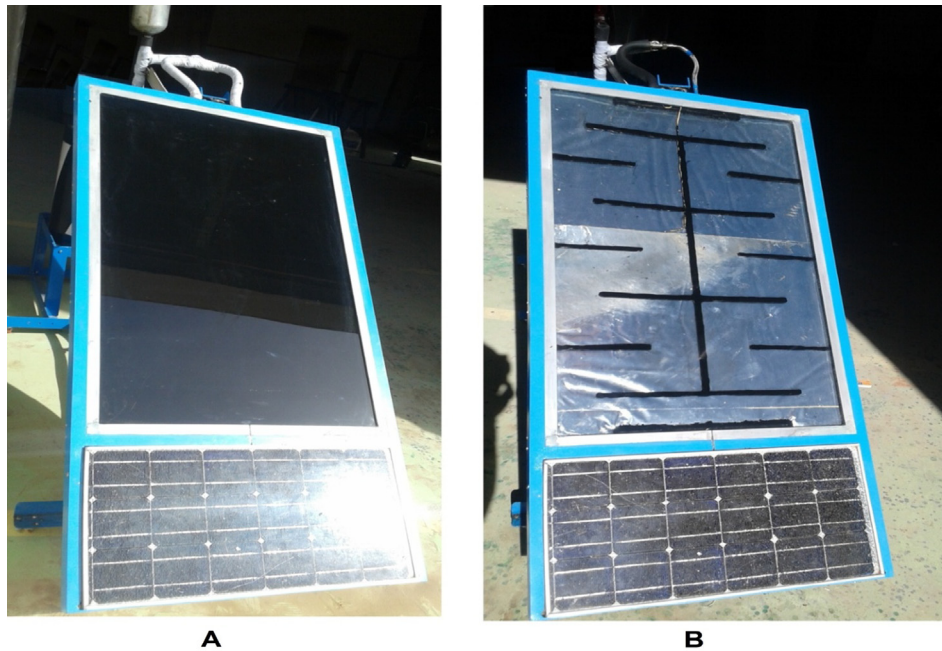


Fig. 5. PV panel with the thermodynamic collector, (A) with oil and (B) without oil.

3.2. Heat transfer coefficient

3.2.1. Radiative

The radiative heat transfer coefficient between the glass cover and the sky can be given by the following equation (Al-Nimr and Al-Ammari, 2016; M. E. A. Slimani et al., 2015).

$$h_{r,sky-g} = \sigma \epsilon_g \frac{(T_g^2 - T_{sky}^2)(T_c^2 + T_{sky}^2)}{(T_g - T_a)} \quad (10)$$

The radiative heat transfer coefficient between two parallel flat plates (i and j) is determined by the following equation (Rejeb et al., 2016; M. E.-A. Slimani et al., 2015).

$$h_{r,i-j} = \sigma \frac{(T_i + T_j)(T_i^2 + T_j^2)}{\frac{1}{\epsilon_i} + \frac{1}{\epsilon_j} - 1} \quad (11)$$

3.2.2. Conductive

The conductive heat transfer is made through the adjacent

components. The heat transfer coefficient in this case is expressed between two neighboring components i and j by the following relationship.

$$h_{c,i-j} = 1 / \left(\frac{l_i}{k_i} + \frac{l_j}{k_j} \right) \quad (12)$$

3.2.3. Convective

The convective heat coefficient due to the wind is described by the following relation (Amori and Abd-AllRaheem, 2014; Su et al., 2016).

$$h_{v,a} = 5.7 + 3.8V_w \quad (13)$$

The convective heat transfer coefficient for a fluid (oil, water, air) is determined by using the following relation:

$$h_{v,f} = \frac{NuK_f}{D_H} \quad (14)$$

Where Nu and D_H are the Nusselt number and hydraulic diameter respectively.

Table 3

Heat transfer balance equations for the system.

Component	Equation
Solar collector	
Cover glass (Glazing, g)	$M_g C_p \frac{dT_g}{dt} = S_c [\alpha_g G + h_{r,g-sky}(T_{sky} - T_g) + h_{r,g-g1}(T_{g1} - T_g) - h_{v,g-fc}(T_g - T_{fc}) + h_{v,a}(T_a - T_g)]$ (1)
Confined air	$M_{fc} C_p \frac{dT_{fc}}{dt} = S_c [h_{v,fc-g1}(T_{g1} - T_{fc}) - h_{v,fc-g2}(T_{fc} - T_{g2})]$ (2)
Glass 1 (g1)	$M_g C_p \frac{dT_{g1}}{dt} = S_c [G \tau_g \alpha_g + h_{r,g1-g2}(T_{g2} - T_{g1}) + h_{v,g1-fc}(T_{fc} - T_{g1}) - h_{c,g1-c}(T_{g1} - T_c)]$ (3)
waste oil (HTF)	$\dot{m}_{fc} C_p \frac{dT_f}{dx} = W_c [\tau_g^2 \alpha_f G + h_{v,f-g1}(T_{g1} - T_f) - h_{v,f-g2}(T_f - T_{g2})]$ (4)
Glass 2 (g2)	$M_g C_p \frac{dT_{g2}}{dt} = S_c [h_{c,g2-a}(T_a - T_{g2}) - h_{v,f-g2}(T_f - T_{g2})]$ (5)
External connection tubes	$\dot{m}_f C_p (T_{fi,i} - T_{fi,o}) = \dot{m}_f C_p (T_{fo,o} - T_{fi,i}) - S_t \cdot U_t (T_f - T_a)$ (6)
Storage tank	
Exchanger waste oil	$\dot{m}_{ft} C_p (T_{fi,i} - T_{fi,o}) = A \cdot U_{r,st} (T_{ft} - T_{wt})$ (7)
Stored Hot water	$m_{wt} C_p \frac{dT_{wt}}{dt} = \dot{m}_{ft} C_p (T_{fi,i} - T_{fi,o}) - A \cdot U_l (T_{wt} - T_a)$ (8)

Where: M, \dot{m} , C_p , S_c , W_c , α , τ , and G are the mass, mass flow rate, specific heat capacity, collector area, collector width, absorptivity, transmissivity, and the solar irradiation respectively.

To determine the Nusselt number, some correlations can be used as it has been reported by several researchers. A flow can be characterized by its nature of convection (forced or natural) and its regime (laminar, transient and turbulent). For the regime of the flow, the correlations reported by Sieder-Tate and Hausen, (Kraus et al., 2002; Serth and Lestina, 2014; Slimani et al., 2016), can be used.

In case of natural convection made in a tilted rectangular cavity, the Nusselt number is used with the correlation reported by Hollands et al, (Al-Kayiem and Yassen, 2015; Bahrehmand and Ameri, 2015; Hollands et al., 1976; Slimani et al., 2017).

3.3. Energy performance

The performance indices like thermal gain and thermal yield are expressed below.

3.3.1. Thermal power

The useful thermal output of the system is given by following the relationship:

$$Q_{th} = m_{wt} C_{p_w} \frac{\Delta T_{wt}}{\Delta t} = \frac{m_{wt} C_{p_w}}{t_j - t_i} (T_{w,j} - T_{w,i}) \tag{15}$$

3.3.2. Thermal efficiency

The instantaneous thermal efficiencies calculated using the following relationship:

$$\eta_{in} = \frac{dq_{th}}{G_i \cdot A} = m_{wt} C_{p_w} \frac{(T_{w,j} - T_{w,i})}{G_i \cdot A (t_j - t_i)} \tag{16}$$

While the overall thermal efficiency is calculated using the following relationship:

$$\eta_{ov} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} dq_{th} dt}{A \int_{t_i}^{t_f} G_i dt} \tag{17}$$

3.3.3. Thermal loss

During night, the overall thermal energy loss can be calculated using the following relationship:

$$P_{los} = \int_{t_i}^{t_f} dq_{th} dt \tag{18}$$

4. Experimentation sites

The experiments tests were held at the Unit of Development of Solar Equipment (UDES) located in Bousmail, northern Algeria, this region is moderately hot throughout the year. Bousmail city is located at the geographical data (latitude: 36° 38'33 " North, Longitude: 2° 41'24 " East, Altitude: 15 m / sea level).

Table 4 provides monthly average day of weather parameters (Solar Irradiation G, minimum T_{min} and maximum T_{max}temperatures, relative humidity RH)

The values of this table were extracted from the meteorological station measurement at the Unit of Development of Solar Equipment.

5. Experimental and measurement results

The different experimental tests were performed in September 2016 and February 2017. The prototype was oriented toward the south-position. Several thermocouples were installed in different places in the prototype to ensure the measurement of various temperatures, such as glazing surface temperature, oil temperature inside the absorber plate, input and output oil collector temperature, stored water temperature inside the tank, inlet and outlet water temperature, in addition, the ambient temperature and global horizontal solar radiation south-

oriented vertical plan was measured and sampled at 5 min intervals by using a data logger system. The solar radiation was measured by pyr-anometer CMP11. All temperatures were measured by K type thermo-couples with accuracy ± 1.5C.

For measurement of the stored water temperature, three thermo-couples were inserted inside the storage tank. The thermocouples were attached to measure the water temperature at the center of the tank, (Fig. 6). This disposition allows checking of the water temperature stratification in the storage tank. These kinds of solar water heaters suffer a lot of ambient heat losses during the night. To evaluate the heat retention capacity of this system, the coefficient of the water storage thermal losses. Us is calculated for various initial storage water temperatures. It can be then taken as function of the mean temperature difference during night. The first experimental test on the prototype was carried out at the end of September 2016 with an ambient temperature around 23 °C and during February 2017 where the ambient temperature does not exceed 18 °C.

The following scenarios and steps have been set up in order to evaluate the performance of the proposed solar heating water device.

The first step: test the prototype without water to determine the maximum temperature level of the oil that can be obtained from the system and thermal characteristics of the collector

- The second step: test the prototype with stored water, in order to determine the stored water temperature value, under typical solar radiation.
- The third step: comparing the temperature levels reached by the two fluids (stored water and waste oil) during a whole day;
- The fourth step: the stored water temperature behavior is examined on two different days for different solar irradiation level;
- The fifth step: for the same heating time, the solar heating water part of the prototype, subjected to a solar radiation of 1000 W/m², and compared to the conventional electric heating device integrated, with a power of 600 W. The parameters and characteristics of the system are then extracted, such as the efficiency, the power ...
- The last step: the thermal losses of the storage tank during the night will be estimated in order to test the insulation efficiency of the storage tank.

5.1. Prototype test without water

In this step, we performed two tests on the prototype:

In this part, we carried out several tests on the exposed prototype without water (stagnated system), and recorded the oil temperature variation compared to the solar radiation variation over a day period without thermal exchange.

Fig. 7 shows the variation of solar irradiation, waste oil and ambient temperature over a day from sunrise to sunset for the day of September, 29/09/2016. We notice that the oil temperature reaches 100 °C around 01 h PM when the sun is located at the zenith (960 w/m²). Such a

Table 4
Monthly average weather parameters measurement at Bousmail city (2016).

Month	G(KWh/m ²)	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	RH (%)	Wind speed (m/s)
January	118.55	8.14	23.18	61.08	3.57
February	119.01	7.20	23.78	57.15	4.32
March	157.36	7.00	33.66	60.83	3.65
April	146.55	10.25	22.66	65.35	2.67
May	144.04	10.54	31.96	65.81	2.79
Jun	161.28	16.24	33.00	66.52	2.56
July	166.84	16.90	37.10	69.62	2.51
August	176.29	10.42	35.48	69.38	2.40
September	166.14	8.72	34.40	62.35	2.32
October	153.48	16.70	36.8	64.21	2.30
November	106.85	9.60	32.06	57.38	3.21
December	119.30	7.00	26.00	64.03	2.87

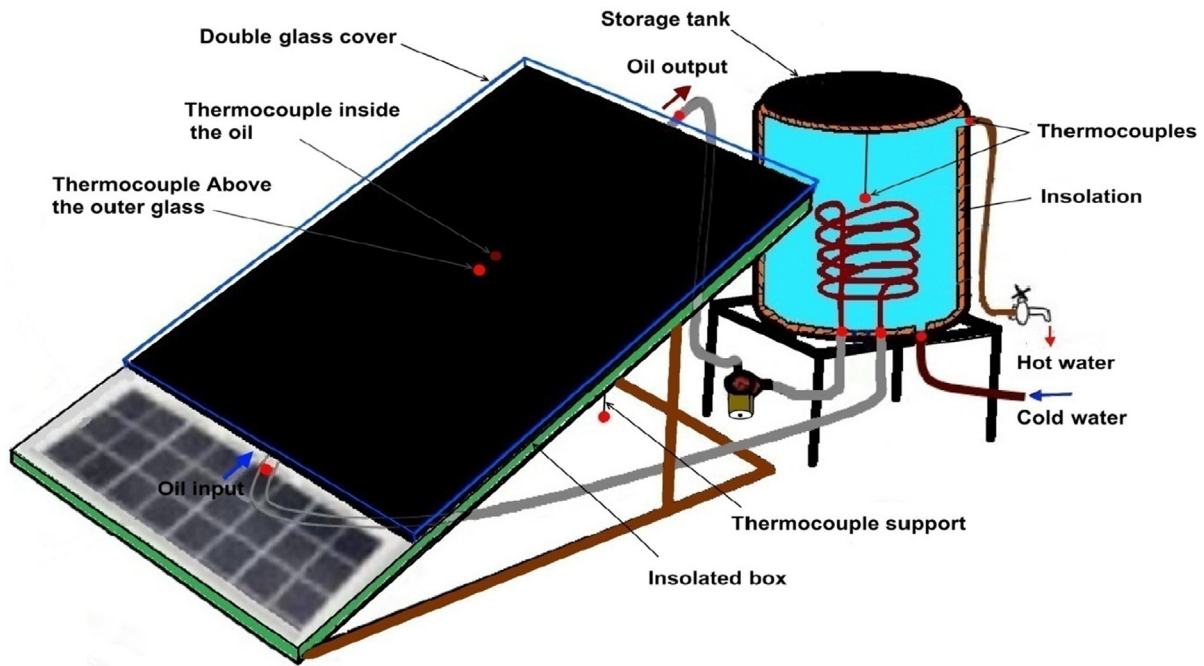


Fig. 6. The essential placement of thermocouples in the main system.

temperature is reached even though the ambient one does not exceed 25 °C and the heat loss accompanying the device. From this figure, the oil temperature is following the sun irradiation. The high temperature reached by the oil in this case can be explained by solar radiation (clear day), the thermos-physical and optical properties of the oil, and also due to the absence of a direct thermal exchange with water in the tank.

This experiment is very important, as we placed the solar collector under ideal sunlight (1000 W/m²), the temperature of the collector is equal to the ambient temperature, then we measure the variation in the oil temperature inside the thermal collector until the saturation stage, knowing that the oil volume inside the thermal collector is 3.4 L, and the collector area of is 0.6 m². This experiment allows us to measure the thermal efficiency and thermal characteristics of the

collector.

Fig. 8 shows this experiment on a sunny day and clear sky where the oil temperature inside the complex reached 94° C within 20 min with solar radiation estimated at around 1000 W/m².

From Fig. 9. We note that at solar radiation that ranges between 980 W/m² and 1050 W/m² and the oil temperature increases to reach 94 °C while the ambient temperature does not exceed 24 °C, although there is a heat loss in exterior glass of the collector which reached 68 °C.

The efficiency was calculated in the first 20 min of the experience while the temperature variation is linear, to avoid the saturation state.

Through the experimental results for this experiment, and after calculating the thermal collector efficiency using equation (17), the main results ,shown in Fig. 10, have been obtained, we notice that the

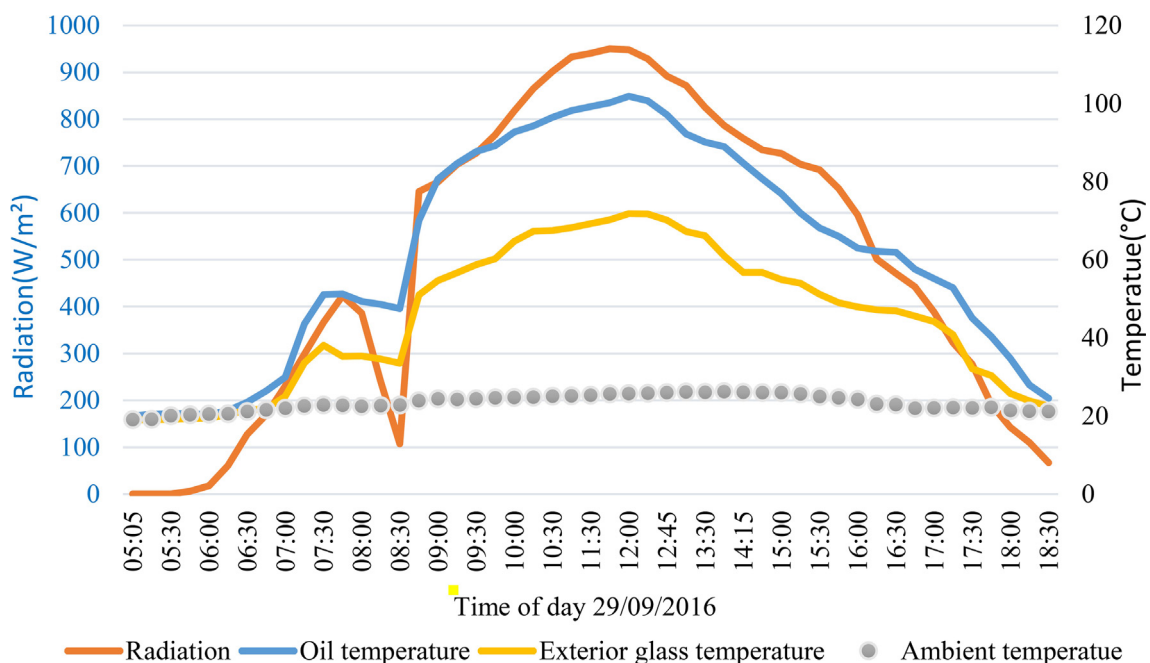


Fig. 7. The effect of solar radiation variation on the oil temperature.



Fig. 8. A picture of the prototype, which is in the field and applied experiments.

thermal collector efficiency is excellent so that it exceeds 70% and it is constant in the first ten minutes due to the linear variation of the oil temperature and then begins to decrease until it reaches 40% after about 23 min. This can be explained by the beginning of the system saturation so that the oil has not gaining a large heat compared to the first minutes of the experiment and this is what we observe by the oil temperature curvature.

We conclude that the prototype collector average efficiency is $\eta_c = 71\%$ where heating starts from 23 °C to 94 °C within 20 min, in the following weather conditions: solar radiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, and the ambient temperature $T_{am} = 23 \text{ °C}$.

5.2. Prototype test with water

In this step, two experiments were conducted on the prototype with a 50-liter integrated water tank, one in September 2016 and the second in February 2017. From the analyzed data, we observe that the water temperature still increases despite the decrease of the solar irradiation during the day, and it comes down to the amount of heat stored in the waste oil. This means that the oil temperature is higher than the water temperature and that heat thermal exchange between the water and oil is still effective (Fig. 15).

The experiment of Fig. 11 was done on the day 23/09/2016, starting from 09:00 AM and stopped when the water temperature stabilized around 49 °C which was reached around 01:00PM while the ambient temperature does not exceed 27 °C, although there is heat loss in the prototype. From these results, the energy produced by the heat transfer, which is calculated using equation (15), is compared to the whole sunlight available energy equation (10).

Fig. 12 shows that the water temperature increases to reach 42 °C while the ambient temperature does not exceed 19 °C. From these results, we can conclude that our system is performing well. Indeed, if the water does not reach the temperatures of September, it is due to the ambient environment, which cools the system. We can also assume that the effect of solar irradiation is about the same as in September.

Fig. 13 shows that the efficiency increases at the beginning and reaches a maximum of 80%. This is due to the large difference between the temperatures of the water and the oil. Then, from 10:00 AM, the efficiency decreases to 30%. This is due to the low temperature variation between water and oil and to the system saturation, despite the presence of a significant solar irradiation.

As same as for Fig. 13, Fig. 14 shows almost the same behavior as in September. We notice an increase in the beginning of the day and then decreases, during almost the whole day, following the diminution of the solar irradiation.

The average efficiency η (%) of the system in this experiment reaches, in September, an important value of 62% and the average efficiency in February reaches 50%, due to the low temperature effect on the system.

5.3. Water and oil temperature

In this step, we observe the variation and behavior of the water temperature compared to oil temperature and the exterior glass temperature of thermal collector

Fig. 15 shows the behavior of the output oil temperature; coming from the thermodynamic sensor and going to the heat exchanger, and the input oil temperature, coming out from the heat exchanger.

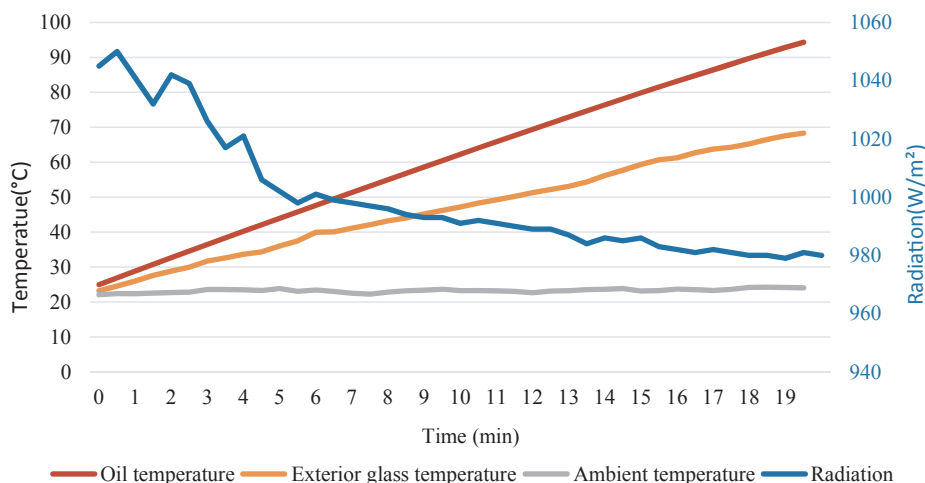


Fig. 9. The effect of solar radiation on the thermal collector without heat exchange with the water.

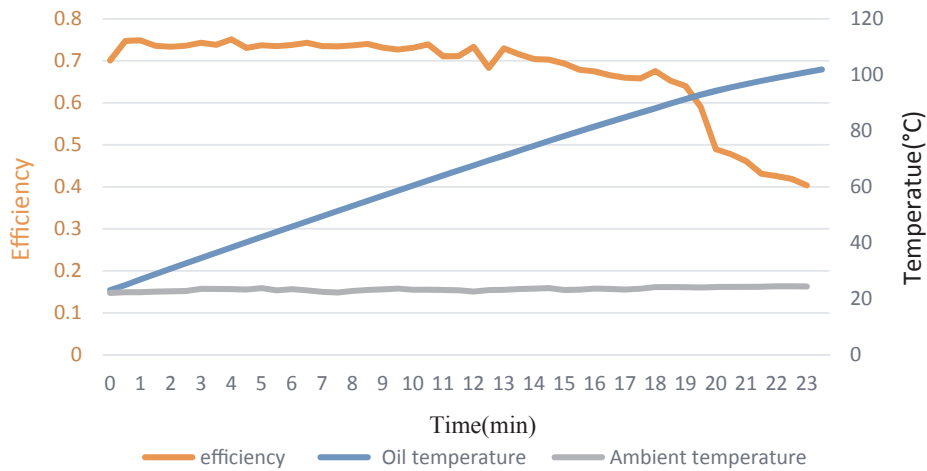


Fig. 10. The efficiency of the thermal collector in appropriate weather conditions.

As shown in Fig. 15 at 9:54, the oil pump is triggered and the prototype begins to operate. We note that the temperature of the water in the tank increases in parallel with oil. We notice also that the water temperature is slightly the same as the oil temperature, coming from the heat exchanger. Although the ambient temperature gradient increases slightly from 19 °C to 27 °C. We can conclude that our prototype behaves with a high efficiency. We see also that the difference oil temperature between the input and output to the heat copper exchanger is around 14° C.

5.4. Effect of solar irradiation on water temperature

Through the below-presented figure, the proportional relationship between solar radiation and temperature is evident, as we observe that when the solar radiation amount is 1000, the heat rate is maximum, which raises the water temperature to 60 °C as shown in Fig. 16, and vice versa when the radiation ratio decreases, the temperature Water reaches a minimum of 45 °C.

5.5. System characteristic for solar heater water versus electrical heater water

To show the performances of the proposed system, a comparison with an electrical resistance heater water has been conducted.

The heating of the water via the proposed prototype has been

carried out from 12:05 to 14:40, when the sun is at the zenith and when the irradiation is at its peak. During the same period of time data was collected using an electrical resistor. The results are shown in Fig. 17.

Fig. 17 shows that as long as the sun is at the zenith the solar heater system competes with a 600 W electric resistor. From 13h15, when the sun begins to decline, the sun irradiation is less powerful. Nevertheless, the water temperature still increases with a small slope.

- The heating system has a great efficiency whenever the water is cold or at low temperature, especially during time period between 12 h10 and 13 h10. From that moment the system is in a state of saturation and the water temperature of the proposed prototype undergoes a little increase because of the restriction of solar irradiation intensity.

To get the efficiency rate we need to compute the thermal energy absorbed by the water and compare it to the solar energy absorbed by the system.

After measuring the power, we observe from the curve (Fig. 18) that the absorption capacity is maximum in the case of a low temperature water, since it reaches 450 W and also because of the solar irradiation power which exceeds 1000 W /m², Fig. 19, between the period from 12:00 to 12:20. Then the heating power decreases to 100 Watt rise despite the presence of a significant solar irradiation.

Based on these experimental results, we conclude that the heating system has a great efficiency whenever the water temperature is low and the solar radiation is at peak.

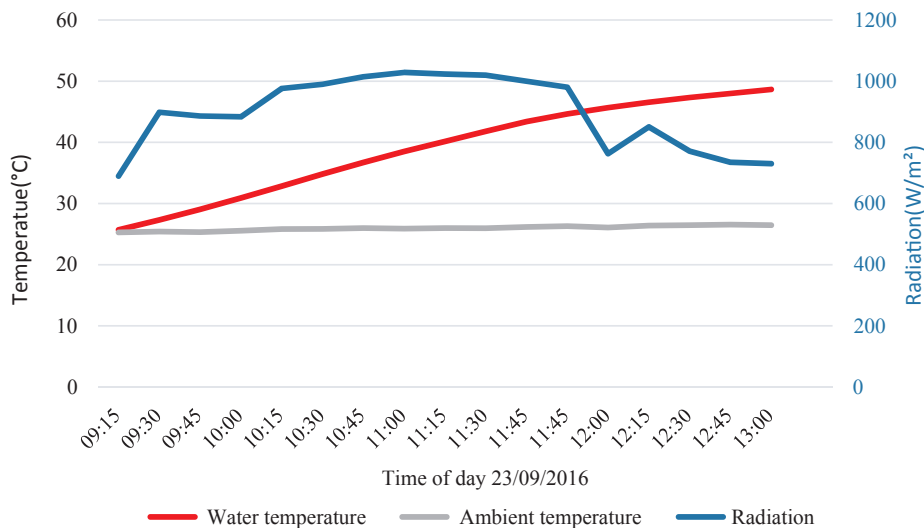


Fig. 11. Evolution of water temperature and solar irradiation for the system with integrated water tank in September.

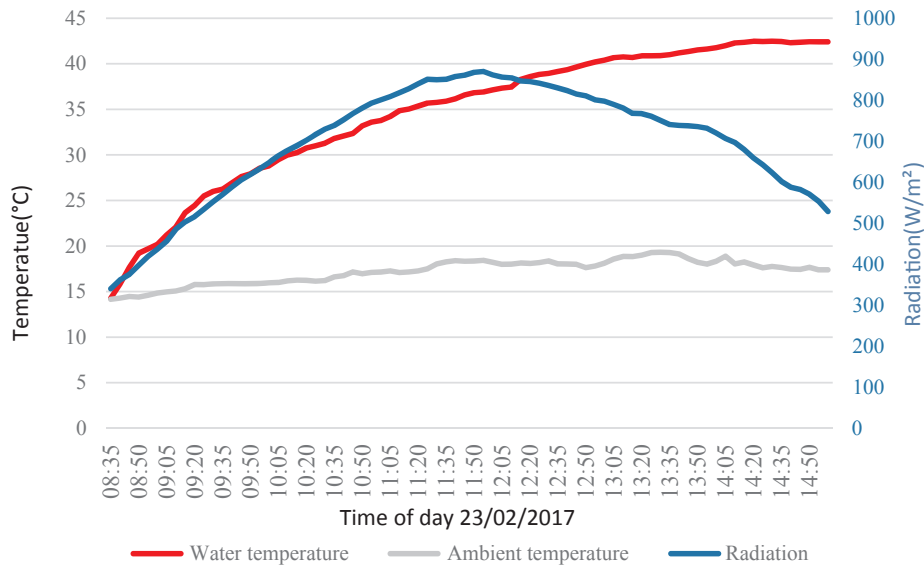


Fig. 12. Evolution of water temperature and solar irradiation for the system with integrated water tank in February.

Fig. 19 shows that the efficiency reaches a maximum of 80% and this happens at noon. From that time, the efficiency decreases until 40%. Despite the power full sun irradiation. This due to the high water temperature.

The average efficiency η (%) of the system in this experiment reaches an important value of 65%.

Two experiments have been done, one from 9.30 to 12.45, Fig. 13, and the second from 12.00 to 14.00, Fig. 19. It seems that our system, compared to similar heating water systems in the flat-plate collectors presents a much better efficiency, since other systems average efficiency is estimated between 45% and 60% while our system reaches an average of 65%.

We conclude, from the results, that the proposed system can compete with other similar systems.

- To have an excellent efficiency, we need to consume hot water and reload the tank such that the system seems to be reinitialized
- To obtain a high temperature of heating water we increase the space of the thermodynamic capture exposed to the sun.

Note: The reason for not raising the water temperature to high degrees in previous experiments, despite the high efficiency is due to the small area of the thermal collector, estimated to only 0.6 m² to heat 50 L of water.

5.6. Night thermal losses

Fig. 20 shows the effect the sun irradiation absence on water temperature. We see that, as long as the water is not used, the water temperature has a small decrease, around 10°

From Fig. 20, it can be observed that the water heat loses more than 10 °C of its temperature from 16:50 to 9:30 due to non-ideal thermal insulation in the prototype and decreasing of ambient temperature in the night. After calculating the total energy loss during this period, the total thermal energy losses equation (18) is $P_{los} = 39.48 \text{ Wh}$.

Through this study results, it is very feasible to develop this prototype industrially to become an effective device for home use water heating. This principle can also be used for heating in general, especially in third world countries, due to several reasons among them: that used motor oil in third world countries is free of charge and not being

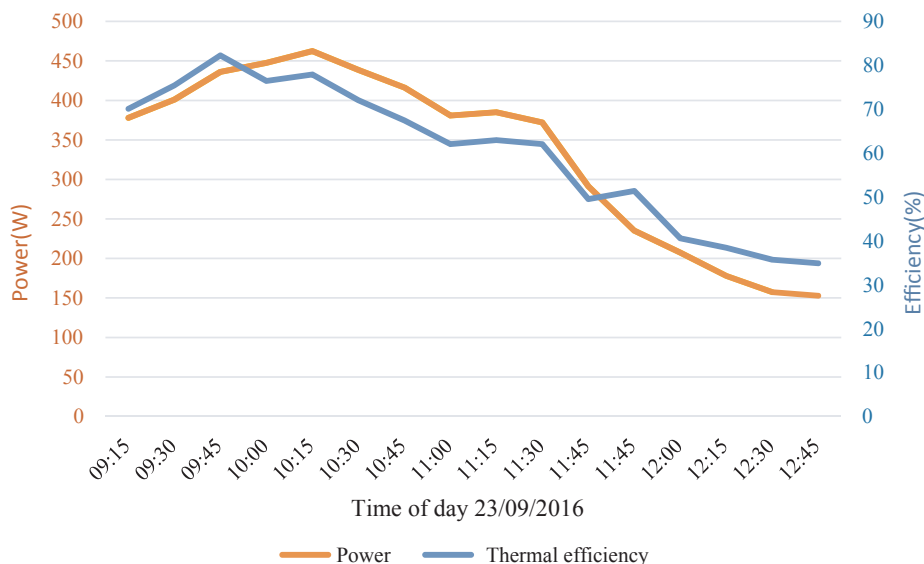


Fig. 13. Evolution of power and thermal efficiency in September.

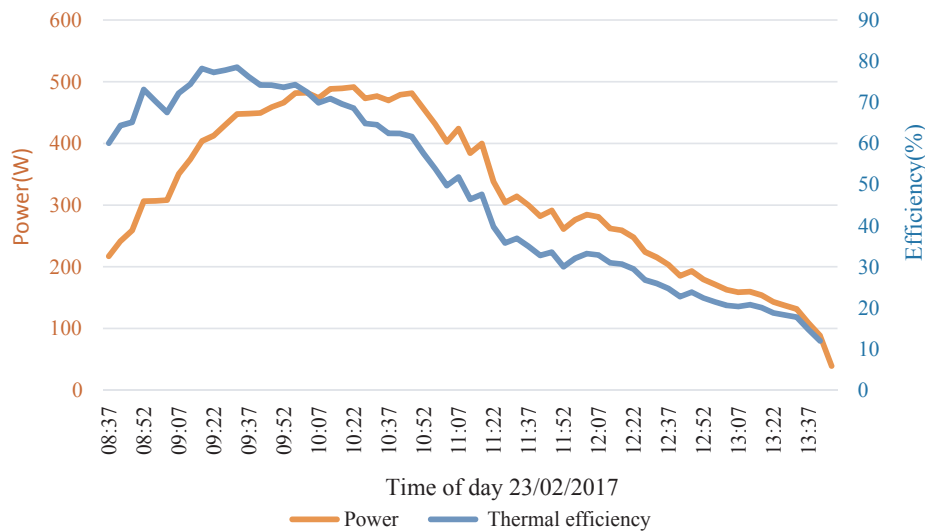


Fig. 14. Evolution of Power and thermal efficiency in February.

recycled and this helps to reduce the price of this type of heaters and reuse these oils to preserve the environment.

Also this system is very effective compared to similar systems, where we have noticed through the study that the yield can reach 65% when the appropriate conditions are met.

6. Conclusion

Given the earth global warming, the transition to renewable energy systems is indispensable. Recycling waste oil, is a part of the sustainable development. Several experimental tests have been performed at the Unit of Development of Solar Equipment in Bousmail city (Algeria). The results were very satisfactory since we reached an acceptable heating temperature of up to 60 °C in a 50-liter water tank and 71% of average efficiency of prototype thermal collector and a 65% heating efficiency rate, which is a very acceptable result since medium effectiveness of similar conventional heating systems does not exceed 70%.

Moreover, the thermal transfer fluid (waste oil), and the materials with which the collector is built can show other advantage points such as:

- An abundance of burnt motor oils which ensures the reuse (or recycling) of the used oils and consequently a less expensive system.
- As the thermal conversion system is based on the use of waste oils (as an HTF) which is a non-corrosive fluid, the cost of maintenance of the system will be lower.
- During non-sunny days, the heat storage tank is provided with an electric resistance as a backup system to ensure continuous use.
- Very useful in isolated places without electricity

This innovative system can be a solution to successful recycling of mineral waste oils engine, so preserving the environment.

As a perspective of this work research, to confirm the effectiveness of this present system, we will conduct field experiments throughout the year and in different seasons.

Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

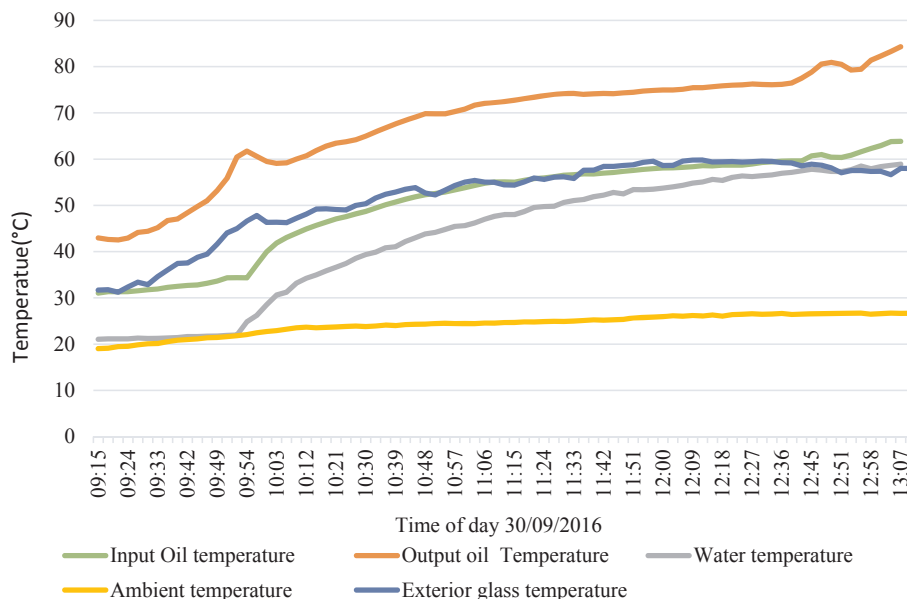


Fig. 15. The water temperature compared to input and output oil temperature of thermal plate collector.

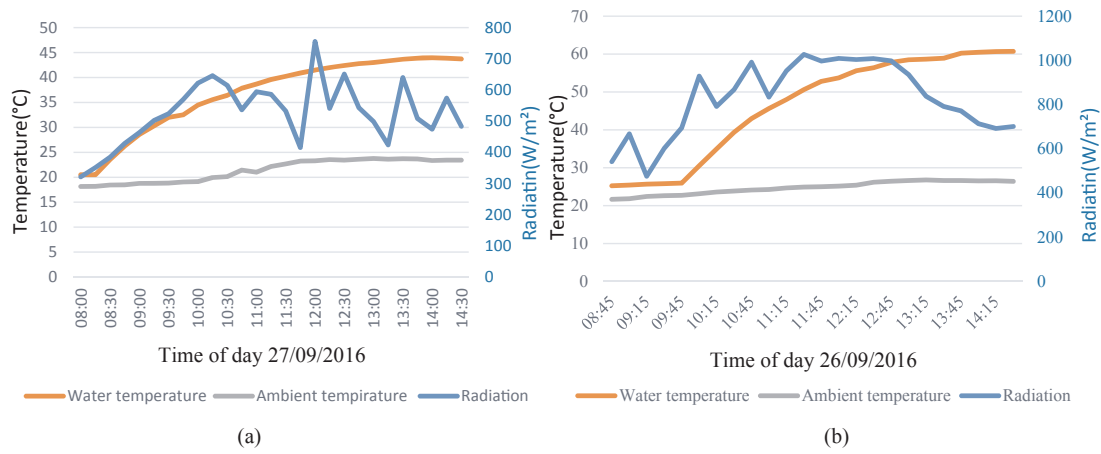


Fig. 16. Water temperature versus sun irradiation: (a) low solar irradiation day; (b) high solar irradiation day.

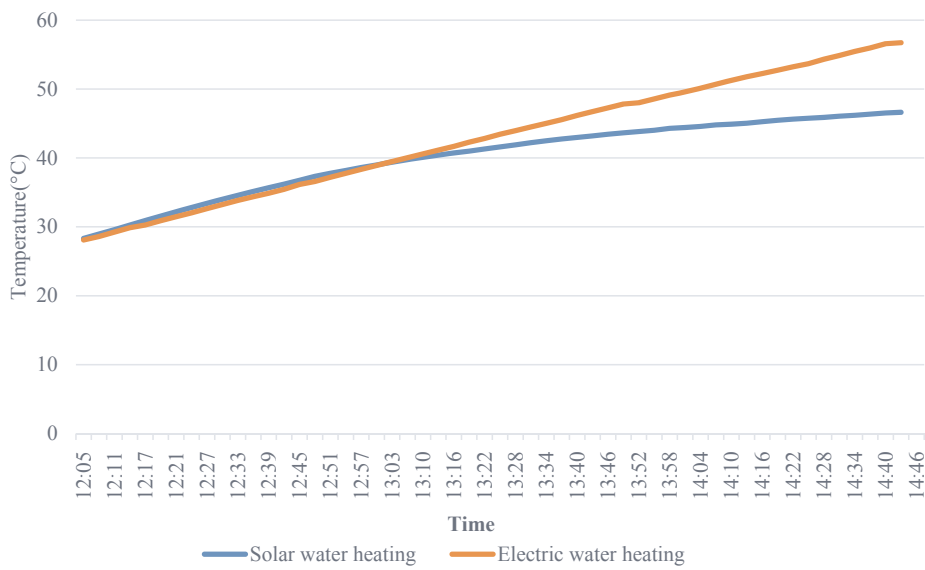


Fig. 17. Solar heating versus electrical resistor.

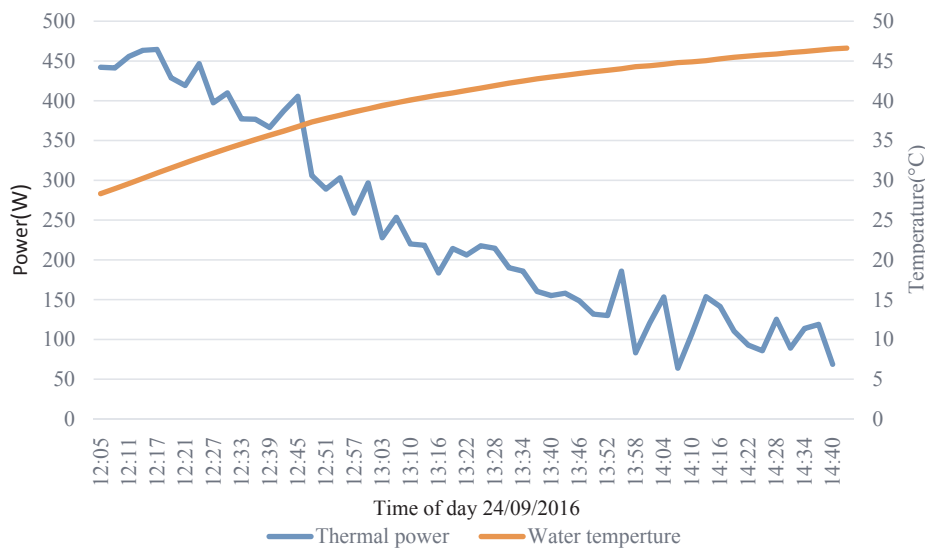


Fig. 18. Power variation of the heated water.

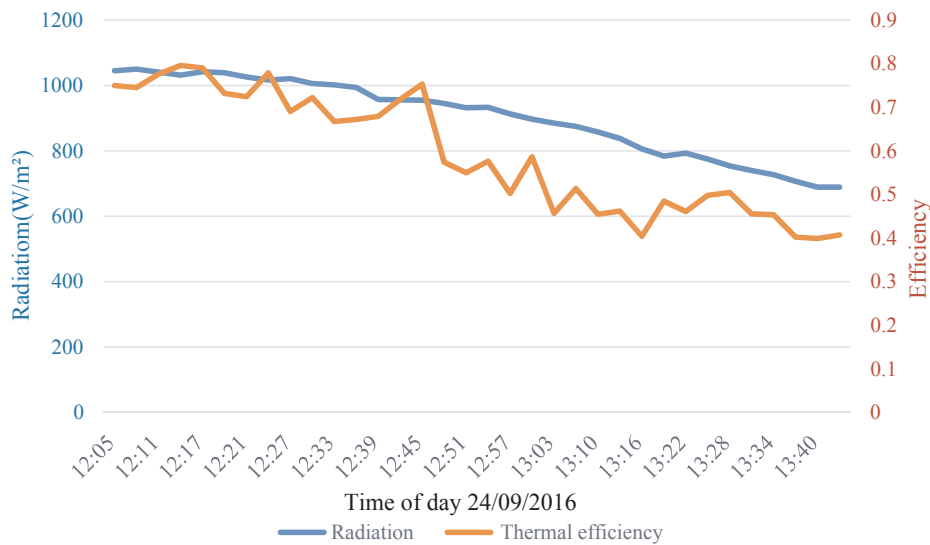


Fig. 19. Thermal efficiency within two hours of maximum irradiation.

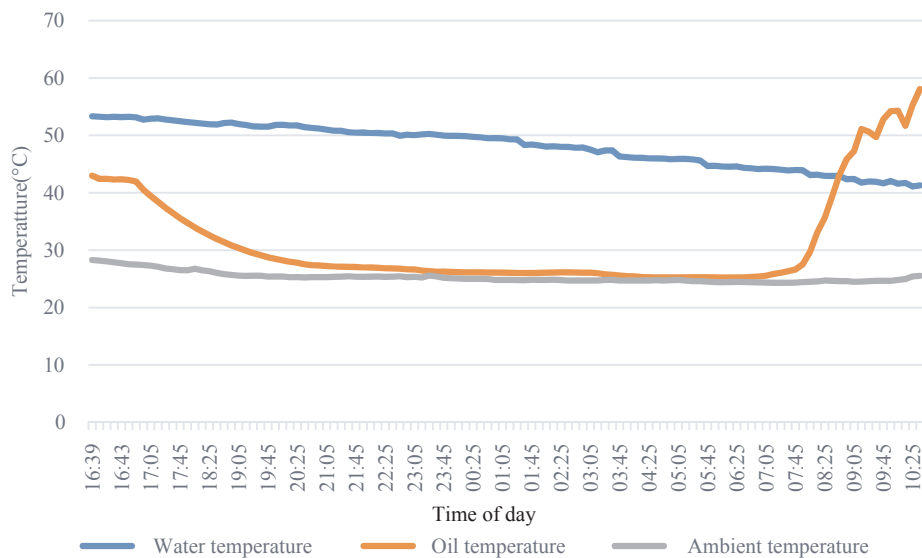


Fig. 20. Loss of temperature water in the case of solar radiation absence.

References

Agathokleous, R., Barone, G., Buonomano, A., Forzano, C., Kalogirou, S.A., Palombo, A., 2019. Building façade integrated solar thermal collectors for air heating: experimentation, modelling and applications. *Appl. Energy* 239, 658–679. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.01.020>.

Ahamad, T., Chadrsekhar, B.P., Mohan, P.N., Joshi, K.S., Sree, T.D.R., 2015. Recycling and Analysis of Spent Engine Oil. *Int. J. Sci. Eng. Res.* 6, 711–717.

Al-Kayiem, H.H., Yassen, T.A., 2015. On the natural convection heat transfer in a rectangular passage solar air heater. *Sol. Energy* 112, 310–318. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2014.11.031>.

Al-Nimr, M.A., Al-Ammari, W.A., 2016. A novel hybrid PV-distillation system. *Sol. Energy* 135, 874–883. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2016.06.061>.

Aleer, S., Adetutu, E.M., Makadia, T.H., Patil, S., Ball, A.S., 2011. Harnessing the hydrocarbon-degrading potential of contaminated soils for the bioremediation of waste engine oil. *Water, Air, Soil Pollut.* 218, 121–130. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0628-1>.

Amori, K.E., Abd-AlRaheem, M.A., 2014. Field study of various air based photovoltaic/thermal hybrid solar collectors. *Renew. Energy* 63, 402–414. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2013.09.047>.

Bahremand, D., Ameri, M., 2015. Energy and exergy analysis of different solar air collector systems with natural convection. *Renew. Energy* 74, 357–368. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2014.08.028>.

Boumaaraf, B., Boumaaraf, H., Slimani, M.E.-A., Tchoketch Kebir, S., Ait-cheikh, M.S., Touafek, K., 2020a. Performance evaluation of a locally modified PV module to a PV/T solar collector under climatic conditions of semi-arid region. *Math. Comput. Simul.* 167, 135–154. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2019.09.013>.

Boumaaraf, B., Touafek, K., Ait-cheikh, M.S., Slimani, M.E.A., 2020b. Comparison of electrical and thermal performance evaluation of a classical PV generator and a water glazed hybrid photovoltaic-thermal collector. *Math. Comput. Simul.* 167, 176–193. <https://doi.org/10.1016/j.matcom.2018.09.003>.

Bouraiou, A., Necaibia, A., Boutasseta, N., Mekhilef, S., Dabou, R., Ziane, A., Sahouane, N., Attoui, L., Mostefaoui, M., Touaba, O., 2020. Status of renewable energy potential and utilization in Algeria. *J. Clean. Prod.* 246, 119011. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119011>.

Chun, W., Kang, Y.H., Kwak, H.Y., Lee, Y.S., 1999. An experimental study of the utilization of heat pipes for solar water heaters. *Appl. Therm. Eng.* 19, 807–817. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(98\)00096-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(98)00096-9).

Dagdougui, H., Ouammi, A., Robba, M., Sacile, R., 2011. Thermal analysis and performance optimization of a solar water heater flat plate collector: application to Tétouan (Morocco). *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.010>.

Daghigh, R., Shafieian, A., 2016. Theoretical and experimental analysis of thermal performance of a solar water heating system with evacuated tube heat pipe collector. *Appl. Therm. Eng.* 103, 1219–1227. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.05.034>.

Emam, E.A., Shoaib, A.M., 2013. Re-refining of used lube oil, I-by solvent extraction and vacuum distillation followed by hydrotreating. *Pet. Coal* 55.

Esen, M., 2004. Thermal performance of a solar cooker integrated vacuum-tube collector with heat pipes containing different refrigerants. *Sol. Energy* 76, 751–757. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.12.009>.

Esen, M., 2000. Thermal performance of a solar-aided latent heat store used for space heating by heat pump. *Sol. Energy* 69, 15–25. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00015-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00015-3).

Esen, M., Ayhan, T., 1996. Development of a model compatible with solar assisted

- cylindrical energy storage tank and variation of stored energy with time for different phase change materials. *Energy Convers. Manag.* 37, 1775–1785. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(96\)00035-0](https://doi.org/10.1016/0196-8904(96)00035-0).
- Esen, M., Esen, H., 2005. Experimental investigation of a two-phase closed thermosyphon solar water heater. *Sol. Energy* 79, 459–468. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.01.001>.
- Garnier, C., Muneer, T., Currie, J., 2018. Numerical and empirical evaluation of a novel building integrated collector storage solar water heater. *Renew. Energy* 126, 281–295. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.041>.
- Ge, T.S., Wang, R.Z., Xu, Z.Y., Pan, Q.W., Du, S., Chen, X.M., Ma, T., Wu, X.N., Sun, X.L., Chen, J.F., 2018. Solar heating and cooling: Present and future development. *Renew. Energy* 126, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2017.06.081>.
- Harmim, A., Boukar, M., Amar, M., Haida, A., 2019. Simulation and experimentation of an integrated collector storage solar water heater designed for integration into building facade. *Energy* 59–71. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.10.069>.
- Hollands, K.G.T., Unny, T.E., Raitby, G.D., Konicsek, L., 1976. Free Convective Heat Transfer Across Inclined Air Layers. *J. Heat Transfer* 98, 189. <https://doi.org/10.1115/1.3450517>.
- Hossain, M.S., Saidur, R., Fayaz, H., Rahim, N.A., Islam, M.R., Ahamed, J.U., Rahman, M.M., 2011. Review on solar water heater collector and thermal energy performance of circulating pipe. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.008>.
- Jaisankar, S., Ananth, J., Thulasi, S., Jayasuthakar, S.T., Sheeba, K.N., 2011a. A comprehensive review on solar water heaters. *Renew. Sustain. Energy Rev.* <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.03.009>.
- Jaisankar, S., Radhakrishnan, T.K., Sheeba, K.N., 2011b. Experimental studies on heat transfer and thermal performance characteristics of thermosyphon solar water heating system with helical and Left-Right twisted tapes. *Energy Convers. Manag.* 52, 2048–2055. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2010.11.024>.
- Jamar, A., Majid, Z.A.A., Azmi, W.H., Norhafana, M., Razak, A.A., 2016. A review of water heating system for solar energy applications. *Int. Commun. Heat Mass Transf.* <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.05.028>.
- Jayakanth, J.J., Ramasubramanian, S., Chandrasekaran, M., Manavalan, S., 2017. Investigation of solar water heater by using flat plate collector and evacuated tubes. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, pp. 12035. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/183/1/012035>.
- Kalogirou, S., 2003. The potential of solar industrial process heat applications. *Appl. Energy* 76, 337–361. [https://doi.org/10.1016/S0306-2619\(02\)00176-9](https://doi.org/10.1016/S0306-2619(02)00176-9).
- Khan, S.I., Islam, A., 2011. Performance analysis of solar water heater. *Smart Grid Renew. Energy* 2, 396–398.
- Kraus, A.D., Aziz, A., Welty, J., 2002. *Extended surface heat transfer*. John Wiley & Sons.
- Kulkarni, M., Deshmukh, D., 2015. *Design of Experiment for Solar Water Heater Performance. Analysis* 3, 55–60.
- Li, B., Zhai, X., Cheng, X., 2018. Experimental and numerical investigation of a solar collector/storage system with composite phase change materials. *Sol. Energy* 164, 65–76. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2018.02.031>.
- Mnasri, F., Bahria, S., Slimani, M.E.A., Lahoucine, O., El Ganaoui, M., 2020. Building incorporated bio-based materials: experimental and numerical study. *J. Build. Eng.* 28. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101088>.
- Mongre, P.K., Gupta, B., 2013. Experiment study of solar water heater with circulating pump and using of Aluminum tube. *Int. J. Eng. Trends and Technol.* 3, 384–391.
- Muhumuza, R., Zacharopoulos, A., Mondol, J.D., Smyth, M., Pugsley, A., 2019. Experimental study of heat retention performance of thermal diode Integrated Collector Storage Solar Water Heater (ICSSWH) configurations. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 34, 214–219. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.05.010>.
- Nowak, P., Kucharska, K., Kamiński, M., 2019. Ecological and Health Effects of Lubricant Oils Emitted into the Environment. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 16, 3002. <https://doi.org/10.3390/ijerph16163002>.
- Panahi, R., Khanjanpour, M.H., Javadi, A.A., Akrami, M., Rahnama, M., Ameri, M., 2019. Analysis of the thermal efficiency of a compound parabolic Integrated Collector Storage solar water heater in Kerman, Iran. *Sustain. Energy Technol. Assessments* 36, 100564. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2019.100564>.
- Perrier, C., 2005. Etude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissance-Recherche d'une mélange optimal. Ecole Centrale de Lyon.
- Rejeb, O., Sardarabadi, M., Ménéz, C., Passandideh-Fard, M., Dhaou, M.H., Jemni, A., 2016. Numerical and model validation of uncovered nanofluid sheet and tube type photovoltaic thermal solar system. *Energy Convers. Manag.* 110, 367–377. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2015.11.063>.
- Robinson, B.H., 2009. E-waste: an assessment of global production and environmental impacts. *Sci. Total Environ.* <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.09.044>.
- Seddegh, S., Wang, X., Henderson, A.D., Xing, Z., 2015. Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 49, 517–533. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.147>.
- Sellami, R., Amirat, M., Mahrane, A., Slimani, M.E.-A., Arbane, A., Chekrouni, R., 2019. Experimental and numerical study of a PV/Thermal collector equipped with a PV-assisted air circulation system: configuration suitable for building integration. *Energy Build.* 190, 216–234. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.03.007>.
- Serth, R.W., Lestina, T., 2014. *Process heat transfer: Principles, applications and rules of thumb*. Academic Press.
- Shabgard, H., Song, L., Zhu, W., 2018. Heat transfer and exergy analysis of a novel solar-powered integrated heating, cooling, and hot water system with latent heat thermal energy storage. *Energy Convers. Manag.* 175, 121–131. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2018.08.105>.
- Shukla, R., Sumathy, K., Erickson, P., Gong, J., 2013. Recent advances in the solar water heating systems: a review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 19, 173–190. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.10.048>.
- Sivakumar, P., Christraj, W., Sridharan, M., Jayamalathi, N., 2012. Performance improvement study of solar water heating system. *ARPN J. Eng. Appl. Sci.* 7, 45–49.
- Slimani, M.E.-A., Amirat, M., Bahria, S., 2015. Analysis of thermal and electrical performance of a solar PV/T air collector: Energetic study for two configurations. In: *3rd International Conference on Control, Engineering and Information Technology, CEIT 2015*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CEIT.2015.7232999>.
- Slimani, M.E.A., Amirat, M., Bahria, S., 2015b. Study and modeling of heat transfer and energy performance in a hybrid pv/t collector with double passage of air. *Int. J. Energy a Clean Environ.* 16, 235–245. <https://doi.org/10.1615/InterJenerCleanEnv.2015015642>.
- Slimani, M.E.A., Amirat, M., Bahria, S., Kurucz, I., Aouli, M., Sellami, R., 2016. Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: configuration suitable for an indirect solar dryer. *Energy Convers. Manag.* 125, 209–221. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.03.059>.
- Slimani, M.E.A., Amirat, M., Kurucz, I., Bahria, S., Hamidat, A., Chaouch, W.B., 2017. A detailed thermal-electrical model of three photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid air collectors and photovoltaic (PV) module: comparative study under Algiers climatic conditions. *Energy Convers. Manag.* <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.066>.
- Smyth, M., Pugsley, A., Hanna, G., Zacharopoulos, A., Mondol, J., Besheer, A., Savvides, A., 2019. Experimental performance characterisation of a Hybrid Photovoltaic/Solar Thermal Façade module compared to a flat Integrated Collector Storage Solar Water Heater module. *Renew. Energy* 137, 137–143. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2018.04.017>.
- Su, D., Jia, Y., Huang, X., Alva, G., Tang, Y., Fang, G., 2016. Dynamic performance analysis of photovoltaic-thermal solar collector with dual channels for different fluids. *Energy Convers. Manag.* 120, 13–24. <https://doi.org/10.1016/J.ENCONMAN.2016.04.095>.
- Tanha, K., Fung, A.S., Kumar, R., 2015. Performance of two domestic solar water heaters with drain water heat recovery units: Simulation and experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 90, 444–459. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.07.038>.
- Tewari, K., Dev, R., 2019. Exergy, environmental and economic analysis of modified domestic solar water heater with glass-to-glass PV module. *Energy* 170, 1130–1150. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.122>.
- Xue, H.S., 2016. Experimental investigation of a domestic solar water heater with solar collector coupled phase-change energy storage. *Renew. Energy* 86, 257–261. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.08.017>.
- Yassen, T.A., Mokhlif, N.D., Eleiwi, M.A., 2019. Performance Investigation of an Integrated Solar Water Heater with Corrugated Absorber Surface for Domestic Use. *Renew. Energy.* <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.01.114>.

Annexe II
Article conférence

Investigation and Prototyping Implementation of a Novel Solar Water Collector Based on Used Engine Oil as HTF

International Conference on Electrical Engineering and Control Applications

ICEECA 2019: Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications pp 779-789 | Cite as

Conference paper

First Online: 30 September 2020

200

Downloads

Part of the [Lecture Notes in Electrical Engineering](#) book series (LNEE, volume 682)

Abstract

This work is based purely on experimental results, where a Water Heater Collector with Storage Tank (WHCST) was realized using used engine oil as a basic material in the principle operating. After applying several experiments on the type of used oil type S15 W40t was confirmed that it can be a good absorber of sunlight and heat transfer simultaneously and it can be used in heating purposes. Through experimental thermal properties of the proposed thermal collector. this water heat system provides a significant efficiency since the temperature reaches values greater than 40 °C for a 50 L water tank in less than four operating hours under a moderate sunlight (less than 700 W/m²) and external temperatures less than 18 °C (In February).

Keywords

Solar water heater Solar energy Waste engine oil Solar thermal collector

Investigation and Prototyping Implementation of a Novel Solar Water Collector Based on Used Engine Oil as HTF



Oussama Touaba, Salah Mohamed AitCheikh, Mohamed El-Amine Slimani,
Ahmed Bouraiou, and Abderrezzaq Ziane

Abstract This work is based purely on experimental results, where a Water Heater Collector with Storage Tank (WHCST) was realized using used engine oil as a basic material in the principle operating. After applying several experiments on the type of used oil type S15 W40t was confirmed that it can be a good absorber of sunlight and heat transfer simultaneously and it can be used in heating purposes. Through experimental thermal properties of the proposed thermal collector. this water heat system provides a significant efficiency since the temperature reaches values greater than 40 °C for a 50 L water tank in less than four operating hours under a moderate sunlight (less than 700 W/m²) and external temperatures less than 18 °C (In February).

Keywords Solar water heater · Solar energy · Waste engine oil · Solar thermal collector

O. Touaba (✉) · A. Bouraiou · A. Ziane

Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS), 01000 Adrar, Algeria

e-mail: touaba.oussama@urerms.dz

A. Bouraiou

e-mail: bouraiouahmed@gmail.com

A. Ziane

e-mail: a.ziane@urerms.dz

O. Touaba

Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 16000 Alger, Algeria

S. M. AitCheikh

Laboratoire des Dispositif de Communication et de Conversion Photovoltaïque, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 16000 Algiers, Algeria

e-mail: salah.aitcheikh@gmail.com

M. E.-A. Slimani

Departement of Energetic and Fluid Mechanics, Faculty of Physics, University of Science and Technology Houari Boumediene (USTHB), 16111 Algiers, Algeria

e-mail: muslimani@usthb.dz

© Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2021

S. Bououden et al. (eds.), *Proceedings of the 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications*, Lecture Notes in Electrical Engineering 682, https://doi.org/10.1007/978-981-15-6403-1_53

779

1 Introduction

The renewable energy sector became an important sector due to GHG emission reduction and decreasing fossil sources dependence [1]. Besides, imported fossil fuels account for more than 95% of their primary energy sources in the world [2], resulting in high electricity bills, energy system foreclosures, economies of scale, low economies and low energy security. In the interest of sustainable development to minimize the impact of pollution on the environment, we proposed using used motor oils in heating system.

The RE application based on solar energy like photovoltaic and thermal is widely used in the world in recent years [3, 4]. Solar heating is one of this energy application that uses thermal energy from sunlight to heat the water or other fluids via a collector [5–7]. Several studies concerning various kind of solar heater system were performed in different locations [6–13]. The improvement and development of this solar converter is to be exploited in several application and fields; in housing and agricultural activities [3, 4, 14–18].

The solar water heater is generally composed of one or more solar collectors, a storage tank and a heat transfer fluid circulation system which transfers the heat generated by the solar collectors to the storage tank as presented in Fig. 1.

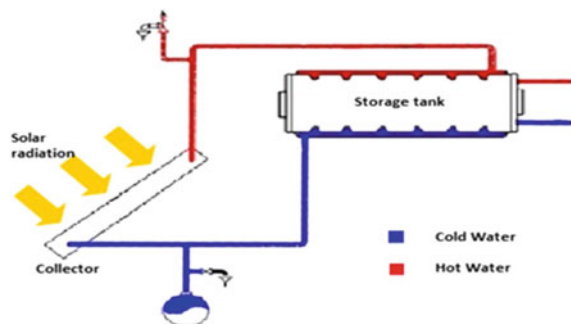
In this paper, novel solar water heater employing waste engine oil as absorber and heat transfer fluid for water heating, is described.

This device is based on two systems which are thermal and photovoltaic, we will focus on the characteristics of the thermal panel part.

The work is organization as follow:

- Materials and methods: proposed prototype and operation Mode and mathematical formulation of energy performance.
- Experimental measures and results: Contain the Platform measurement description and heat thermal panel characteristic, discussion results of power and thermal efficiency.

Fig. 1 Individual domestic solar water heater



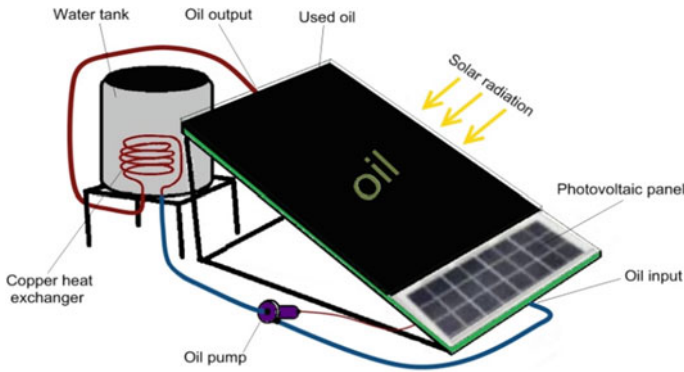


Fig. 2 Diagram illustrating of all system components

2 Materials and Methods

2.1 Prototype and Operation Mode

In this work, it is a matter of combining photovoltaic system and a thermodynamic system to release a heating system which is mounted on a structure of aluminum.

The basic components of the system components presented in this study are illustrated in Fig. 2.

The prototype thermodynamic collector proposed in this study consists of two plates of tempered glass in which circulates the liquid (used oil) between them and the distance between the two plates is 5 mm, an electric pump transfers the hot oil to the water tank, and this system behaves like a greenhouse that absorbs and increase the heat that converted in high thermal energy.

The heat obtained is transmitted through pipeline containing a hot fluid which is, in our case, the used oil engine to other liquid (water). The heat exchanger made from copper, and it is responsible of heat exchange inside the tank storage.

For this, the completion of a prototype has yielded considerable results; so many experiments have been done on the prototype as shown in Fig. 3. in order to evaluate this idea and the possibility of its future use in the industrial field.

The design parameters of the prototype are summarized in Table 1.

2.2 Energy Performance

The performance indices like thermal gain and thermal yield are expressed below.

The useful thermal output of the system is given by following relationship:



Fig. 3 Photograph of the proposed prototype

Table 1 Design parameter of the system

Symbol	Characteristic	Value
S_c	Thermal surface exposed to light	1 m ²
I_p	Pipes length	400 cm
S_e	Heat exchanger surface	0.17 m ²
V_e	Volume of oil in the exchanger	0.3 L
V_t	Volume of oil in pipes with thermal insulation	0.4 L
V_c	Volume of oil in heat collector exposed to light	3.4 L
V_o	Total oil volume	4.1 L

$$Q_{th} = m_{wt}Cp_w \frac{\Delta T_{wt}}{\Delta t} = \frac{m_{wt}Cp_w}{t_j - t_i} (T_{w,j} - T_{w,i}) \tag{1}$$

The instantaneous thermal efficiency is calculated using the following relationship:

$$\eta_{th} = \frac{dq_{th}}{G_i \cdot A} = m_{wt}Cp_w \frac{(T_{w,j} - T_{w,i})}{G_i \cdot A (t_j - t_i)} \tag{2}$$

While the overall thermal efficiency is calculated using the following relationship:

$$\eta_{th} = \frac{\int_{t_i}^{t_f} dq_{th} dt}{A \int_{t_i}^{t_f} G_i dt} \tag{3}$$

Table 2 Monthly Average day weather parameters (2016) of Tipaza city

	G (KWh/m ²)	T _{Average} (°C)
January	118.55	15.66
February	119.01	15.1
March	157.36	16.12
April	146.55	19.2
May	144.04	20.75
Jun	161.28	26.95
July	166.84	22.5
August	176.29	21.36
September	166.14	26.27
October	153.48	20.5
November	106.85	18.32
December	119.30	16.55

3 Experimental Results

3.1 Experimentation Sites

The experiments tests were held at the Solar Equipment Development Unit UDES in the northern Algeria in Bouismail city,

Table 2 provides monthly Average day of weather parameters (Solar Irradiation G, T_{min} and maximum T_{max} temperatures, relative humidity RH).

The values of this table were calculated from the daily measurements of the meteorological station along all the days of the year.

3.2 Used Measurement Materials

The data acquisition equipment used in the experimental prototype for several consecutive days to perform the necessary parameters (temperature, irradiation, level heating water), and all the measurement which is exploited in this study, is shown in Fig. 4 and presented as follow:

1. Data acquisition equipment
2. Weather station model meteorological station (NEAL) installed in UDES
3. Thermocouples type k
4. Computer.

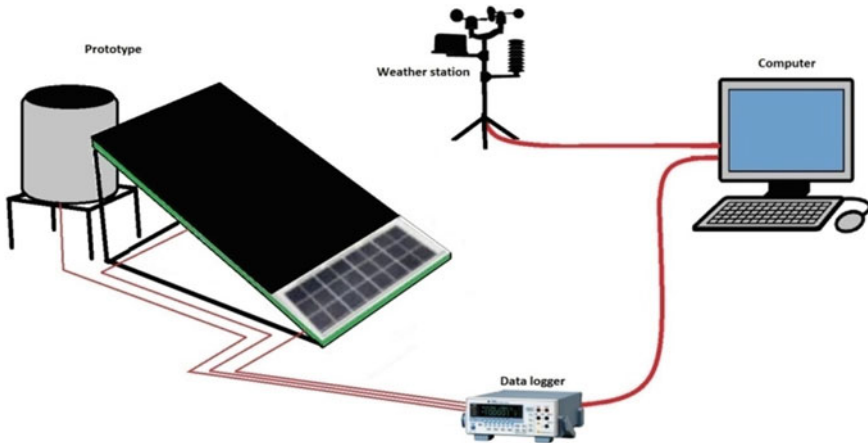


Fig. 4 Data acquisition equipment used in the experimental prototype

4 Results and Discussion

In the beginning, we made an experimental test on the prototype at September with a quarterly heat rate about 23 °C.

In order to assess the performance and effectiveness of the proposed solar thermal collector, the following scenarios and steps have been developed.

- The first step is to test the prototype in typical sun radiation for a full day for heating the water in order to know the level of storage water temperature and the variation in the temperature of the used oil (heat transfer fluid) inside in the thermal collector.
- The second step consists to measure the oil temperature in the inlet and outlet of the thermal collector and comparing the temperature levels reached by the two fluids (Storage water and spent oil), under a typical day and then calculate the thermal efficiency of the prototype thermal collector
- We compare the effectiveness of the system by testing the prototype in two different days with different levels of solar radiation by monitoring the level of effectiveness for each day of measurement

4.1 Evolution of Water and Oil Temperatures

In this step, we carried out the tests on the prototype.

We tested the prototype by experimenting with heating water twice in a day, one in the morning (see Fig. 5) and the afternoon (Fig. 6). This test for order to observe the variation of the temperature of the water compared to oil temperature and this happen by the exchange of heat between them.

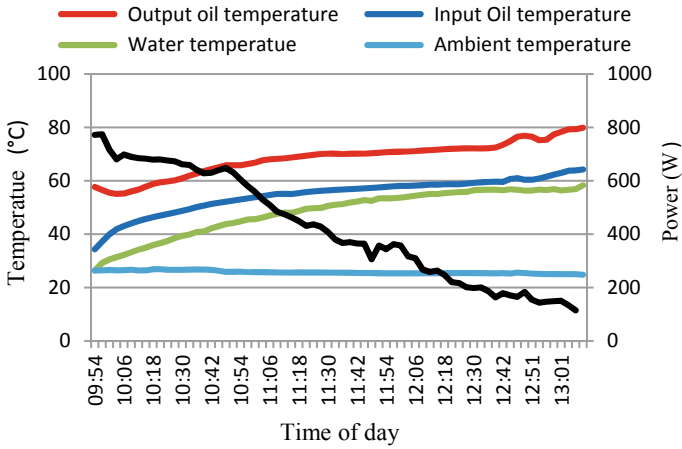


Fig. 5 Temperature compared to the temperature of heat transfer oil in the morning

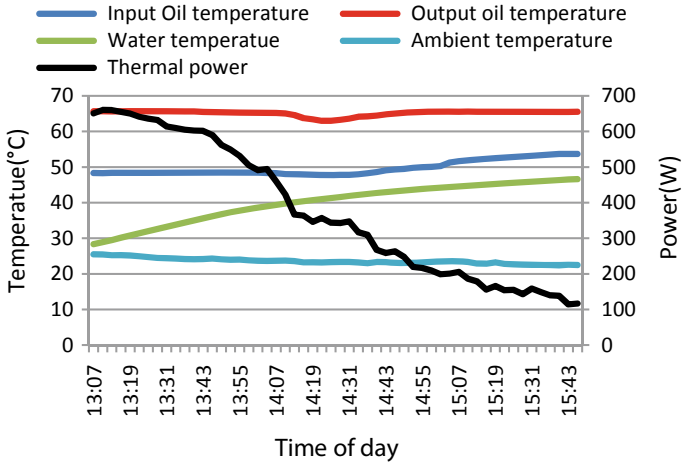


Fig. 6 Water temperature compared to the temperature of heat transfer oil in the afternoon

The observation of the difference between the temperature of the hot oil coming from the thermodynamic sensor to the water (blue Curve) and the temperature of the oil coming out of the water after the exchange heat with water (red curve), see Fig. 5.

As shown in Fig. 5 at 9:54, the oil pump is triggered and the prototype begins to operate. We note that the temperature of the water in the tank (Curve in green) increases in parallel with that of the oil and that the oil (Curve in red) is heated because of the heat absorbed by the sun.

When the oil comes out of the water tank (in blue), its temperature is close to the temperature of the water. We conclude that the oil has to exchange most of its

temperature to water. We also note that the temperature difference between the input oil and the output oil is 14 °C. Where we observe that the thermal power (Curve in black) that the oil gives is increases and reaches 700w maximum. This is due to the large difference between the heat of the water and then the thermal power decreases to 100 W, due to saturation of the system despite the presence of solar radiation.

As shown in Fig. 6 we observe almost the same results obtained in the morning experiment of Fig. 5 with a difference in the temperature of water and oil (the temperature of oil and water in the first experiment is greater than the second) the water temperature has reached to 58 °C and the temperature of oil in the thermal collector output to 80 °C, but regarding in the experiment of Fig. 6, we note that the water temperature does not exceed 46 °C and the temperature of oil 65 °C. This is caused by the power of solar radiation in the period between 10: 00 and 13: 00; of course, the thermal energy is less in the second experiment than the first experiment as observed in (Curve in black) so that it is initially at 650 watts and then decreased rapidly to reach 350 watts within one hour.

From this experience we conclude that the proposed system can be reheat the water for domestic use twice a day and also it is concluded that the used oil, which is used in this system, is the good absorbent solar thermal and good heat transfer fluid.

The average efficiency η (%) of the system of the experiment which detailed in the previous figure (Fig. 7) reach an important value of 65%. To obtain a high temperature of water heating we increase the space of the thermodynamic capture exposed to the sun.

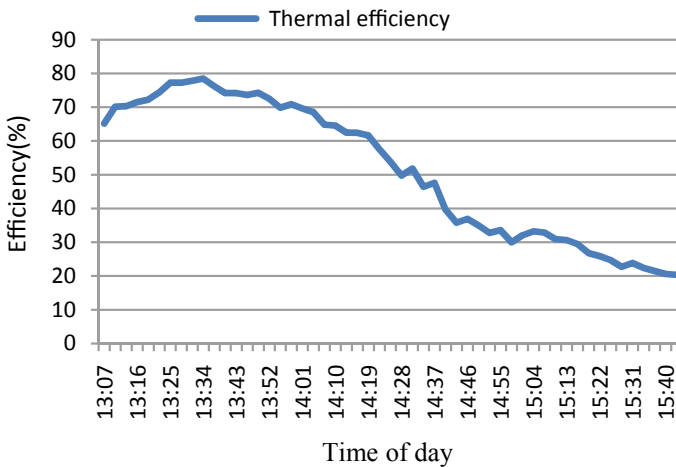


Fig. 7 The evolution of thermal efficiency during the test day

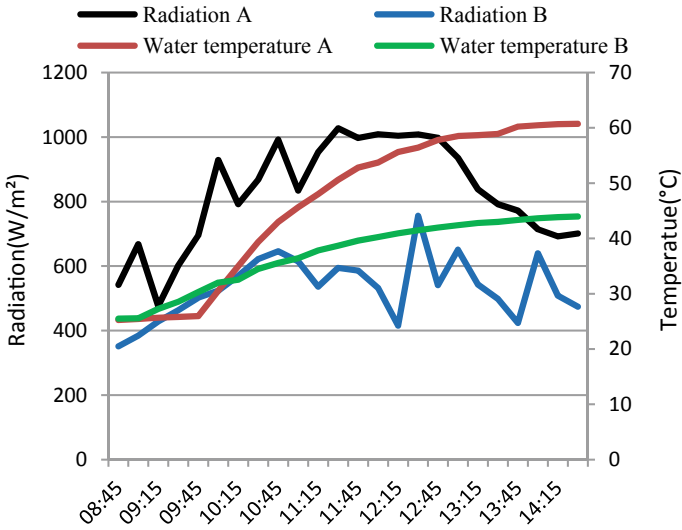


Fig. 8 The variation of water heating temperature for two days: (B) a day with low solar irradiation; (A) a day with high solar irradiation

4.2 Effect of Solar Irradiation on Water Temperature

These measurements allow observing the efficiency of the system in the heating of water through climate change.

Figure 8. shows that the water temperature (red curve) inside the tank in the prototype increases when the solar radiation is large (black curve) and we note that also the value of radiation in the curve exceeds 1000 w/m^2 and the water temperature reached $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

On the other hand, we took the same heating time for another day, when the solar radiation is weak as shown in (blue curve) and its value in the rate of 600 w/m^2 , in addition, note that the temperature of water (green curve) inside the tank does not exceed $43 \text{ }^\circ\text{C}$.

5 Conclusion

In this paper, based on the experimental superficial study reached in this work. A new water heater prototype based on used oil was presented. Several experimental tests were conducted in the city of Tipasa to show the feasibility of this device. Focusing on the thermal collector section of the prototype. The results obtained were so satisfactory that we reached an acceptable heating temperature of $60 \text{ }^\circ\text{C}$ and 65% heating efficiency rate, which is a very acceptable result so this innovative system

can be helpful. In the development of the field of solar heaters and conservation of the environment successfully.

References

1. Sahouane N, Dabou R, Ziane A, Neçaibia A, Bouraiou A, Rouabhia A, Mohammed B (2019) Energy and economic efficiency performance assessment of a 28 kWp photovoltaic grid-connected system under desertic weather conditions in Algerian Sahara. *Renew Energy* 143:1318–1330
2. Bouraiou A, Necaibia A, Boutasseta N, Mekhilef S, Dabou R, Ziane A, Sahouane N, Attoui I, Mostefaoui M, Touaba O (2020) Status of renewable energy potential and utilization in Algeria. *J Clean Prod* 246:119011
3. Boumaaraf B, Boumaaraf H, Slimani ME-A, Tchoketch_Kebir S, Ait-cheikh MS, Touafek K (2020) Performance evaluation of a locally modified PV module to a PV/T solar collector under climatic conditions of semi-arid region. *Math Comput Simul* 167:135–154
4. Sellami R, Amirat M, Mahrane A, Slimani ME-A, Arbane A, Chekrouni R (2019) Experimental and numerical study of a PV/Thermal collector equipped with a PV-assisted air circulation system: configuration suitable for building integration. *Energy Build* 190:216–234
5. Harmim A, Boukar M, Amar M, Haida A (2019) Simulation and experimentation of an integrated collector storage solar water heater designed for integration into building facade. *Energy* 166:59–71
6. Smyth M et al (2019) Experimental performance characterisation of a hybrid photovoltaic/solar thermal façade module compared to a flat integrated collector storage solar water heater module. *Renew Energy* 137:137–143
7. Li B, Zhai X, Cheng X (2018) Experimental and numerical investigation of a solar collector/storage system with composite phase change materials. *Sol Energy* 164:65–76
8. Al-Kayiem HH, Yassen TA (2015) On the natural convection heat transfer in a rectangular passage solar air heater. *Sol Energy* 112:310–318
9. Tewari K, Dev R (2019) Exergy, environmental and economic analysis of modified domestic solar water heater with glass-to-glass PV module. *Energy* 170:1130–1150
10. Garnier C, Muneer T, Currie J (2018) Numerical and empirical evaluation of a novel building integrated collector storage solar water heater. *Renew Energy* 126:281–295
11. Slimani ME-A, Sellami R, Mahrane A, Amirat M (2019) Study of Hybrid Photovoltaic/Thermal Collector Provided With Finned Metal Plates: A Numerical Investigation under Real Operating Conditions. In: 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering, ICAEE 2019, pp 1–6
12. Seddegh S, Wang X, Henderson AD, Xing Z (2015) Solar domestic hot water systems using latent heat energy storage medium: a review. *Renew Sustain Energy Rev* 49:517–533
13. Touaba O, Cheikh MSA, Slimani MEA, Bouraiou A, Ziane A, Necaibia A, Harmim A (2020) Experimental investigation of solar water heater equipped with a solar collector using waste oil as absorber and working fluid. *Solar Energy* 199:630–644
14. Chaouch WB, Khellaf A, Mediani A, Slimani MEA, Loumani A, Hamid A (2018) Experimental investigation of an active direct and indirect solar dryer with sensible heat storage for camel meat drying in Saharan environment. *Sol Energy* 174:328–341
15. Slimani MEA, Amirat M, Bahria S (2015) Study and modeling of heat transfer and energy performance in a hybrid PV/T collector with double passage of Air. *Int. J. Energy a Clean Environ.* 16(1–4):235–245
16. Bahria S, Amirat M, Hamidat A, El Ganaoui M, Slimani M (2016) Parametric study of solar heating and cooling systems in different climates of Algeria – A comparison between conventional and high-energy-performance buildings. *Energy* 113:521–535

17. Slimani ME-A, Sellami R, Mahrane A, Amirat M (2019) Experimental study of a glazed bi-fluid (water/air) solar thermal collector for building integration. In: 2019 international conference on advanced electrical engineering, ICAEE 2019, pp 1–6
18. Hmida A, Chekir N, Laafer A, Slimani MEA, Brahim A B, (2019) Modeling of cold room driven by an absorption refrigerator in the south of Tunisia: A detailed energy and thermodynamic analysis. *J Clean Prod* 211:1239–1249