

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquées
Département de génie mécanique

Mémoire Master

Domaine : Sciences et techniques

Filière : Génie mécanique

Spécialité : Energétique

Présenté par :

REGTI AYMEN

Thème

**Etude d'un chauffe-eau solaire
hybride**

Devant le jury composé de :

Président : M.S Kina	Dr	Université Kasdi Merbah Ouargla
Examineurs : N. Saifi	Pr	Université Kasdi Merbah Ouargla
Encadreur : Z. DERGHOUT	Dr	Université Kasdi Merbah Ouargla

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2024/ 2025





Remerciement

Louange à « ﷻ » ALLAH qui nous a éclairé le chemin de la connaissance et nous a aidés à accomplir ce devoir.

Ce projet n'aurait pas pu voir le jour sans la confiance, la patience et la générosité de notre précieux encadrant, M. Zoheir DERGHOUT, à qui nous adressons nos plus sincères remerciements pour sa gentillesse et sa rigueur.

Nous lui exprimons notre profonde gratitude pour le temps précieux qu'il nous a consacré.

Nous exprimons également notre reconnaissance à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Nous sommes fiers de leur position noble et leur adressons nos remerciements les plus sincères.

À tous ceux qui ont, directement ou indirectement, participé à l'accomplissement de ce modeste travail, nous exprimons notre reconnaissance particulière.

Enfin, nous remercions l'ensemble des directeurs et responsables de la Faculté des Sciences Appliquées, en particulier le département de Génie Mécanique, ainsi que tous les professeurs éminents.

En conclusion, nous tenons à exprimer notre gratitude particulière au Président du jury, Dr M.S Kina, pour ses remarques et ses orientations précieuses, ainsi qu'à l'enseignante examinatrice, Pr N. Saifi, pour son attention et sa contribution constructive à l'évaluation de ce travail.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

Je dédie ce modeste travail à ceux que les mots ne sauraient honorer à leur juste valeur, à ceux dont les vertus sont innombrables : à nos chers parents pour leur soutien moral et matériel. Sans eux, nous n'aurions jamais atteint ce niveau de connaissance et de compréhension.

À ma mère,

À celle qui a tout supporté sans jamais me faire ressentir la moindre douleur, je souhaite que ce mémoire soit le témoin de ma gratitude et de mon amour pour tous les sacrifices, l'amour profond et la tendresse indescriptible qu'elle m'a prodigués pour me voir réussir.

À mon père,

À cet homme à qui je dois ma réussite, mon bonheur et tout mon respect ; puisse-t-il trouver dans ce travail l'expression de mon amour et de ma reconnaissance pour tous les sacrifices qu'il a consentis pour moi.

À mes frères,

À mes chers frères : Walid, Abdelhak, Tahar, Fares, Hamza, ainsi qu'à mes chères sœurs.

Je tiens également à mentionner mes amis : Abdennour, Abdelhak, Yacoub, Hichem, Ahmed et Abderrahmane, ainsi que tous mes frères et amis, en leur souhaitant pleine réussite et accomplissement dans leur parcours scolaire et professionnel.

*Sans oublier notre cher et respecté enseignant : **Zoheir Derghout.***

Sommaire	
Remerciement	I
Dédicace	II
Sommaire	III
Liste des figures	IV
Liste des Tableaux	V
Résumé	VI
Introduction général	VII

Chapitre I.1.Aspects positifs des études	8
I.1.1. Introduction	8
I.1.2. Innovation et technologies modernes	8
I.1.3. Définition de critères optimaux	8
I.1.4. Comparaisons économiques	8
I.1.5. Utilisation de modélisation et de simulation	8
I.1.6. Résultats applicables directement	8
I.1.7. Développement d'outils d'aide à la décision	9
I.1.8. Focus sur l'intégration des systèmes	9
I.1.9. Résultats quantifiables	9
I.1.10. Points forts marquants	9
I.2. Critique générale	9
I.2.1. Méthodologies et détails techniques	9
I.2.2. Comparaison avec les systèmes traditionnels	9
I.2.3. Détails expérimentaux	10
I.2.4. Application pratique	10
I.2.5. Innovation et nouvelles technologies	10
I.2.6. Résultats et conclusions	10
I.2.8. Documentation et références	10
Chapitre II Chauffe-eau solaire hybride	12
II. Introduction	13
II.1. Définition chauffe-eau-solaire	13
II.2. Types de chauffe-eau-solaire	14
II.2.1. CESI à thermosiphon	14

II.2.2. À circulation forcée.....	15
Les capteurs solaires thermiques	16
II.2.3. Types de capteurs solaires thermique	16
II.2.3.a. Capteur plan vitré.....	16
Les capteurs plans non vitrés.....	17
II.2.3.b. Capteurs à tube sous vide.....	17
II.3. Chauffe-eau solaire hybride	18
II.3.1. composants du chauffe-eau solaire hybride	18
II.4.1.1 capteurs solaire hybride.....	18
II.4.1.2. Réservoir de stockage.....	23
II.4.1.3. Les échangeurs de chaleur	23
II.4.1.4. Systèmes de contrôle.....	24
Chapitre III Modélisation Mathématique	26
III.1. Introduction.....	27
III.2. Théories de transfert de chaleur.....	27
III. 1.A. Conduction.....	27
III.1.B.Rayonnement.....	28
III.1. Convection	28
III.3. Modèle mathématique thermique.....	29
III.3.1. Bilan énergétique du capteur hybride PVT	29
III.4. Modèle thermique d'un capteur hybride	30
III.5. Modèle mathématique électrique.....	35
III.6. Conclusion	36
Chapitre IV Résultats et discussions	37
IV.1. Introduction	38
IV.2. Organigramme chauffe-eau solaire hybride.....	39
IV.3. Organigramme chauffe-eau-solaire.....	40
IV.4. Caractéristiques du modèle PVT	41
IV.5. Caractéristiques du panneau photovoltaïque PV	42
.6. Températures T_a du 15 de chaque mois - Ouargla 2024.....	43
IV.7. Valeurs du rayonnement solaire au cours de l'année Ouargla 2024	43
IV.8. Variation du rayonnement global.....	44
IV.9. La variation de la température ambiante	45
IV.10. Comparaison de l'énergie utile pour le chauffage de l'eau par les chauffe-eau solaires classiques et hybrides à Ouargla – 2024	46
IV.11. Variation de la température de sortie de l'eau dans les chauffe-eau solaires à	

Ouargla au cours de l'année 2024	47
IV.12. Comparaison de l'efficacité des chauffe-eau solaires hybrides et classiques dans la production d'énergie Ouargla – 2024.....	48
IV.13. Comparaison mensuelle des performances du chauffe-eau solaire.	
IV.14.1.Comparaison de l'énergie thermique utile (Qu)	49
IV.14.3.Comparaison de l'efficacité thermique (η_{th}).....	50
IV.14.4.Comparaison de l'efficacité global	51
IV.15. Améliorations du système PV/T.....	52
IV.15. 1.Modification du débit d'eau.....	52
IV.15. 2. Modifier la valeur du facteur d'efficacité du capteur solaire.....	54
IV.15. 2.1Méthodes pour augmenter le facteur d'efficacité du capteur solaire F'.....	55
IV.16. Conclusion	56

Liste des Figures

<u>Figure II.1 :chauffe-eau domestique</u>	13
<u>Figure II.2. (a):CES thermosiphon Monobloc</u>	14
<u>Figure II.3. (b) :CES thermosiphons à éléments séparés</u>	15
<u>Figure II.4 :Le chauffe-eau solaire à circulation forcée</u>	15
<u>Figure II. 5 : Capteur solaire thermique</u>	16
<u>Figure II.6:Capteursplan vitré.</u>	16
<u>FigureII.7 :Capteurs plan non vitré.</u>	17
<u>FigureII.8 : Capteurs à tube sous vide.</u>	18
<u>Figure II.9: Schéma d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.</u>	19
<u>Figure II.10 : Classification des capteurs hybrides PV/T.</u>	20
<u>Figure II.11 :Capteur solaire hybride à eau</u>	21
<u>Figure II.12 : Modules hybrides PVT à eau commercialisés</u>	21
<u>Figure II.13 : Les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PV/T à air</u>	22
<u>Figure II.14:Capteur solaire hybride PV/T à concentration.</u>	22
<u>FigureII.15 : Cuve de stockage avec échangeur</u>	23
<u>FigureII.16 :Exemples d'échangeur de chaleur serpentin.</u>	24
<u>Figure III.17.Schéma électrique équivalent du capteur hybride</u>	30
<u>Figure III.18.Modèle d'un capteur hybride PVT.</u>	30
<u>Figure III.19:Coupe perpendiculaires d'un capteur PV/T hybride à eau</u>	33

<u>Figure III.20 :Schéma de distribution de puissance</u>	33
<u>Figure III.21 : la pompe utilisée dans l'étude</u>	38
<u>Figure IV.22 :La courbe Températures Ta du 15 de chaque mois - Ouargla 2024]</u>	43
<u>Figure IV.23 : La courbe valeurs du rayonnement solaire au cours de l'année Ouargla 2024</u>	43
<u>Figure IV.24: Variation temporelle du rayonnement solaire-Ouargla 2024</u>	44
<u>Figure IV.25 : Variation temporelle des températures-Ouargla 2024</u>	45
<u>Figure IV.26:Analyse quantitative mensuelle de la production d'énergie thermique</u>	46
<u>Figure IV.27:Températures de l'eau de sortie des chauffe-eau solaires à Ouargla – 2024</u>	47
<u>Figure IV.28:Analyse mensuelle des performances du chauffe-eau solaire durant l'année 2024</u>	48
<u>Figure IV.29:La courbe de Comparaison de l'énergie thermique utile (Qu)</u>	49
<u>Figure IV.30:Comparaison de température de sortie de l'eau</u>	50
<u>Figure IV.31: La courbe de Comparaison de l'efficacité thermique (η_{th})</u>	50
<u>Figure IV.32:Comparaison de l'efficacité global</u>	51
<u>Figure IV. 33 : Comparaison de l'efficacité électrique entre PV et PVT</u>	52
<u>Figure IV.34: Modification du FR en fonction du débit d'eau</u>	54
<u>Figure IV 35: Effet de le facteur d'efficacité du capteur solaire sur l'efficacité du système solaireFR</u>	54
<u>Figure IV.36:L'effet de l'augmentation du diamètre des tubes sur l'efficacité du capteur solaire F'</u>	55

Liste des Tableaux

<u>Tableau II.1:Tableau représentant les sous-composants d'un chauffe-eau solaire</u>	25
<u>Tableau IV.2 : Caractéristiques du Capteur PV/T étudié</u>	41
<u>Tableau IV.3 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque PV étudié</u>	42

الملخص:

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة وتحليل أداء سخان ماء شمسي هجين يجمع بين المجمع الحراري واللاقط الكهروضوئي، في مناخ صحراوي يتميز بارتفاع الإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط. تم اعتماد نمذجة و محاكاة عددية لتمثيل أداء النظام في هذه الظروف، وتقييم فعاليته في توفير الماء الساخن.

ركزت الدراسة على تأثير بعض المعايير التصميمية، حيث تم اقتراح تحسينين أساسيين: زيادة معدل التدفق وتكبير قطر الأنابيب. وقد أظهرت النتائج أن زيادة التدفق لاتباهم فقط في تحسين نقل الحرارة وتقليل الخسائر الحرارية، بل تلعب دوراً مهمًا في تبريد سطح المجمع الكهروضوئي، مما يساعد على الحفاظ على كفاءته الكهربائية التي تنخفض عادة مع ارتفاع درجة الحرارة.

تُبرز هذه النتائج أهمية التعديلات البسيطة في تحسين أداء الأنظمة الشمسية الهجينة وجعلها أكثر ملائمة لظروف المناطق الصحراوية.

الكلمات المفتاحية: سخان ماء شمسي هجين، المجمع الكهروضوئي، الإشعاع الشمسي، الأنظمة الشمسية الهجينة.

Résumé :

Ce mémoire porte sur l'étude et l'analyse des performances d'un chauffe-eau solaire hybride combinant un capteur thermique et lecapteurphotovoltaïque, dans un climat désertique caractérisé par une forte irradiation solaire et une température ambiante élevée. Une modélisation et une simulation numérique ont été réalisées pour évaluer la performance du système dans ces conditions.

L'étude s'est concentrée sur deux améliorations principales : l'augmentation du débit et l'élargissement du diamètre des tuyaux. Les résultats ont montré que l'augmentation du débit permet non seulement d'améliorer le transfert thermique et de réduire les pertes, mais aussi de refroidir la surface des panneaux photovoltaïques, contribuant ainsi à maintenir leur rendement électrique, qui tend à diminuer avec la température.

Ces résultats soulignent l'importance de simples ajustements techniques pour améliorer l'efficacité des systèmes solaires hybrides dans les environnements désertiques.

Les Mots Clé : Chauffe-eau solaire hybride, capteur photovoltaïque, rayonnement solaire, systèmes solaires hybrides.

Abstract:

This thesis focuses on the study and analysis of a hybrid solar water heater that combines a thermal collector and photovoltaic collector, operating under desert climate conditions characterized by high solar radiation and ambient temperature. Numerical modeling and simulation were used to evaluate the system's performance in such an environment.

The study proposed two main improvements: increasing the flow rate and enlarging the pipe diameter. Results showed that increasing the flow rate not only enhances heat transfer and reduces thermal losses, but also plays a key role in cooling the surface of the photovoltaic panels, thereby maintaining their electrical efficiency, which usually drops as temperature rises

These findings highlight how simple technical adjustments can significantly improve the performance of hybrid solar systems in desert regions.

Keywords: Chauffe-eau solaire hybride, photovoltaic capteur, solar rayonnement, hybrid solar systems.

Liste des symboles

Q: Est le flux de chaleur transmis par conduction [W]

λ : Conductivité thermique [W/m K]

A: Surface [m²]

$\frac{dT}{dx}$: La variation de la température en ce qui concerne la longueur du chemin de transfert de chaleur. [K /m]

Q_T: Énergie de chaleur transmis par rayonnement [W]

ε : Emissivité du verre

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en (W/m² K⁴)

h : Coefficient d'échange par convection avec l'ambient [W/m² K]

T_s ou T : Température de sortie du fluide [K]

Q_{su} : L'énergie solaire thermique absorbée par le capteur [W]

A: Surface du verre [m²].

G ou I_T : rayonnement totale absorbée par la cellule solaire [W/m²]

τ_v : Coefficient de transmission de la vitre

α_c : Coefficient d'absorption de la cellule solaire.

Q_{rv-} : Flux de chaleur échangé par rayonnement [W]

T_{ciel} : La température du ciel [K]

T_v : Température de la vitre du capteur [K]

Q_{cv-} : Flux de chaleur échangé par convection [W]

h_{c-a} : Coefficient de transfert convective [W/m².K]

T_a : Température ambient [K]

($\alpha\tau$)_{eff}: est la fraction optique efficace de l'énergie absorbée

A_c : la surface du capteur. [m²]

Q₀ : Le taux de perte de chaleur [W]

U_L: le coefficient de perte de chaleur [W/K.m²]

Q_r : L'énergie gagnée par l'absorbeur [W]

Q_u : le taux d'énergie utile extrait par le capteur [W]

T_i : Température d'entrée du fluide [K]

m: Débit massique [Kg/s]

cp:Chaleur spécifique de l'eau [J/kg.K]

FR: Facteur d'extraction de la chaleur du collecteur

F' : L'efficacité corrigée de l'ailette

D_{ext} : Diamètre extérieur [m]

D_i : Diamètre intérieur [m]

C_b : La conductance de liaison

h_f : Coefficient de transfert de chaleur du fluide [$W/m^2 K$]

δ : Épaisseur de la plaque absorbante [m]

K : Conductivité thermique des plaques [$W/m K$]

η_{th} : Rendement thermique

η_{el} : Rendement électrique

η_{OA} : Rendement global

P_m : La puissance électrique maximale

γ : le coefficient de température de la puissance maximale

T_{PV} : La température du module **PV**. [C°]

NOCT : Température des cellules photovoltaïques dans conditions standard [C°]

η_0 : Le rendement nominal sous les conditions standards

V_{mp} : Max. voltage

I_{mp} : Max. le courant.

Q_e : La puissance électrique est calculée selon l'expression suivante [W]

Introduction générale

L'énergie est essentielle à l'existence humaine et a joué un rôle clé dans le développement des populations au fil de l'histoire. Avec l'augmentation attendue du nombre d'habitants et de logements, principaux facteurs de la consommation énergétique dans le secteur résidentiel, la demande ne cesse de croître. Actuellement, la majeure partie de l'énergie consommée provient de combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel). Or, les projections indiquent que leur utilisation excessive entraînera l'épuisement total de ces réserves. Ce déséquilibre entre l'offre et la demande pourrait s'aggraver, d'où une attention accrue portée aux énergies renouvelables pour réduire la dépendance aux ressources fossiles.

Cette transition est d'autant plus cruciale que, selon les estimations, le monde pourrait atteindre la limite des réserves estimées (en gigatonnes d'équivalent pétrole, Gtep) d'ici 2050. Réduire la consommation d'énergie dans les bâtiments constitue l'un des enjeux majeurs du 21^e siècle. En Algérie, par exemple, le secteur résidentiel représente à lui seul 40 % de la consommation totale d'électricité.

Les énergies renouvelables constituent une solution adaptée à la protection de l'environnement et s'avèrent économiquement viables, notamment dans les régions dotées de bonnes ressources comme l'Algérie, où coexistent production conventionnelle et abondance de soleil et de vent.

Le soleil, source d'énergie inépuisable, se manifeste sous deux formes :

Photovoltaïque : le système convertit directement la lumière en électricité via des cellules solaires.

Thermique : l'énergie solaire est transformée en chaleur par des capteurs thermiques.

L'exploitation directe de l'énergie solaire via des capteurs repose sur deux technologies distinctes : les systèmes solaires thermiques et les systèmes photovoltaïques. Ces technologies ont conduit à l'émergence de systèmes hybrides, combinant différentes sources d'énergie pour optimiser la production énergétique. Parmi ces systèmes, ce travail se concentre sur le capteur solaire hybride photovoltaïque-thermique (PV/T), couramment appelé "capteur PV/T".

Introduction générale

Lors de la conversion photovoltaïque, le capteur solaire génère de la chaleur. En effet, une partie du rayonnement solaire n'est pas convertie en électricité par les cellules photovoltaïques, ce qui provoque leur échauffement. Or, cette augmentation de température réduit le rendement des cellules. Initialement perçue comme un inconvénient, cette chaleur a inspiré une innovation : combiner le système photovoltaïque à un système thermique pour former le capteur hybride PV/T. Ce dernier produit à la fois de l'électricité (via les cellules photovoltaïques) et de la chaleur (via le système thermique).

Il est même possible d'observer une amélioration du rendement électrique du capteur hybride PV-T avec l'intensité croissante du rayonnement solaire, à condition qu'un système d'extraction de chaleur soit mis en place pour refroidir les cellules. Dans le cadre de ce travail, nous avons étudié un chauffe-eau solaire hybride, réparti en quatre chapitres principaux. Le premier chapitre est consacré à une revue de plusieurs études antérieures en lien avec notre sujet, ce qui nous a permis d'acquérir une base scientifique et technique solide. Le deuxième chapitre propose une analyse détaillée du chauffe-eau solaire hybride, en abordant sa définition, son principe de fonctionnement ainsi que ses composants essentiels.

Le troisième chapitre est consacré à l'élaboration du modèle mathématique du chauffe-eau solaire hybride. Les équations fondamentales décrivant le comportement thermique et électrique du système y sont développées, en s'appuyant sur des hypothèses et des données adaptées pour une représentation précise.

Enfin, le quatrième chapitre est dédié à la présentation et à l'analyse des résultats obtenus. Il comprend une comparaison des performances entre le modèle hybride et le modèle classique dans la région de Ouargla. Les calculs nécessaires à cette comparaison ont été réalisés à l'aide du logiciel MATLAB, dans le but d'évaluer l'efficacité de chaque modèle dans les conditions climatiques locales.

Chapitre I

Étude

Bibliographique

Introduction :

Ce chapitre présente les principaux avantages des études sur les systèmes énergétiques hybrides, notamment l'innovation technologique, l'optimisation économique, et l'usage de la modélisation. Il met aussi en valeur l'intégration des systèmes et les résultats quantifiables. Une seconde partie propose une critique générale des méthodes utilisées, des comparaisons faites, et de l'applicabilité des résultats.

HADRI et al [1] ont étudié le dimensionnement d'un chauffe-eau solaire. La méthodologie adoptée repose sur des calculs techniques détaillés, utilisant des équations de dimensionnement et des outils de simulation pour évaluer les besoins énergétiques et optimiser les composants du système. Les résultats obtenus montrent qu'un système photovoltaïque nécessite 15 modules solaires et 16 batteries, tandis qu'un système thermique requiert trois capteurs solaires pour couvrir les besoins en eau chaude d'une famille de six personnes avec une consommation quotidienne de 960 litres.

MOULAI et al [2] porte sur l'optimisation d'un chauffe-eau solaire pour la réhydratation des dattes sèches de type Deglet-Nour. La méthode proposée repose sur l'utilisation d'un système fonctionnant à 100% à l'énergie solaire, intégrant un prototype innovant utilisant un matériau à changement de phase (paraffine) intégré dans un échangeur de chaleur à tube en spirale. Les résultats ont montré que la température optimale pour la réhydratation est de 50°C, avec les meilleures performances obtenues grâce à un séchoir solaire à parois d'argile, offrant ainsi une solution efficace et économique par rapport aux méthodes traditionnelles.

TEMACINI et al [3] traite de l'optimisation du stockage d'énergie dans un chauffe-eau solaire. La méthode employée repose sur des essais expérimentaux et les résultats ont montré que l'utilisation de la paraffine améliore l'efficacité du stockage thermique..

MEHRAZI al [4] traite de l'influence du puisage sur un chauffe-eau solaire individuel alimentant un espace à usage de bureau. La méthode adoptée repose sur des simulations effectuées avec le logiciel Transol en variant les profils de puisage. Les résultats ont montré une relation inverse entre la fraction solaire et les besoins quotidiens en eau chaude, confirmant que l'utilisation du système solaire permet de réduire significativement la consommation d'énergie d'appoint..

Chapitre I : Étude Bibliographique

Sekher et al [5] ont fait une étude sur les performances thermiques d'un système de chauffage solaire de l'eau. La méthodologie adoptée repose sur des tests expérimentaux, incluant la variation de l'angle d'inclinaison, du débit massique et des configurations en série ou parallèle. Les résultats obtenus montrent que l'angle d'inclinaison optimal est de $40,60^\circ$, le débit massique optimal est de 1 kg/min, et la configuration en série offre de meilleures performances en hiver tandis que celle en parallèle est plus efficace en été..

SAIDI et al [6] on fait une étude d'une installation de production d'eau chaude en utilisant différents systèmes d'appoint. La méthodologie repose sur des simulations réalisées avec le logiciel "T*SOL", permettant de dimensionner et d'optimiser le système. Les résultats

obtenus indiquent que pour obtenir des performances énergétiques similaires, l'utilisation d'une chaudière à gaz (puissance de 50 kW) s'avère plus économique qu'une résistance électrique (puissance de 1,8 kW) .

Zaboubi I [7] a fait une étude "technico-économique d'une installation de chauffage solaire". La méthodologie repose sur le calcul des besoins énergétiques, le dimensionnement des équipements et la comparaison entre un système classique et un système solaire en termes de coûts. Les résultats obtenus indiquent que le système solaire présente des économies importantes à long terme malgré un investissement initial plus élevé, avec une durée d'amortissement raisonnable..

Gama et al [8] , ont fait une étude conception et réalisation d'un chauffe-eau solaire avec une analyse technico-économique. La méthodologie repose sur la création d'un logiciel de dimensionnement permettant de gérer divers types d'installations (individuelles ou collectives) et d'estimer les coûts et le temps d'amortissement. Les résultats obtenus montrent que le logiciel développé est fiable et permet une estimation précise des performances et du coût des installations solaires, contribuant ainsi à la production d'énergie avec un coût réduit.

CHEBOUAT et al [9] étudient "la sensibilité des capteurs solaires plats pour différents paramètres thermomécaniques". La méthodologie repose sur la modélisation dynamique du capteur solaire à l'aide de la méthode des différences finies pour évaluer les échanges thermiques et les performances énergétiques sous un climat semi-aride. Les résultats montrent qu'un capteur solaire plan à simple vitrage avec un absorbeur en cuivre assure une bonne adaptation thermique et un rendement élevé, supérieur aux autres types de combinaisons étudiées.

ATBA [10] étudient " l'effet de l'utilisation des panneaux solaires hybrides PV/T sur les comportements thermiques et cinétiques de l'air séchant utilisé dans un séchoir solaire indirect". La méthodologie repose sur une simulation numérique réalisée à l'aide du logiciel Fluent pour analyser les flux thermiques et les comportements de l'air.

Les résultats obtenus montrent qu'une augmentation du nombre de Reynolds permet d'accroître la quantité d'air chaud transporté vers la zone de séchage, réduisant ainsi la densité de l'air par effet de surchauffe, ce qui améliore les performances du séchoir solaire.

Zahrouna et al, [11] étudient "la recherche du point maximal de la puissance thermique et électrique d'un système PV/T". La méthodologie repose sur la modélisation mathématique du système PV/T et la résolution des équations différentielles associées à l'aide de la méthode de Runge-Kutta d'ordre 4. Les résultats obtenus indiquent que l'augmentation du débit massique améliore la puissance électrique tout en réduisant la puissance thermique, nécessitant ainsi une optimisation pour atteindre le point optimal de fonctionnement de puissance (OPOP).

Messaoudi [12], porte sur la conception d'une résidence autonome utilisant la géothermie et l'énergie solaire dans le sud algérien. Ce travail de doctorat en Génie Mécanique, spécialité Thermo-Énergétique, propose une solution énergétique durable adaptée aux conditions climatiques du Sud algérien. L'étude s'appuie sur l'intégration de sources d'énergie renouvelable, notamment la géothermie et le solaire, afin d'assurer l'autonomie énergétique d'une habitation. Devant un jury composé de six enseignants-chercheurs.

Khenfer [13], porte sur la contribution au développement et à l'expérimentation d'un collecteur hybride photovoltaïque-thermique dans la zone de Ouargla. Cette thèse de doctorat en Génie Mécanique, option Thermo-Énergétique, explore la conception, l'optimisation et l'expérimentation d'un système PVT adapté aux conditions climatiques du sud algérien. Les travaux visent à améliorer la performance énergétique des installations solaires hybrides à travers une approche expérimentale. Devant un jury composé de six membres spécialisés.

Hayibo [14] traite de la modélisation et la simulation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique (PVT), le travail présente une approche détaillée de modélisation thermique et électrique d'un capteur PVT, en insistant sur la récupération de chaleur générée par les panneaux photovoltaïques. Une analyse numérique a été effectuée pour évaluer l'impact des paramètres environnementaux sur les performances globales du capteur.

Nedjar [15] présente une thèse intitulée « Dimensionnement et optimisation d'un système PVT avec intégration dans le bâtiment pour la production de froid ».

Le travail vise à répondre au besoin croissant de solutions énergétiques durables pour la climatisation des bâtiments en intégrant un système photovoltaïque thermique (PVT) pour la production de froid. L'approche combine la modélisation, l'optimisation énergétique et l'intégration architecturale dans un contexte de performance énergétique globale.

I.1. Aspects positifs des études

I.1.1. Innovation et technologies modernes

Des études se sont démarquées en intégrant des solutions innovantes (comme l'utilisation de matériaux à changement de phase tels que la paraffine, ou le développement de logiciels spécialisés pour la conception), reflétant une volonté d'améliorer l'efficacité des systèmes solaires et de développer des outils pratiques pour soutenir les projets.

I.1.2. Définition de critères optimaux

Des recherches ont fourni des recommandations précieuses sur les paramètres de fonctionnement optimaux (tels qu'un angle d'inclinaison de $40,6^\circ$ et un débit de 1 kg/min), offrant ainsi une base scientifique pour améliorer les performances des systèmes solaires dans des conditions spécifiques.

I.1.3. Comparaisons économiques

Des études ont montré un effort clair pour comparer les coûts entre les systèmes solaires et traditionnels, tout en mettant en avant les avantages économiques à long terme de l'énergie solaire malgré le coût initial élevé.

I.1.4. Utilisation de modélisation et de simulation

Des recherches ont utilisé des outils de simulation avancés (tels que Transol et Fluent), démontrant une précision dans l'analyse des données et une capacité à prédire les performances des systèmes sous diverses conditions.

I.1.5. Résultats applicables directement

L'étude a proposé une solution pratique pour améliorer le séchage des dattes grâce à l'énergie solaire, tandis que l'étude [10] a clarifié l'impact de l'optimisation du flux d'air sur l'efficacité des séchoirs solaires, renforçant ainsi les applications agricoles et industrielles.

I.1.6. Développement d'outils d'aide à la décision

L'étude a réussi à concevoir un logiciel pour analyser la faisabilité technique et économique des systèmes de chauffage solaire, facilitant la planification de projets à petite et grande échelle.

I.1.7. Focus sur l'intégration des systèmes

L'étude a exploré l'optimisation des performances combinées des systèmes hybrides (PV/T), en identifiant la relation entre l'énergie thermique et électrique, ouvrant ainsi des perspectives pour la conception de systèmes polyvalents.

I.1.8. Résultats quantifiables

La plupart des études ont présenté des résultats numériques précis (comme le nombre de panneaux, les températures optimales), contribuant à la création d'une base de données de référence pour les ingénieurs en énergie solaire.

I.1.9. Points forts marquants

- L'engagement de nombreuses recherches envers une méthodologie scientifique combinant calculs théoriques et expérimentations pratiques.
- Un accent clair sur des solutions durables et économes en énergie dans divers domaines (résidentiel, agricole, industriel).
- Des efforts notables dans le développement de modèles mathématiques et de techniques de simulation pour approfondir la compréhension technique.

I.2. Critique générale

I.2.1. Méthodologies et détails techniques

Certaines études manquent de clarté dans la description des méthodologies adoptées, comme les conditions climatiques ou les critères utilisés dans les calculs, cela affaiblit la possibilité de généraliser ou d'appliquer les résultats dans différents contextes. Par exemple, mentionner « 15 panneaux solaires » sans spécifier leur capacité ou leur emplacement réduit l'utilité pratique .

I.2.2. Comparaison avec les systèmes traditionnels

Certaines recherches ont comparé les coûts entre systèmes solaires et traditionnels, mais ont ignoré des facteurs tels que les coûts de maintenance ou la durée de vie des équipements, ce qui peut fausser les résultats.

I.2.3. Détails expérimentaux

Des études se sont appuyées sur des résultats expérimentaux ou des simulations, mais n'ont pas suffisamment expliqué le contrôle des variables externes (comme l'humidité ou le vent), ce qui soulève des questions sur la fiabilité des données.

I.2.4. Application pratique

Bien que certaines recherches aient indiqué des critères optimaux (l'angle d'inclinaison ou le débit), elles n'ont pas fourni de recommandations pratiques pour adapter ces critères à divers climats, limitant ainsi leur utilité pour les ingénieurs.

I.2.5. Innovation et nouvelles technologies

Des études se sont distinguées par l'intégration de technologies innovantes (comme la paraffine ou des logiciels de conception), mais n'ont pas discuté des défis pratiques (coûts des matériaux ou difficulté de maintenance), ce qui réduit leur applicabilité réelle.

Conclusions

Certaines études se sont concentrées sur des résultats spécifiques (efficacité des capteurs solaires) sans les comparer à des normes internationales ou à des travaux antérieurs, rendant difficile l'évaluation de leur performance relative.

Chapitre II

Chauffe-eau solaire hybride

II. Introduction

De nombreuses recherches ont été publiées dans la littérature sur les recherches expérimentales pour trouver une meilleure conception des systèmes de chauffe-eau solaires.

De nombreuses tentatives théoriques et expérimentales ont été faites pour améliorer les performances au cours des dernières décennies. Plusieurs modifications opérationnelles et de conception ont été apportées pour améliorer ces performances par de nombreux chercheurs au fil des années. Le chauffage solaire de l'eau est l'un des processus qui peut être utilisé pour chauffer de l'eau pour un usage quotidien sans émission de gaz à effet de serre. [5]

II.1. Définition chauffe-eau-solaire

C'est un dispositif qui utilise l'énergie solaire pour chauffer l'eau destinée à un usage domestique ou commercial. Ce système utilise des panneaux solaires, également appelés collecteurs solaires, pour capter la chaleur du soleil et la transférer à un fluide caloporteur, généralement un liquide comme l'eau ou un mélange eau-glycol. Ce fluide est ensuite utilisé pour chauffer l'eau stockée dans un réservoir de stockage. [2]

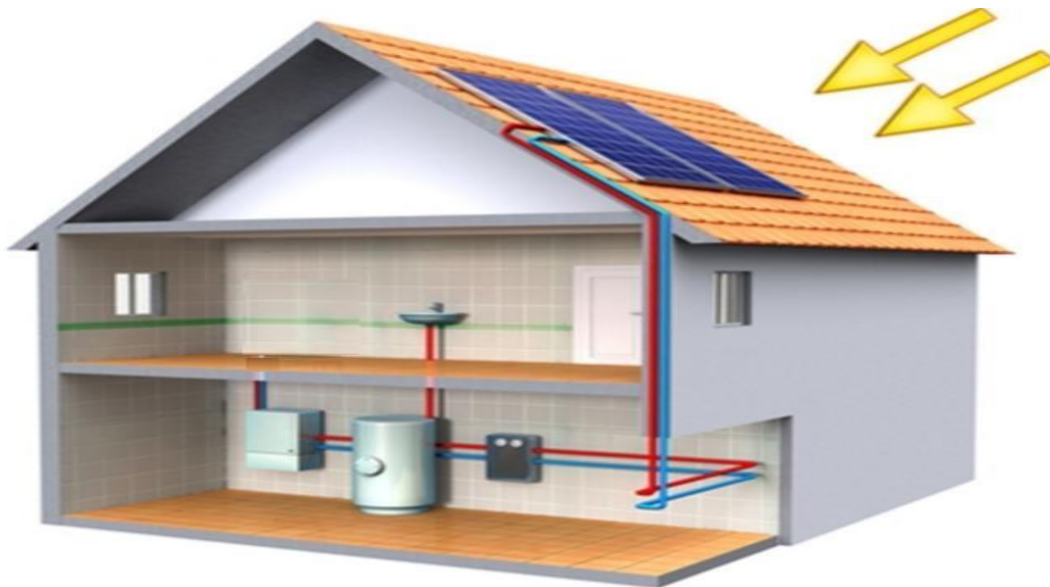


Figure II.1 : chauffe-eau domestique [1]

II.2. Types de chauffe-eau solaire

II.3. II.2.1. CESI thermosiphon

Sous l'effet d'un rayonnement solaire, l'eau contenue dans le capteur s'échauffe et sa densité diminue, selon le principe de gravitation elle s'élève dans le circuit et elle est remplacée par de l'eau plus froide (et donc plus lourde) en provenance du ballon. C'est l'effet thermosiphon. Pour que la circulation du fluide dans le circuit soit assurée, le ballon de stockage doit être obligatoirement placé plus haut que les capteurs selon une hauteur prédéfinie.

Les avantages d'un CES à thermosiphon sont :

- Il ne comporte pas de pompes ni de régulation, et ne nécessite pas de raccordement un réseau électrique.

Selon la disposition du ballon de stockage par rapport aux capteurs on distingue les CESI thermosiphon Monobloc et les CESI thermosiphon à éléments séparés, figure (a-b). [28]

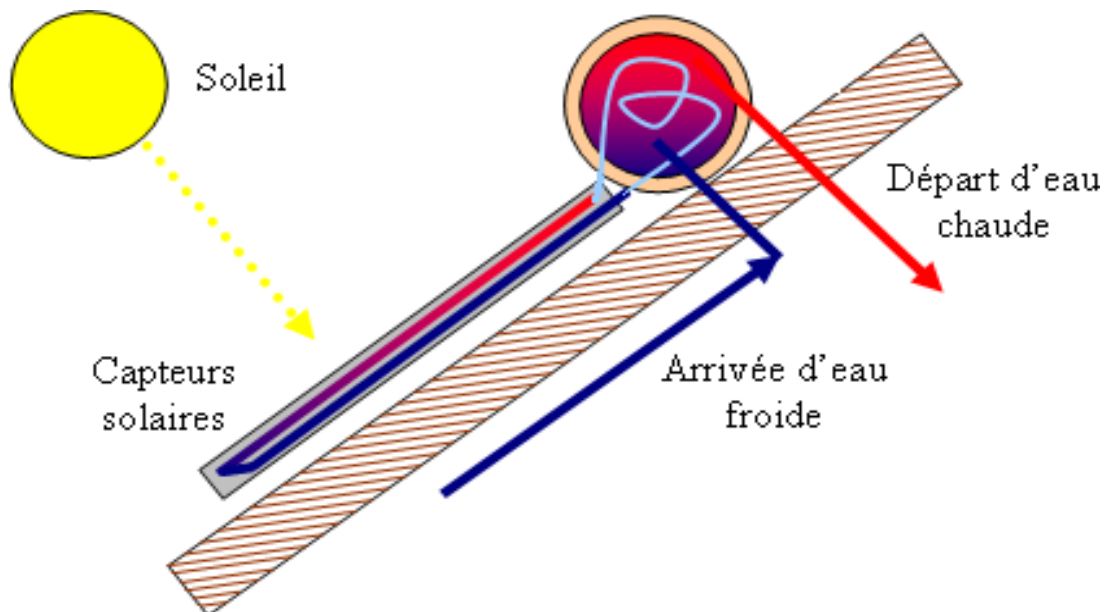


Figure II.2. (a): CES thermosiphon Monobloc [8]

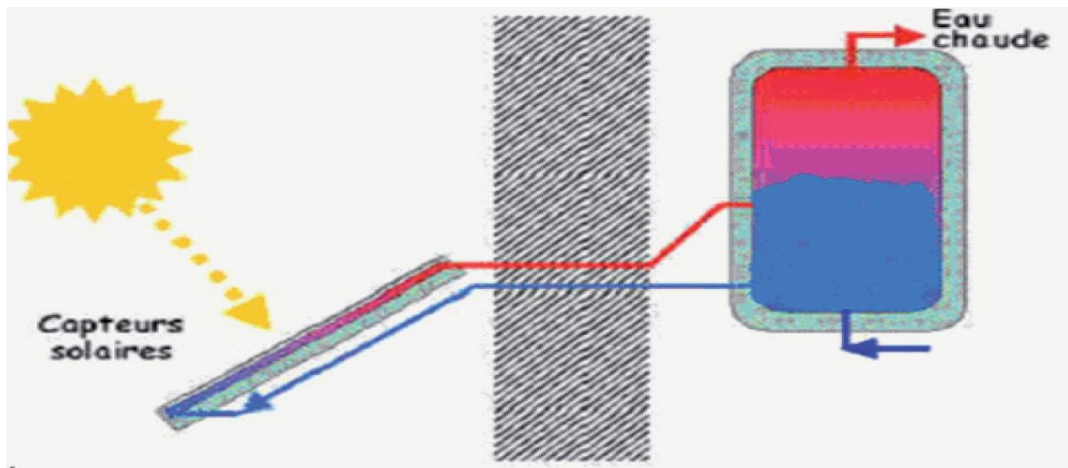


Figure II.3. (b) : CES thermosiphons à éléments séparés [31]

II.2.2. À circulation forcée

Ce type de chauffe eau solaire "avec pompe et régulation" (Figure 4), est adapté à toutes les différentes configurations. Ainsi, le ballon peut être installé dans une cave ou éloigné des capteurs. Le coût de ce système est généralement plus cher que celui des systèmes monobloc à cause des équipements supplémentaires, pompe de circulation et système de régulation. [8]

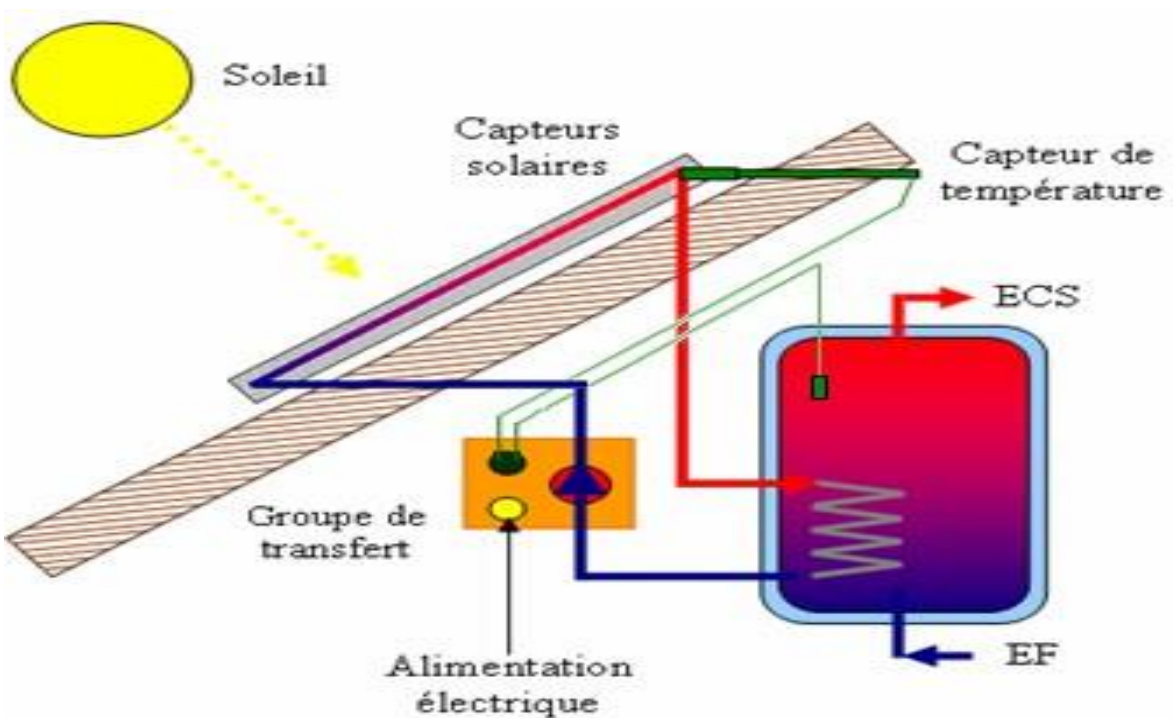


Figure II.4 : Le chauffe-eau solaire à circulation forcée [8]

II.3. Les capteurs solaires thermiques

Le rôle d'un capteur solaire thermique (figure II.5) est de transformer le rayonnement solaire qu'il reçoit en énergie calorifique utilisable, le plus souvent par l'intermédiaire d'un fluide caloporteur (eau, air, ...).[3]

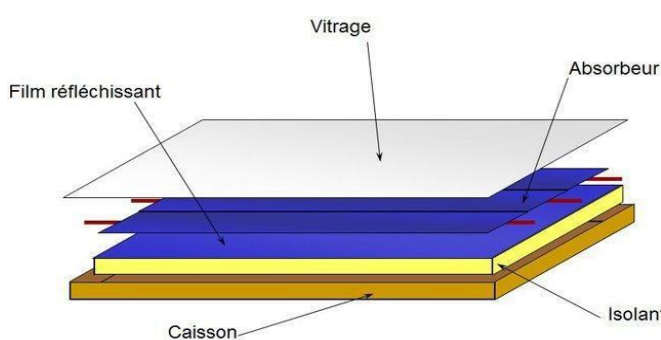


Figure II. 5 : Capteur solaire thermique [3]

II.3.1. Types de capteurs solaires thermique

II.3.1.a. Capteur plan vitré

C'est le modèle le plus répandu. Il est constitué d'une caisse isolée couverte par un vitrage. A l'intérieur est placé l'absorbeur, un serpentin (tuyau ondulé) contenant le fluide à réchauffer. Dans ce genre de modèle, l'absorbeur est protégé contre les déperditions thermiques par un matériau isolant (la plupart du temps, de la laine de roche). La vitre est quant à elle faite de verre trempé très résistant (intempéries, grêle), très transparente et spécialement conçue pour présenter un faible niveau de réflexion afin d'emmagasiner un maximum de chaleur. [6]



II.3.1.b. Les capteurs plans non vitrés

Les capteurs solaires plans vitrés sont très répandus. Ils existent sous formes de capteurs à eau et de capteurs à air.

Ces capteurs conviennent mieux à des applications à température modérée où les températures souhaitées se situent entre 30°C et 70°C. Les capteurs à circulation d'eau sont plus couramment utilisés pour la production de l'eau chaude sanitaire à l'échelle individuelle ou collective, pour un usage industriel, ainsi que pour les piscines intérieures. Les capteurs à air sont utilisés pour le séchage, pour le chauffage des locaux aussi l'air de ventilation. [28]



Figure II.7 : Capteurs plan non vitré. [9]

II.3.1.c. Capteurs à tube sous vide

Les capteurs solaires à tubes sous vide sont des capteurs solaires qui ont une meilleure performance que les capteurs plans pour un fonctionnement à haute température dans l'intervalle de 77 à 170 °C. Ils sont bien adaptés pour les applications de chauffage commercial et industriel.

Le capteur solaire à tubes sous vide est constitué des rangées de tubes de verre parallèles, reliées à un tuyau d'en-tête comme illustre à la figure (II-8). L'air à l'intérieur de chaque tube est retiré et atteint des pressions de vide autour de 10⁻³

mbar. Cela crée des conditions d'isolation élevées pour éliminer les pertes de chaleur par convection et par rayonnement, pour atteindre des températures plus élevées. Ces capteurs sont classés en fonction de leurs nœuds de liaison matériaux ; par exemple verre-métal ou verre-verre et par l'agencement des tubes (concentriques ou tube en U). A l'intérieur de chaque tube nous avons une ailette métallique plane ou incurvée, elle est attachée à un tube de cuivre. L'ailette est revêtue d'un film mince dont les propriétés optiques sélectives permettent d'atteindre une forte absorbance du rayonnement solaire et réduisent les pertes de chaleur par rayonnement [31]



Figure II.8 : Capteurs à tube sous vide. [30]

II.4. Chauffe-eau solaire hybride

II.4.1. Composants du chauffe-eau solaire hybride

II.4.1.1 capteurs solaires hybride

II.4.1.1.1. Définition

Un capteur photovoltaïque thermique (PV/T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, sous forme de chaleur. Le concept consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau, air ou bi-fluide) et selon le type d'absorbeur (plan, concentrateur)[29]

II.4.1.1.2 .Principe de fonctionnement capteur PVT

Un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique est un dispositif qu'associe un capteur solaire plan et un module photovoltaïque permettant de convertir l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique (un capteur solaire plan) et un module PV dans un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit, ainsi augmenter le rendement électrique du module et exploiter deux types d'énergies : électrique et thermique. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïque et thermique) séparément installés. Dans ce type de composant hybride le principe consiste à allier un panneau PV à un système de chauffage thermique. L'échangeur de chaleur est placé sous le module PV pour évacuer la chaleur accumulée à l'arrière du module qui réduit la performance électrique de 0,4 à 0.5 % pour chaque degré Celsius au-dessus de sa température nominale qui est 25 °C. Donc pour maintenir le rendement nominal du module PV Il nous faut donc le refroidir.[16]

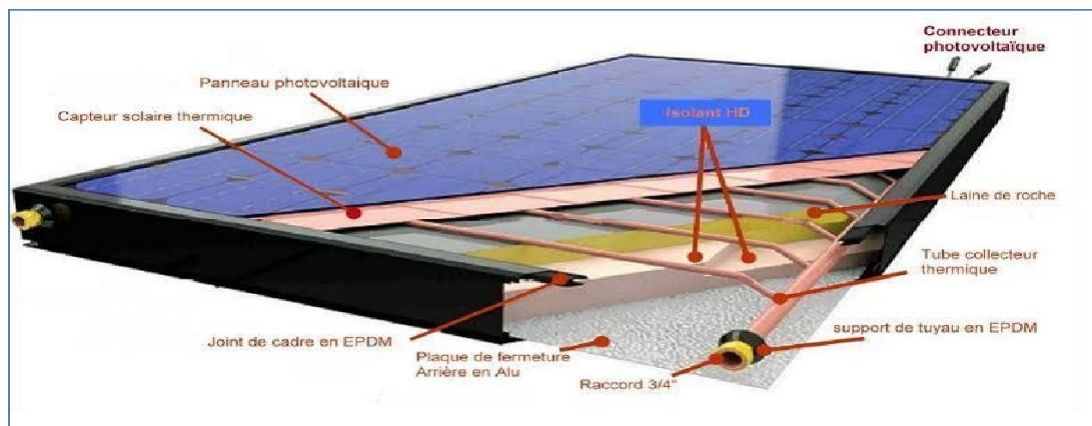


Figure II.9: Schéma d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique.[16]

II.4.1.1.3. Différents types des capteurs solaires hybrides PV/T

On peut classer les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques selon la nature du fluide utile ; les capteurs hybride à air et les capteurs hybride à fluide caloporteur liquide.

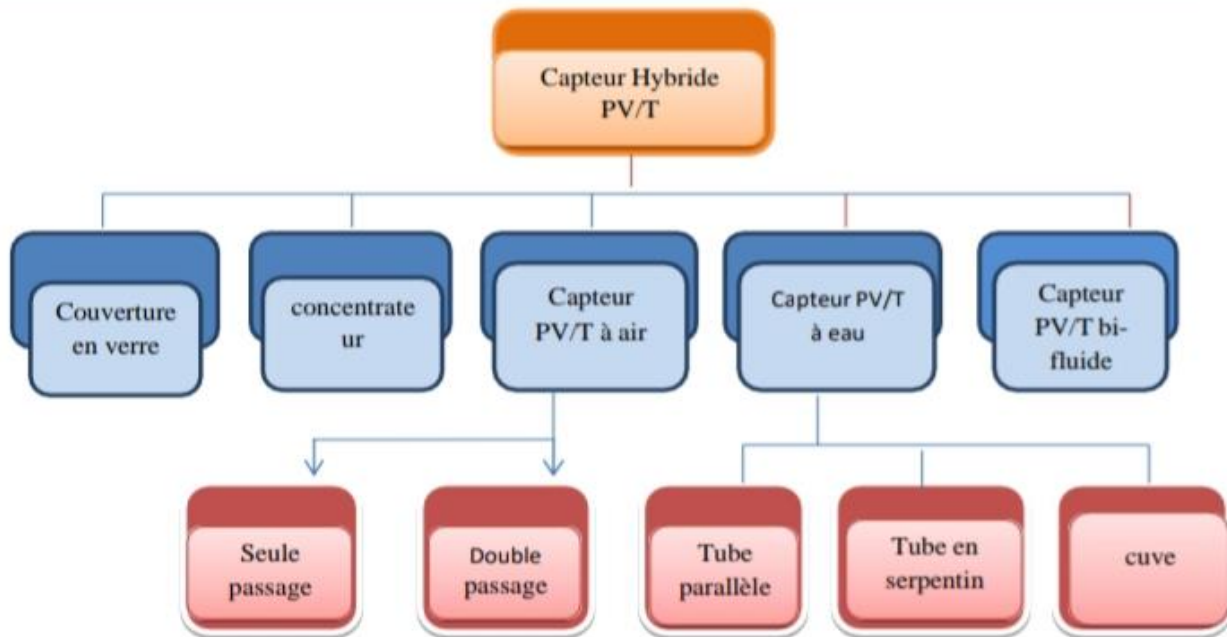


Figure II.10 : Classification des capteurs hybrides PV/T. [10]

II.4.1.1.3.1. Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau

Afin d'améliorer la performance du système photovoltaïque, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PVT. L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du module photovoltaïque par circulation de l'eau pour extraire la chaleur utilisant l'eau comme liquide réfrigérant. Ces collecteurs du liquide PV/T sont semblables à un collecteur conventionnel avec un liquide ; un absorbeur avec un tube serpentin ou des séries de canalisations verticales parallèles est appliqué, sur lesquelles le module PV a été stratifié ou collé comme joint époxyde adhésif [29].

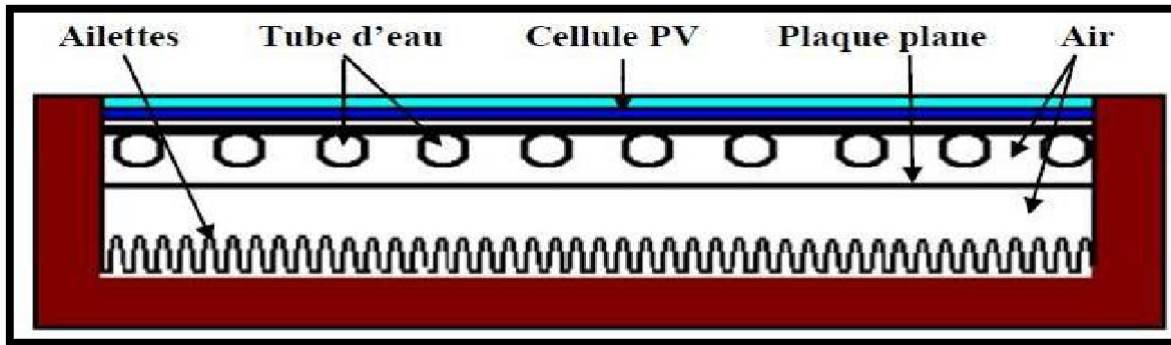


Figure II.11 :Capteur solaire hybride à eau [11].



Figure II.12 : Modules hybrides PVT à eau commercialisés [26]

II.4.1.1.3.2. Capteurs solaires hybrides PV/T à air

Les capteurs solaires hybrides sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique, permettant ainsi l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale. De l'énergie solaire captée, la production de cette énergie électrique et thermique dépend des plusieurs paramètres d'entrée et de sortie : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur. Les modèles théoriques servent à calculer ou prédire la production thermique des capteurs hybrides. Ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride (voir la figure I.13). [10]

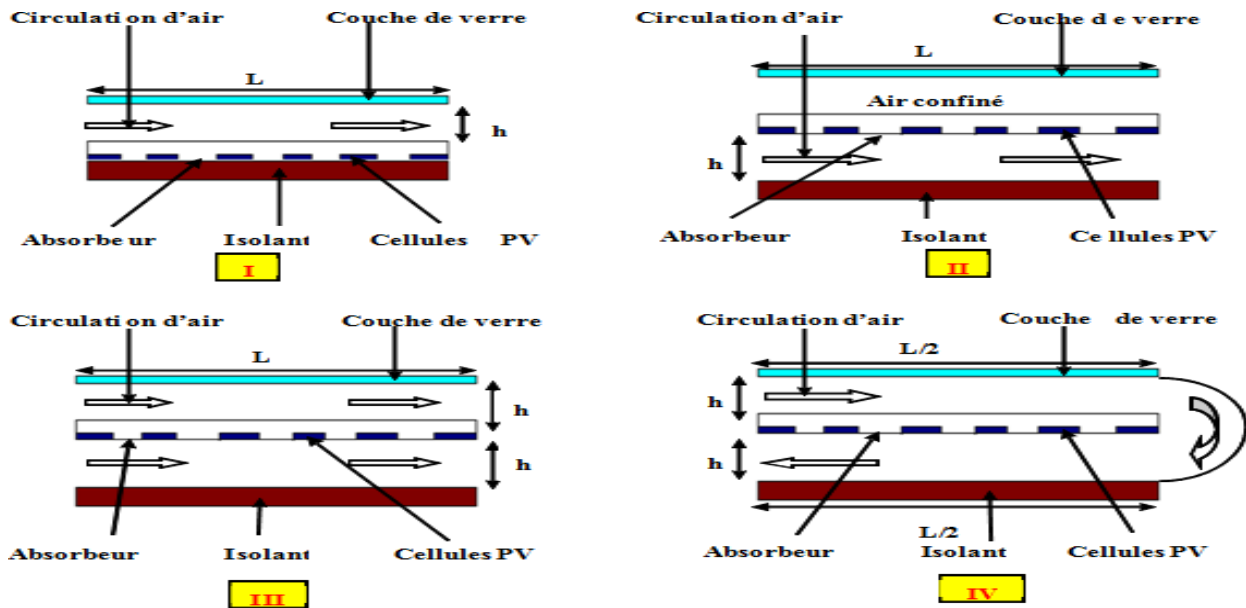


Figure II.13 : Les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PV/T à air[11]

II.4.1.1.3.3. Les capteurs solaires hybrides PV/T à concentration

Afin d'améliorer la performance du capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T, beaucoup d'effort a été consacré sur la recherche et le développement de la technologie du système hybride photovoltaïque thermique PV/T. L'augmentation de l'éclairement solaire influe positivement sur le rendement de la cellule photovoltaïque, L'une des modifications de conception est d'augmenter la performance du capteur, en ajoutant un système déconcentration sur les côtés du capteur, les réflecteurs sont de forme rectangulaire ou cylindré parabolique [29].



Figure II.14: Capteur solaire hybride PV/T à concentration. [10]

II.4.1.2. Réservoir de stockage

Elle permet de stocker l'eau chaude issue du capteur et peut contenir ou non un échangeur de chaleur. Aussi pour éviter les pertes thermiques vers le milieu extérieur, la cuve de stockage doit être bien isolée en choisissant une épaisseur de l'isolant thermique et économique adéquate (Voir figure II.15).

Suivant la capacité de stockage on distingue deux types :

- Stockage long durée (inter- saisonnier).
- Stockage court durée (ne dépassant pas quelques journées ou quelques heures)

[7].

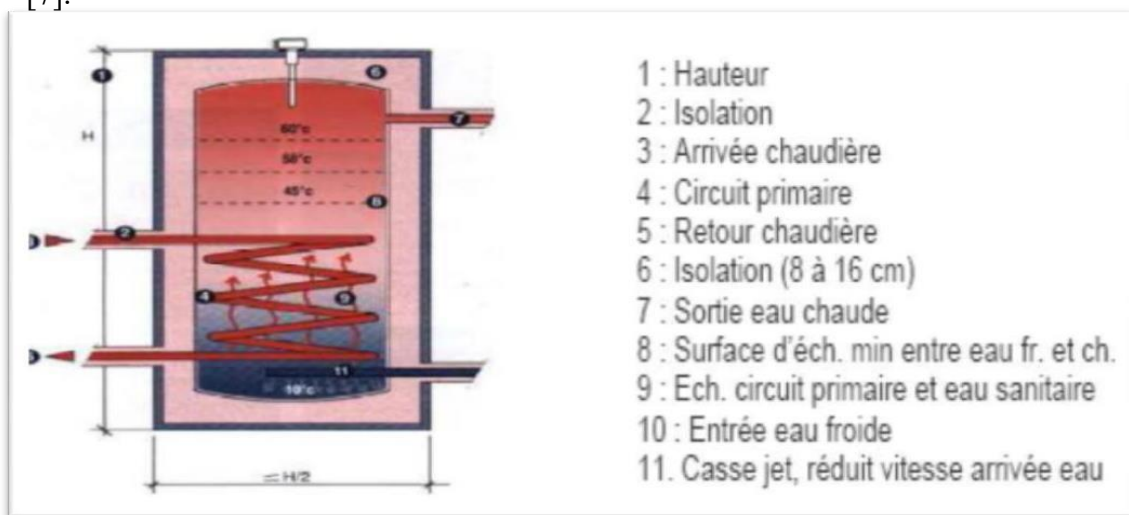


Figure II.15 : Cuve de stockage avec échangeur [7]

II.4.1.3. Les échangeurs de chaleur

L'échangeur de chaleur est un dispositif dans lequel se réalise un transfert thermique entre deux milieux dû à une différence de température entre les deux milieux.






Le principe de son fonctionnement consiste à faire circuler le fluide caloporteur à travers des conduits qui mettent les deux milieux en contact thermique. Donc le liquide caloporteur après avoir été réchauffé dans les capteurs thermiques passe dans l'échangeur en forme de serpentin placé dans la cuve de stockage, où il cède ses calories à l'eau sanitaire.[4]








Figure II.16 : Exemples d'échangeur de chaleur serpentin.[4]

II.4.1.4. Systèmes de contrôle

Tableau II.1: Tableau représentant les sous-composants d'un chauffe-eau Solaire.[17]

Composants	Fonction	Choix	Illustration
Purge des capteurs	Permet d'évacuer l' Air du circuit solaire.	Les purgeurs automatiques sont dé conseillés proximité des capteurs. La pose de purgeurs à main est donc la solution la plus simple et la plus sûre.	
Isolation des conduites	Limiter les pertes thermiques des conduites déliaison du circuit solaire.	Le choix des matériaux doit répondre aux certaines exigences, par exemple la résistance à la température, la résistance aux conditions atmosphériques.	
Vanne d'arrêt	Permettre le remplissage et la purge du circuit solaire.	<ul style="list-style-type: none"> - Vannes d'arrêt à bille à passage intégral. - Vannes d'arrêt à glissières. - Robinets de vidange équipés de capes étanches. 	
Soupape de sécurité	Evite une éventuelle surpression dans le circuit solaire qui serait provoquée par une erreur de manipulation ou une sur chauffe de s capteurs.	Il est judicieux de choisir une soupape de sécurité avec une pression nominale la plus élevée possible. Dans la pratique on choisira une soupape standard du commerce à la valeur immédiatement inférieure à la valeur calculée.	
Manomètre	Indique la pression du circuit et perm et son contrôle.	On peut utiliser les manomètres usuels. La plage de mesure doit être plus grande que la pression effective d'ouverture de la soupape de sécurité.	

Chapitre II : Chauffe-eau solaire hybride

<p>Vase d'expansion</p>	<p>Levas d'expansion absorbe l'augmentation de volume du caloporteur lorsque ce dernier s'é chauffe e.</p>	<p>Les vases sous pression usuels employés dans les installations de chauffage conviennent à condition que le matériau de la membrane intérieure résiste aux hautes températures et à l'antigel.</p>	
<p>Clapet anti-retour</p>	<p>Empêche la circulation inverse par thermosiphon dans le circuit solaire lorsque le chauffe- eau est à une température supérieure à celle des capteurs. Cette circulation est à éviter car elle engendre le Refroidissement de l'accumulateur.</p>	<p>Modèle à ressort utilisable dans toutes les positions de montage.</p>	
<p>Débitmètre</p>	<p>Indique le débit du circuit solaire. Cet appareil est utile pour régler le débit correct du circuit, contrôler périodiquement le bon débit dans le circuit...</p>	<p>On peut utiliser un débitmètre usuel. Il faut néanmoins faire attention au fait que le débit mesuré se rapporte à de l'eau et est souvent exprimé en litres/ minute.</p>	
<p>Thermomètres</p>	<p>Ils permettent la mesure des températures s: - De la conduite d'arrivée des capteurs; - de la conduite de retour aux capteurs</p>	<p>Afin d'obtenir une précision suffisante, il faut utiliser des thermomètres avec douille plongeante.</p>	
<p>Circulateur</p>	<p>Véhiculer le liquide caloporteur du circuit capteur.</p>	<p>Le circulateur doit être installé sur la conduite de retour aux capteurs. Le choix de la pompe dépend de deux critères: - le débit volumétrique; - la hauteur manométrique.</p>	

Conclusion :

Ce chapitre a présenté une vue d'ensemble sur les chauffe-eaux solaires, en abordant leurs types et leurs principes de fonctionnement, allant des systèmes simples à thermosiphon aux systèmes avancés à circulation forcée. Nous avons également examiné les différents types de capteurs solaires et leurs applications.

Dans la dernière partie, l'accent a été mis sur le chauffe-eau solaire hybride, en mettant en évidence ses principaux composants et son rôle dans la production simultanée de chaleur et d'électricité. Ce système représente une solution efficace pour une exploitation optimale de l'énergie solaire, ouvrant la voie à l'étude des modèles appliqués par la suite.

Chapitre III

Modélisation Mathématique

Introduction

L'analyse mathématique constitue une base essentielle pour comprendre le comportement des systèmes thermiques et photovoltaïques. La modélisation mathématique représente un outil efficace pour évaluer les performances du chauffe-eau solaire hybride (PVT) sans recourir à des essais expérimentaux coûteux.

Dans ce chapitre, nous présentons les théories fondamentales du transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement), qui servent de fondement à la modélisation des échanges thermiques au sein des composants du système. Ensuite, nous développons un modèle thermique basé sur le bilan énergétique du capteur hybride, suivi d'un modèle électrique décrivant le comportement de la partie photovoltaïque.

Ce cadre théorique permet une meilleure compréhension du rendement global du système et des facteurs influençant ses performances.

III.1. Théories de transfert de chaleur

Les capteurs solaires reçoivent l'énergie et la convertissent soit en électricité pour les panneaux photovoltaïques ou en chaleur pour les capteurs solaires thermiques ou bien en électricité et en chaleur pour les capteurs hybrides. Non toute cette énergie est convertie en électricité et/ou en chaleur puisque les capteurs ne sont pas 100% efficaces. La majeure partie de cette énergie est perdue à l'environnement. Cette énergie est transférée en général sous trois formes, transfert par conduction, par convection et par rayonnement.[18]

III. 1.A. Conduction

C'est le transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres. La transmission de chaleur par ce moyen est d'autant plus faible que le matériau est épais et de faible densité. Dans le cas d'un capteur solaire, l'énergie est absorbée par la vitre et par les cellules de silicium et la chaleur est conduite à l'arrière et avant du capteur par l'intermédiaire

Chapitre III : Modélisation Mathématique

des couches intervenantes. La loi de Fourier pour l'état d'équilibre, des applications unidimensionnelles est comme suit :

$$Q = -\lambda \times A \times \frac{dT}{dx} \quad [18]III.1$$

Où :

Q : Est le flux de chaleur transmis par

conduction **λ** : Est la conductivité thermique

du matériau **A** : La surface de la section
perpendiculaire

: La variation de la température en ce qui concerne la longueur du chemin de
dx

transfert de chaleur

III.1.B. Rayonnement

C'est le mécanisme par lequel la chaleur se transmet d'un milieu à haute température vers un autre à basse température lorsque ces milieux sont séparés dans l'espace, ce mode de transfert ne nécessite pas de support matériel et peut donc s'effectuer dans le vide, en générale les sources de rayonnement sont des solides et le rayonnement se fait par la surface. Si on prend le rayonnement entre un corps et le milieu environnant nous avons la relation :

$$Q_T = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot [T_p^4 - T_f^4] \quad [18] \text{ III.2}$$

Q_T : Énergie de chaleur transmis par rayonnement.

ϵ : Facteur d'émissivité du corps, la valeur de ϵ vaut 1 pour un corps dit noir.

T : Température du corps en Kelvin.

σ : Constante de Stephan.

La plupart des gaz monoatomiques ou poly-atomiques symétriques (H_2 , N_2 , O_2 ,...) n'absorbent et n'émettent aucun rayonnement thermique. Par contre les gaz poly atomiques non symétriques émettent un tel rayonnement.

III.1. Convection

Les phénomènes de convection interviennent dans la transmission de la chaleur chaque fois qu'un fluide se déplace par rapport à des éléments fixes, lorsque se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de densité résultant des gradients de température, on dit que la convection est naturelle ou libre, si le mouvement du fluide est provoqué par une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée. Le transfert de chaleur par convection est décrit en utilisant des corrélations entre certains paramètres sans dimensions. De tels paramètres sont les nombres de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl. Ces paramètres sont employés afin de déterminer la valeur de h pour chaque cas :

$$Q = h \times A \times [T_s - T_f] \quad [18] \text{ III.3}$$

La loi de Newton du refroidissement est alors employée afin de calculer le transfert de chaleur par convection.

III.2. Modèle mathématique thermique

III.2.1. Bilan énergétique du capteur hybride PVT

L'énergie solaire thermique absorbée par le capteur est donné comme suit:

$$Q_{sun} = A_v \cdot G \cdot \tau_{verre} \alpha \quad [19] \text{III.4}$$

: Surface du verre (m²).

G : rayonnement totale absorbée par la cellule solaire (W/m²)

τ_{vre} : Coefficient de transmission de la vitre

α_{ce} : Coefficient d'absorption de la cellule solaire.

Flux de chaleur échangé par rayonnement (perte) entre le vitrage et le ciel est

Donné par :

$$Q_{rv-c} = \sigma \cdot \epsilon_v \cdot A_v (T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad [19] \text{III.5}$$

: Constante de Stefan-Boltzmann en (W/m² K⁴)

ϵ : Emissivité du verre

La température du ciel est donnée par la relation suivante :

$$T_{ciel} = 0.0552 \times (T_a)^{1.5} \quad [19] \text{III.6}$$

Flux de chaleur échangé par convection (perte) entre le vitrage et l'air ambiant

(Milieu extérieur) est donné par :

$$Q_{cv-a} = h_{c-a} \times (T_v - T_a) \quad [19] \text{III.7}$$

: Température de la vitre du capteur(K)

T_a : Température ambiant(K)

h_{c-a} : Coefficient de transfert convective (W/m².K) donné par :

$$h_c = 5.7 + 3.8 \times V \quad [19] \text{III.8}$$

La Figure III.17. Montre le schéma électrique équivalent du capteur hybride où figure les énergies absorbées ou produites par le capteur

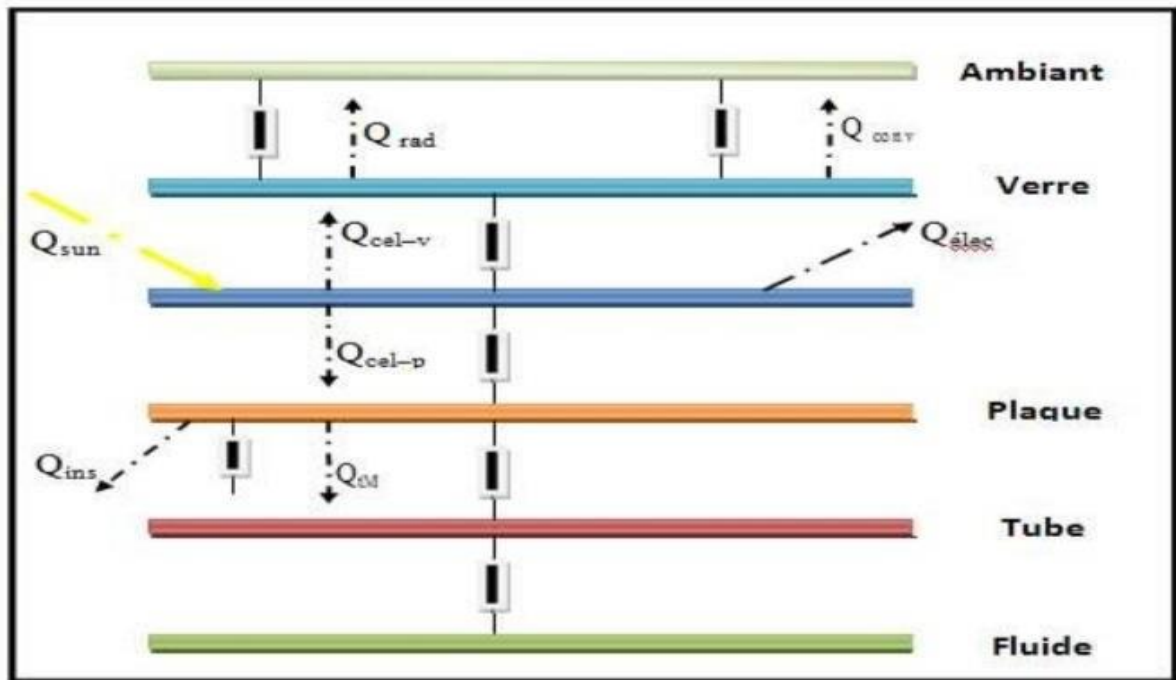


Figure III.17. Schéma électrique équivalent du capteur hybride [18]

III.3. Modèle thermique d'un capteur hybride

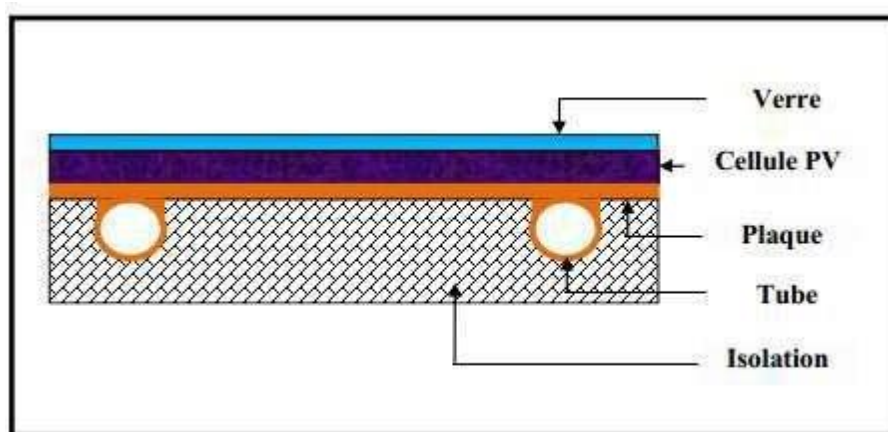


Figure III.18. Modèle d'un capteur hybride PVT. [18]

Si I est l'intensité du rayonnement solaire, en W/m^2 , incidente sur le plan d'ouverture du capteur solaire avec une surface du capteur A , en m^2 , alors la quantité de rayonnement solaire reçu par le capteur peut être exprimée par l'équation suivante. [20].

$$Q_i = I_T \times A_c$$

[20] III.9

L'énergie gagnée par l'absorbeur est donnée par la relation suivante :

$$Q_r = (\alpha\tau)_{\text{eff}} \times I_T \times A_c \quad [20] \text{ III.10}$$

Avec $(\alpha\tau)$ est la fraction optique efficace de l'énergie absorbée I_T l'éclairement solaire global incident sur la surface du capteur, A_c la surface du capteur.

Comme le capteur absorbe la chaleur, sa température est de plus en plus supérieure a celle de l'énergie thermique environnante et est transmise a l'atmosphère par convection et rayonnement. Le taux de perte de chaleur, Q_0 dépend du coefficient de transfert thermique global U_L de capteur et de sa température. Le taux de perte de chaleur, Q_0 , peut être exprime par l'équation suivante :

$$Q_0 = U_L \times A \times (T_c - T_a) \quad [20] \text{ III.11}$$

Où Q_0 est la perte de chaleur en [W], U_L est le coefficient de perte de chaleur [W/K.m²], T_c est la température moyenne du capteur en °C et T_a est la température ambiante en C°, Ainsi, le taux d'énergie utile extrait par le capteur Q_u , exprimée en taux d'extraction dans des conditions d'état stable, est proportionnelle à l'énergie utile absorbée par le capteur moins la quantité perdue par le capteur. C'est exprimé comme suit :

$$Q_u = Q_r - Q_0 = (\alpha\tau)_{\text{eff}} \times I_T \times A_c - U_L \times A_c \times (T_c - T_a) \quad [20] \text{ III.12}$$

Le taux d'extraction du collecteur de chaleur peut être mesuré au moyen de la quantité de chaleur emportée par le fluide qui le traverse et qui peut être exprimée comme suit :

$$Q_u = \dot{m} \cdot c_p \cdot (T_o - T_i) \quad [20] \text{ III.13}$$

$$T_o = \frac{Q_u}{\dot{m} \times c_p} + T_i \quad [20] \text{ III.14}$$

T_o : Température de l'eau de sortie.

Où \dot{m} est le débit massique du fluide en **[kg/s]**. E q. (III.11) se révèle être quelque part inapproprié en raison de la difficulté de définir la température moyenne du capteur. Il est facile de définir une grandeur qui concerne le gain en énergie utile réelle d'une surface de collecteur qui est à la température d'entrée du fluide. Cette quantité est connue comme le facteur d'élimination de la chaleur du collecteur, et F_R est signalée par l'équation. (III.15). En effet, les facteurs d'évacuation de la chaleur du collecteur sont de trois types.

$$F_R = \frac{\dot{m}c_p (T_o - T_i)}{A[(\alpha\tau)_{\text{eff}} I_T - U_L (T_i - T_a)]} \quad [20] \text{ III.15}$$

FR: factor d'extraction de la chaleur qui définit la proportion du gain réel de l'énergie utile du collecteur au maximum du gain utile possible si la surface du collecteur entière était à la température d'entrée du fluide, il peut être calculé

Comme suit

$$F_R = \frac{\dot{m} \times C_p}{A \times U_L} \times \left(1 - \exp \left(\frac{-A \times U_L \times F'}{\dot{m} \times C_p} \right) \right) \quad [24] \text{ III.16}$$

L'efficacité corrigée de l'ailette **F'** peut être calculée comme suit:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{W \times \left[\frac{1}{(U_L \times (D_{\text{ext}} + (W - D_{\text{ext}}) F))} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi \times D_i \times h_f} \right]} \quad [24] \text{ III.17}$$

W: Distance entre les tuyaux

D_{ext}: Diamètre extérieur

D_i: Diamètre intérieur

C_b: La conductance de liaison

h_f: Coefficient de transfert de chaleur du fluide

Avec: "Coefficient de transfert de chaleur **F**"

$$F = \frac{\tanh \left(\left(\frac{W - D_{\text{ext}}}{2} \right) \times \sqrt{\frac{U_L}{K \times \delta}} \right)}{\left(\frac{W - D_{\text{ext}}}{2} \right) \times \sqrt{\frac{U_L}{K \times \delta}}} \quad [24] \text{ III.18}$$

δ: Épaisseur de la plaque absorbante

K: Conductivité thermique des plaques

Et :

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{K \times \delta}} \quad [24] \text{ III.19}$$

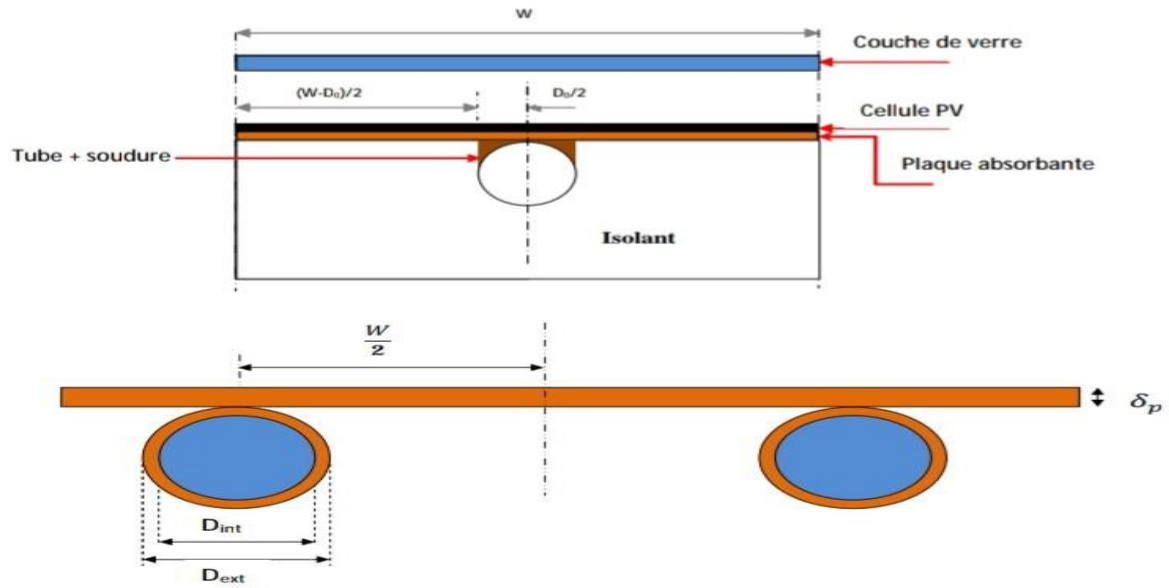


Figure III.19: Coupe perpendiculaires d'un capteur PV/T hybride à eau[19]

Pour un gain d'énergie utile maximale dans un capteur solaire produit quand l'ensemble de capteur est à la température de fluide d'entrée. Le gain d'énergie utile réelle (Q_u), est obtenu en multipliant le facteur collecteur d'évacuation de chaleur (F_R) par le gain d'énergie utile possible maximum. Cela permet à la réécriture de l'équation.

$$Q_u = F_R \times [(\alpha\tau)_{\text{eff}} \times I_T - U_L \times (T_i - T_a)] \quad [20] \text{ III.20}$$

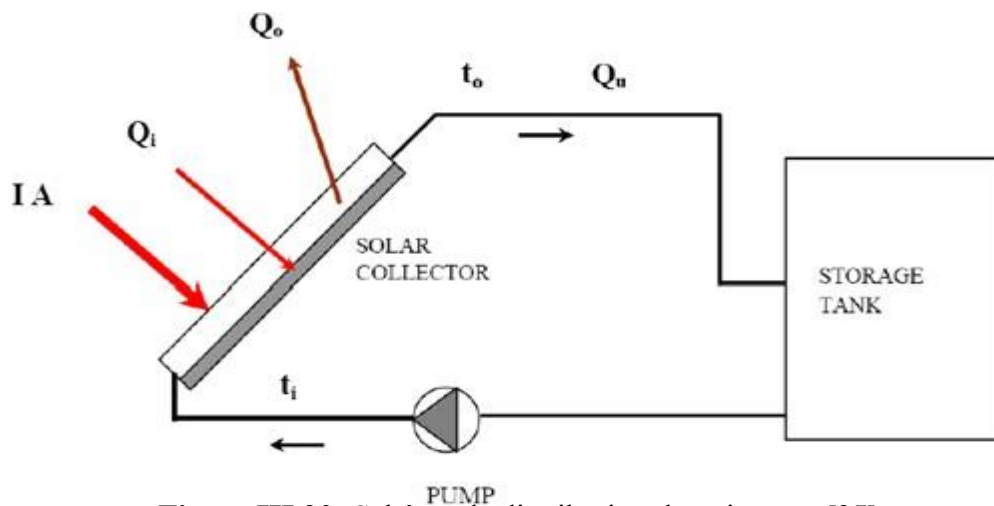


Figure III.20: Schéma de distribution de puissance [25]

Le rendement du capteur est défini comme le rapport de gain d'énergie utile Q_u , sur l'énergie solaire incidente :

$$\eta_{th} = \frac{\int Q_u}{A \int I dt} \quad [20] \text{ III.21}$$

et le rendement thermique du capteur est le suivant :

$$\eta_{th} = \frac{Q_u}{A \times I_T}$$

[20] III.22

$$\eta_{th} = \frac{F_R A [(\alpha\tau)_{eff} I_T - U_L (T_i - T_a)]}{A I_T} \quad [20] \text{ III.23}$$

$$\eta_{th} = F_R \cdot (\alpha\tau)_{eff} - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{I_T} \right) \quad [20] \text{ III.24}$$

Q_u peut également être écrit en termes de différence d'irradiance absorbée, d'énergie électrique générée et de perte de chaleur

$$Q_u = A [(\alpha\tau)_{pv} \cdot I_T - U_L (T_i - T_a) - Q_e] \quad [32] \text{ III.25}$$

Où **A** représente la surface du capteur, **T_a** la température ambiante, **U_L** le coefficient de déperdition thermique du capteur, **Q_e** la puissance électrique produite par le module et **τ** le produit transmittance/absorption du module photovoltaïque. **T_{pm}** est la température moyenne de la plaque d'absorption. Étant donné que **T_{pm}** dépend de nombreux facteurs, notamment les différentes conceptions de capteurs, les propriétés du fluide de travail et l'irradiance solaire, sa mesure ou son calcul est difficile. Pour simplifier l'analyse, Hottel et Whillier ont ajusté les formules pour un capteur plan en remplaçant la température moyenne de l'absorbeur par la température d'entrée, une valeur fréquemment utilisée pour la conception et l'évaluation des capteurs solaires à liquide et à air.

$$Q_u = F_R A [(\alpha\tau)_{pv} \cdot I_T - U_L (T_i - T_a) - Q_e] \quad [32] \text{ III.26}$$

L'efficacité électrique (**η_{el}**) du système a été calculée à l'aide de l'équation suivante

$$\eta_{el} = \frac{I \times V}{A \times I_T} \quad [21] \text{ III.27}$$

Chapitre III : Modélisation Mathématique

Où I et V représentent le courant et la tension de sortie, tandis que A et I_r représentent respectivement la surface du module solaire et l'intensité solaire. Le rendement thermique (η_{Th}) et le rendement global (η_{OA}) du panneau ont été déterminés à l'aide des équations II.27 et II.28

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_p\Delta T}{A \times I_T} \quad [21] \text{ III.28}$$

$$\eta_{OA} = \eta_{el} + \eta_{th} \quad [21] \text{ III.29}$$

III.4. Modèle mathématique électrique

La production d'électricité des modules photovoltaïques dépend de leur température et de l'irradiation solaire. La puissance électrique maximale peut être calculée comme suit.

$$P_m = P_{m, stc} \times (1 - \gamma (T_{PV} - 25)) \times \frac{I_T}{1000} \quad [22] \text{ III.30}$$

Où P_m est la puissance électrique maximale et $P_{m, stc}$ la puissance électrique maximale dans les conditions d'essai standard avec un rayonnement solaire de 1000 W/m^2 et une température du module PVT de $25 \text{ }^\circ\text{C}$, γ est le coefficient de température de la puissance maximale et T_{pv} la température du module PV.

$$T_{pv} = T_a + (\text{NOCT} - 20) \times \frac{I_T}{800} \quad [22] \text{ III.31}$$

La NOCT est déterminée par la température de la cellule ou du module PV, qui peut être déterminée avec une installation typique avec un niveau d'irradiance solaire de 800 W/m^2 , une température ambiante de $20 \text{ }^\circ\text{C}$ et à vide. La NOCT est généralement fournie par le fabricant et est d'environ $45 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ pour les panneaux PV monocristallins et poly cristallins.

$$\text{NOCT} = 800 F_R \times \frac{T_i - T_a}{I_T} + \frac{\tau\alpha}{U_L} \times (1 - F_R) 800 + 20 \quad [22] \text{ III.32}$$

T_i : Température du fluide interne, c'est -à-dire l'eau ($^\circ\text{C}$)

T_a : Température ambiant ($^\circ\text{C}$)

Selon les travaux de Ch o e t a l [37] et de Zondag et al [38] qui confirment que le refroidissement des cellules photovoltaïques dans les systèmes hybrides PVT contribue à la réduction de leur température de fonctionnement, on peut utiliser un modèle simplifié pour estimer le NOCT effectif comme suit :

$$\text{NOCT}_{\text{eff}} = \text{NOCT} - \Delta T \quad [37] \text{ et } [38] \text{ III.33}$$

Où ΔT représente la différence de température résultant du refroidissement, généralement comprise entre 5 et 15 °C selon la conception et l'efficacité thermique du système. Ce modèle est utilisé dans des études basées sur des estimations empiriques simplifiées, notamment en l'absence de modélisation thermique détaillée.

$$\eta_{el} = \frac{P_m}{A_c \times I_T} \quad [22] \text{ III.34}$$

η_{el} : Efficacité électrique réelle.

η_0 est le rendement nominal sous les conditions standards

$$\eta_0 = \frac{P_{max}}{A_{cap} \times G} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{A_{cap} \times G} = \eta_{stc} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{A_c \times I_{T.stc}} = \frac{P_{m.stc}}{A_c \times I_{T.stc}} \quad [19] \text{ III.35}$$

V_{mp} : Max. voltage.

I_{mp} : Max. le courant Il s'agit du rendement électrique du modèle de capteur photovoltaïque calculé dans des conditions climatiques standard, soit 1000 w/m^2 de rayonnement solaire et une température ambiante de 25°C°, comparé au rendement électrique η_{el} déterminé précédemment dans des conditions réelles, c'est-à-dire les conditions climatiques de la région.

La puissance électrique est calculée selon l'expression suivante

$$Q_e = \eta_{el} \times I_T \times A_c \quad [13] \text{ III.36}$$

III.5. Modèle mathématique d'une pompe domestique

Pour calculer le débit volumétrique et massique de l'eau vers le capteur solaire, nous suivons la loi suivante :

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{Pm}{P_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \qquad Q_2 = \frac{Pm \times Q_1}{P_1}$$

Q_1 :Débit volumétrique de la pompertilisée[l/min]

Q_2 :Débit volumétrique dirigé vers le capteur solaire[l/min]

Pm :Énergie électrique produite par le capteur solaire[w]

P_1 :Puissance électrique de la pompe utilisée[w]

Définition de la pompe utilisée dans l'étude

La société MASTER PUMPS Algérie est spécialisée dans la fabrication et la distribution de pompes à eau pour des usages domestiques et industriels. Elle propose une large gamme de pompes répondant à divers besoins, avec un accent particulier sur la qualité et la fiabilité.[37]



Figure III.21 : la pompe utilisée dans l'étude [37]

Types de pompes MASTER PUMPS disponibles en Algérie

✚ Pompes de surface (Pompes de surface)[37]

Adaptées pour le relevage de l'eau à partir de puits peu profonds ou de réservoirs enterrés, elles sont souvent utilisées dans les maisons et les jardins.

Exemple : MASTER PUMPS QB 60

Puissance : 370 W (0,5 CV)

Débit maximal : 35 litres/minute

Hauteur maximale : 35 mètres

Tension : 220-240 V / 50 Hz

Matériau de la turbine : Laiton

Niveau de protection : IP44

Niveau sonore : 70 décibels

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons établi des modèles mathématiques thermiques et électriques permettant de simuler le fonctionnement du chauffe-eau solaire hybride (PVT). Les modèles développés s'appuient sur les principes du transfert de chaleur et de l'analyse énergétique, ce qui permet d'estimer les températures, les rendements thermiques et la production électrique dans différentes conditions de fonctionnement.

Ces modèles constituent une base solide pour l'analyse numérique et l'évaluation pratique du système, et seront utilisés par la suite pour la simulation numérique, en vue d'optimiser le design et les conditions d'exploitation.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1. Introduction

Étude théorique comparative des systèmes de chauffage d'eau à l'énergie solaire
Dans le cadre de la recherche théorique sur les systèmes de chauffage d'eau à l'énergie solaire, une étude analytique comparative a été menée entre le chauffe-eau solaire traditionnel et le chauffe-eau hybride (solaire-électrique) en utilisant le logiciel MATLAB 2013. Cette étude vise à évaluer la performance thermique des deux systèmes et la consommation électrique du système hybride à travers une modélisation mathématique.

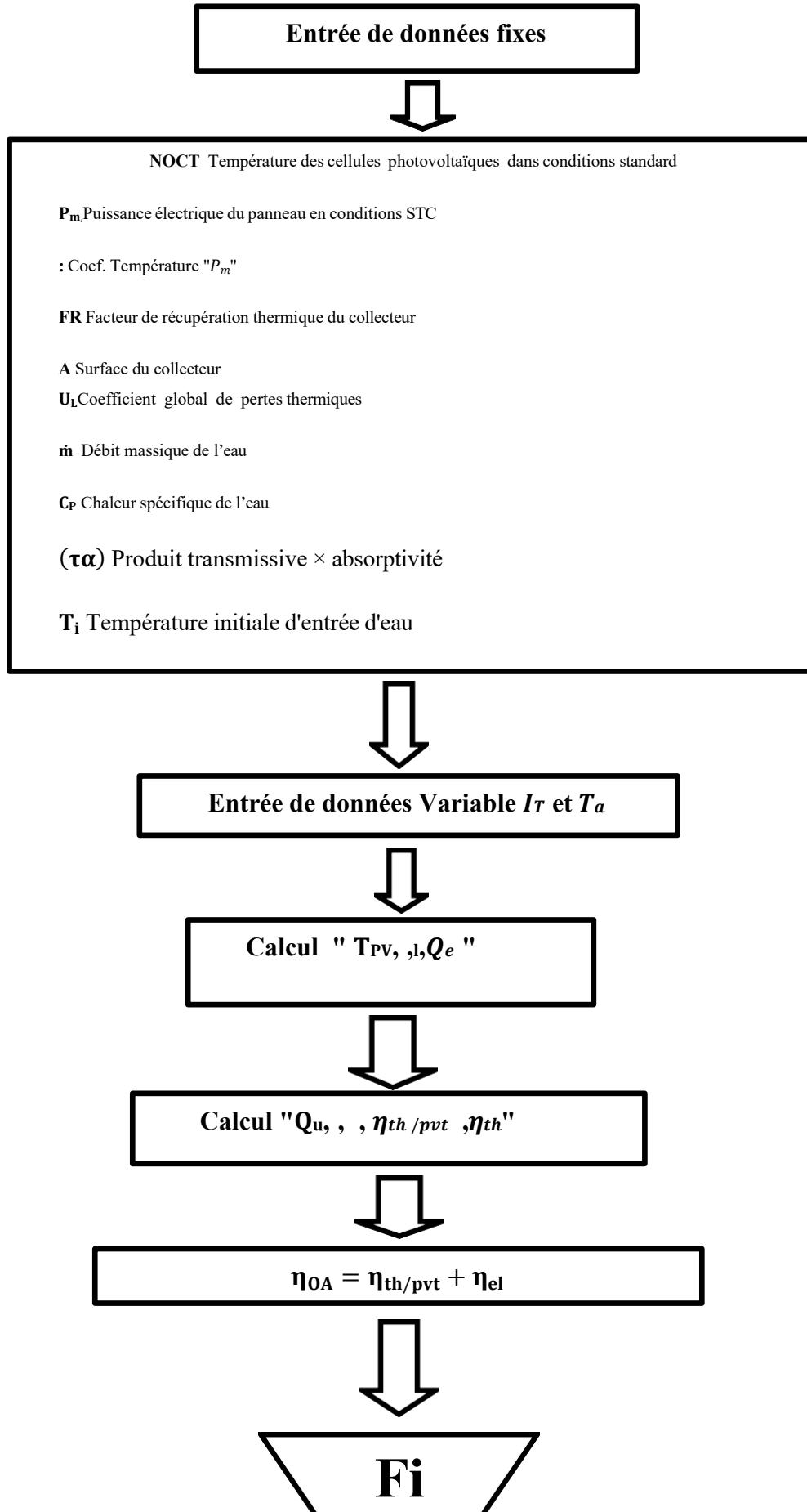
L'étude s'est basée sur des données théoriques et des équations mathématiques pour analyser les performances des deux systèmes sous différentes conditions de fonctionnement, en mettant l'accent sur :

- L'énergie solaire incidente (Q_r)
- L'énergie thermique utile (Q_u)
- Les températures de sortie (T_o)
- Les rendements thermiques et électriques

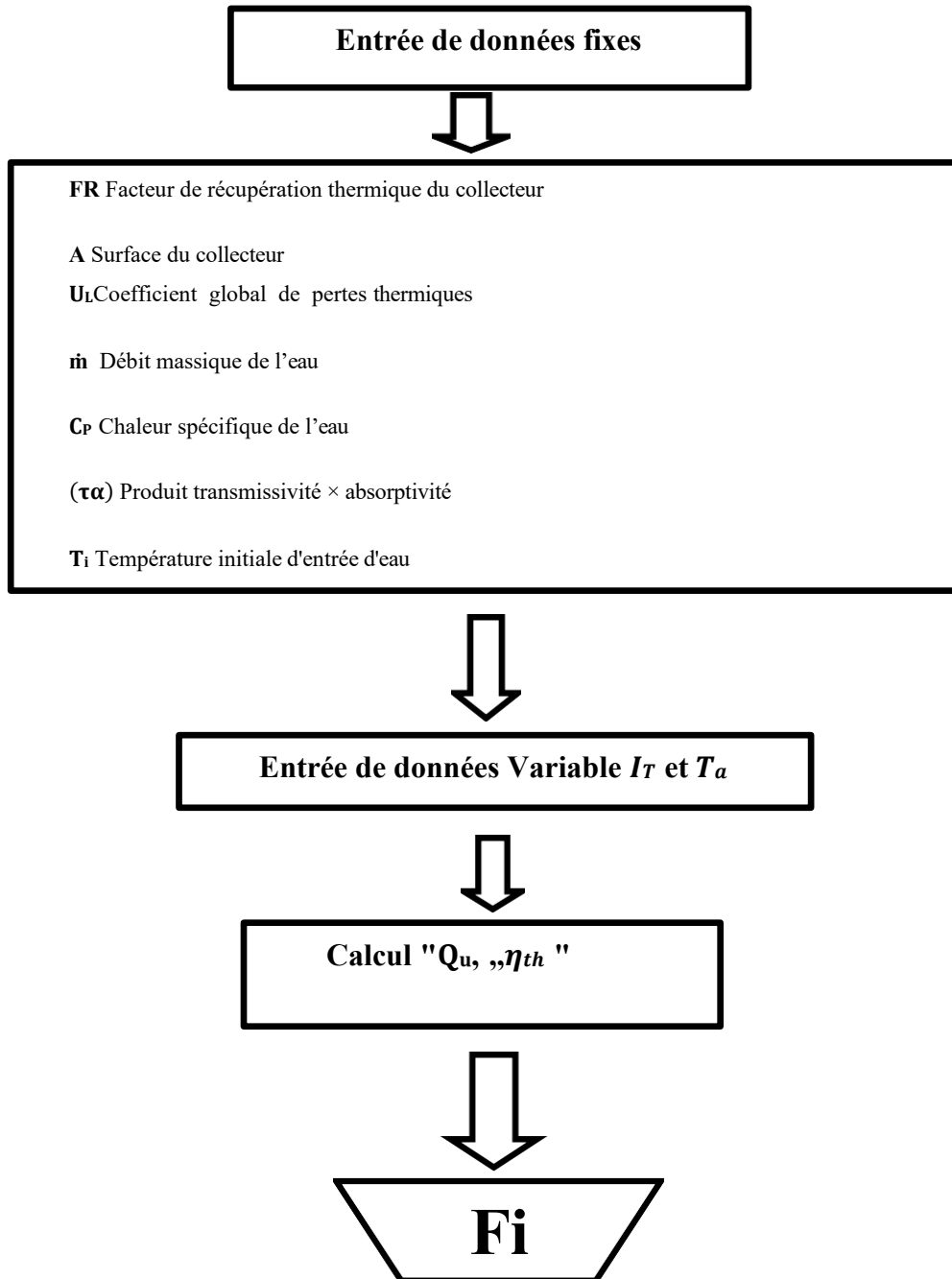
Les modèles mathématiques ont été conçus à partir des équations physiques fondamentales des systèmes de chauffage solaire, avec des calculs effectués à l'aide de MATLAB pour comparer les performances des deux systèmes dans diverses conditions opérationnelles.

Cette étude théorique vise à fournir un cadre analytique pouvant servir de base pour évaluer la performance de ces systèmes avant leur application pratique, tout en mettant en évidence les avantages et inconvénients relatifs de chaque système sur la base des données mathématiques et physiques.

IV.2. Organigramme chauffe-eau solaire hybride



IV.3. Organigramme chauffe-eau-solaire



IV.4. Caractéristiques du modèle PVT

Tableau IV.2 : Caractéristiques du Capteur PV/T étudié [24]

Symbole	Valeur	Unité	Désignation
K	385	W/m°C	Conductivité thermique du cuivre
U_L	8	W/m ² °C	Coefficient global de pertes thermiques
δ	5×10^{-4}	M	Épaisseur de la plaque en cuivre
D	0.01	M	Diamètre intérieur du tube
W	0.15	M	Conductivité de la liaison thermique
C_b	∞	[-]	Conductivité thermique infinie (hypothèse)
A	2	m ²	Surface du collecteur
\dot{m}	0.03	Kg/s	Débit massique de l'eau
c_p	4180	J/kg.K	Chaleur spécifique de l'eau
$(\tau\alpha)$	0.9	[-]	Produit transmissivité × absorptivité
h_f	300	W/m ² °C	Coefficient de transfert thermique à l'intérieur du tube
m $= \sqrt{\frac{U_L}{k \times \delta}}$	6.44	[-]	Paramètre m (transfert thermique)
F	0.93	[-]	Rendement de l'ailette
F'	0.83	[-]	Facteur d'efficacité du collecteur
FR	0.80	[-]	Facteur de récupération thermique du collecteur

IV.5. Caractéristiques du panneau photovoltaïque PV

Tableau IV.3 : Caractéristiques du panneau photovoltaïque PV étudié.[22]. [33]

Symbole	Valeur	Unité	Remarque
η_{stc}	15%	%	Rendement du panneau en conditions standard (STC)
V_{mp}	33.4	V	Tension au point de puissance maximale
I_{mp}	9.45	A	Courant au point de puissance maximale
$P_{m,stc}$	315.63	W	Puissance électrique du panneau en conditions STC
$T_{a,stc}$	25	°C	Température ambiante en conditions STC
$I_{T,stc}$	1000	W/m ²	Ir radiance solaire en conditions STC
: Coef. Température " P_m "	-0.45	%/°C	Impact de la température sur la puissance
NOCT	45±2	°C	Température des cellules photovoltaïques dans conditions standard

.6. Températures Ta du 15 de chaque mois - Ouargla 2024

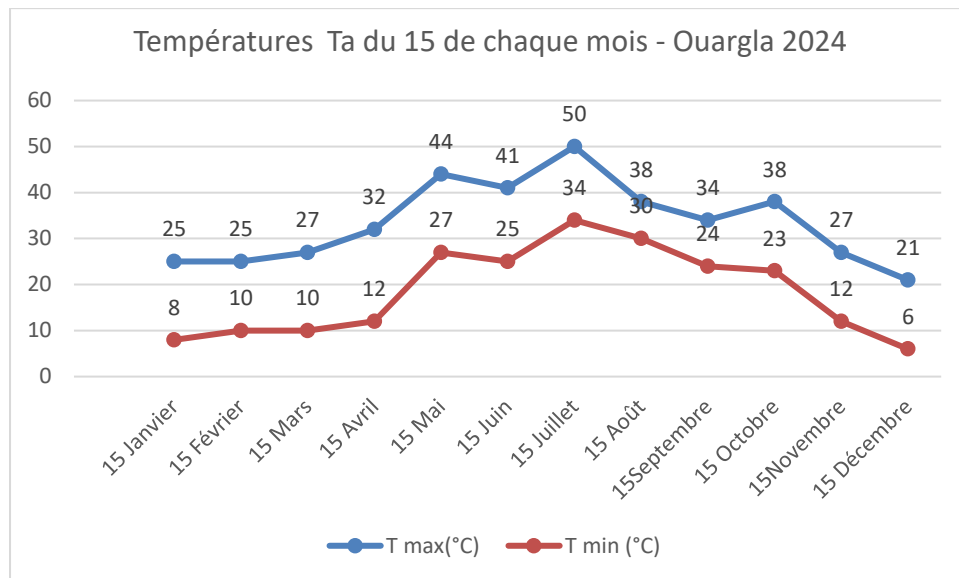


Figure IV.22: La Températures Ta du 15 de chaque mois - Ouargla 2024[34]

Les données enregistrées le 15 de chaque mois montrent une augmentation progressive des températures minimales et maximales, atteignant un pic en juillet (50°C), avant de diminuer progressivement jusqu'en décembre. Cette évolution reflète une forte saisonnalité liée au climat désertique, influençant directement la performance des systèmes thermiques.

IV.7. Variation du rayonnement global

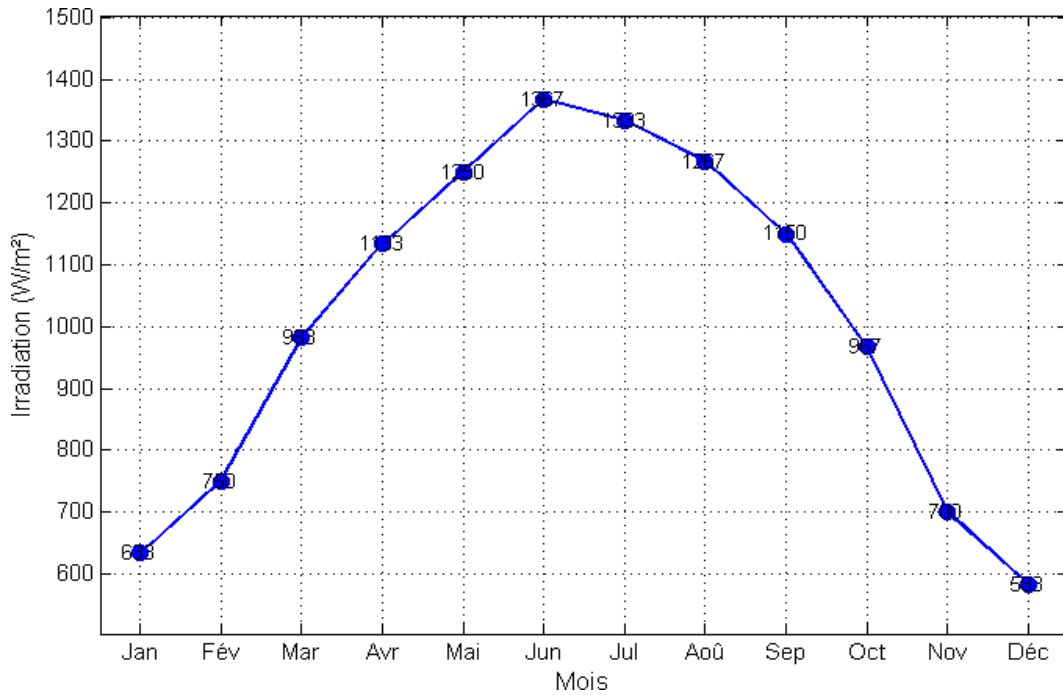


Figure IV.24: Variation temporelle du rayonnement solaire-Ouargla 2024

Ce graphique illustre les variations mensuelles du rayonnement solaire à Ouargla durant l'année 2024. On observe que les valeurs du rayonnement sont faibles en début d'année, variant entre 600 et 700 W/m². Au fil des mois, elles augmentent progressivement pour atteindre un pic durant la saison estivale, notamment au mois de juin, avec une valeur maximale d'environ 1367 W/m². Ensuite, elles diminuent graduellement jusqu'à la fin de l'année, retrouvant leurs niveaux les plus bas en décembre. Cette évolution reflète le comportement saisonnier typique du rayonnement solaire dans les régions désertiques .

IV.8. La variation de la température ambiante

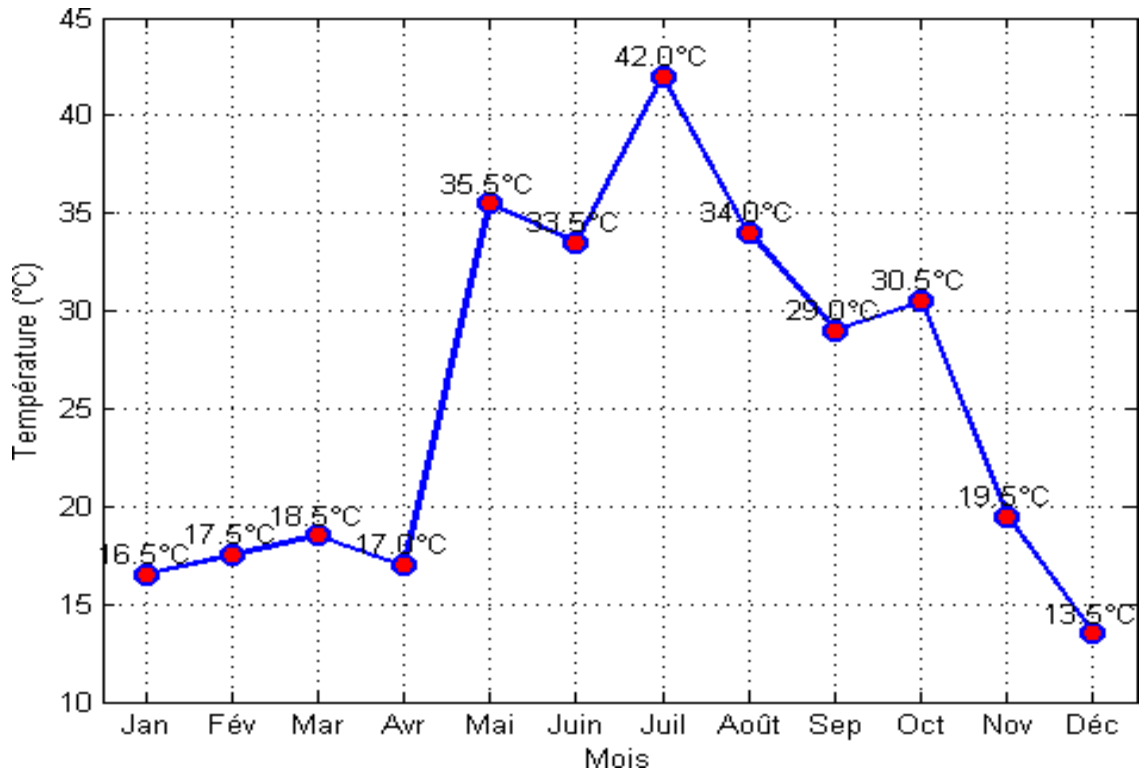


Figure IV.25: Variation temporelle des températures-Ouargla 2024

Ce graphique représente l'évolution de la température ambiante à Ouargla durant l'année 2024, illustrant un climat désertique avec de fortes variations saisonnières. Les températures débutent autour de 16,5°C en janvier, augmentent progressivement pour atteindre 18,5°C en mars, avec une relative stabilité en avril (17,8°C). Une hausse marquée survient en mai avec 35,5°C, indiquant un passage rapide à l'été, qui culmine à 42°C en juillet. Ensuite, les températures diminuent graduellement durant l'automne, de 34°C en août à 19,5°C en novembre, avec une remontée ponctuelle en octobre (30,5°C). En décembre, la température chute à son minimum annuel de 13,6°C, annonçant l'hiver. Cette variation thermique influence directement la performance des systèmes solaires, avec un meilleur rendement durant les mois chauds et une efficacité réduite en période froide.

IV.9. Comparaison de l'énergie utile pour le chauffage de l'eau par les chauffe-eau solaires classiques et hybrides à Ouargla – 2024

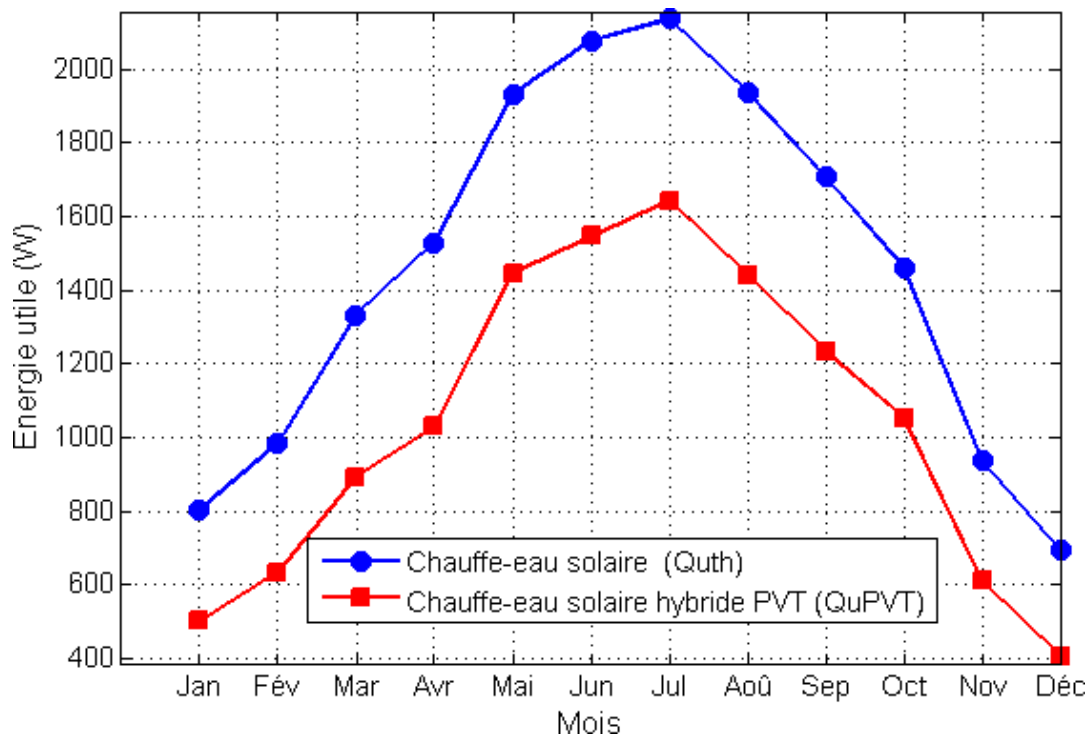


Figure IV.26: Analyse quantitative mensuelle de la production d'énergie thermique

Ce graphique présente une comparaison entre les variations de l'énergie utilisée pour le chauffage dans un capteur solaire classique et un capteur hybride au cours de l'année 2024. On remarque clairement que l'énergie consommée dans le système classique est toujours plus élevée que celle du système hybride tout au long de l'année. Dans les deux cas, la consommation augmente progressivement pour atteindre un maximum au mois de juillet, puis elle diminue graduellement jusqu'à la fin de l'année, notamment durant les mois d'hiver. Cette différence s'explique notamment par le fait que le système classique repose uniquement sur l'énergie thermique solaire, tandis que le système hybride bénéficie d'un soutien photovoltaïque intégré, ce qui améliore son efficacité énergétique et réduit la consommation globale.

IV.10. Variation de la température de sortie de l'eau dans les chauffe-eau solaires à Ouargla au cours de l'année 2024

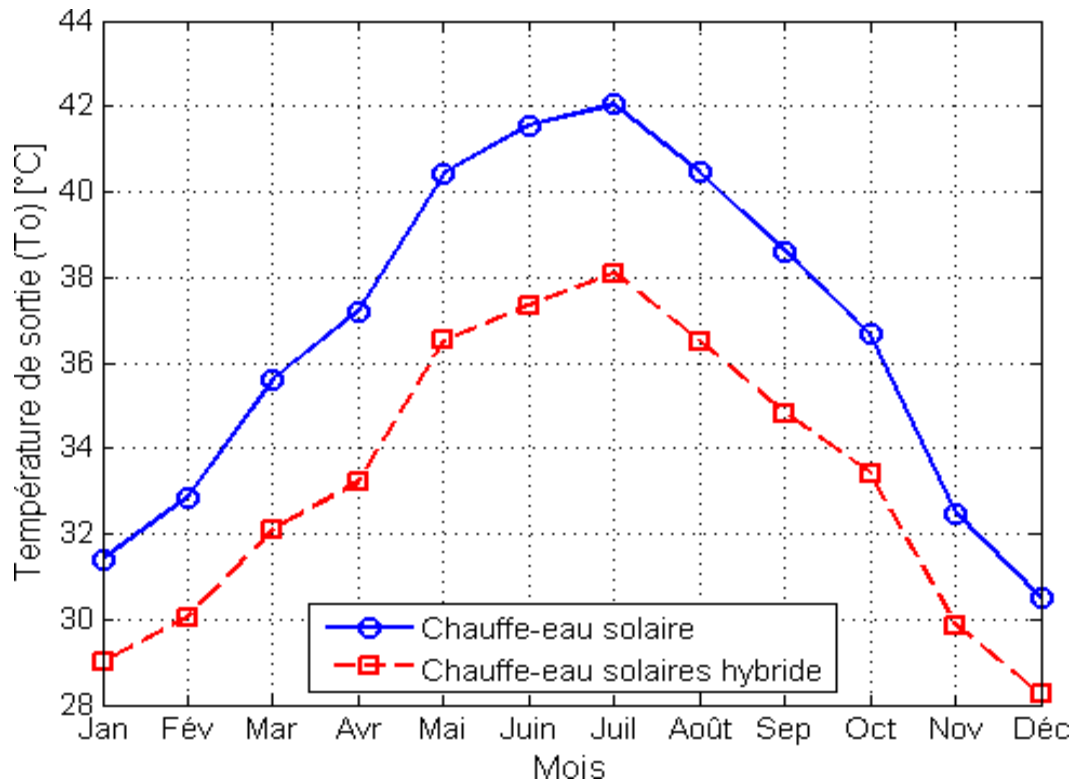


Figure IV.27: Températures de l'eau de sortie des chauffe-eau solaires à Ouargla – 2024

Ce graphique montre l'évolution de la température de sortie de l'eau du capteur solaire au cours de l'année 2024, en comparant le système classique au système hybride. On remarque que la température est constamment plus élevée dans le système classique que dans le système hybride tout au long de l'année. En janvier, la température est d'environ 32°C pour le classique et 29°C pour l'hybride. Elle augmente progressivement pour atteindre un maximum en juillet, avec environ 42°C pour le classique et 38°C pour l'hybride. Ensuite, elle diminue graduellement jusqu'en décembre, où elle atteint environ 31°C pour le classique et 28°C pour l'hybride. Cette différence s'explique par le fait que le capteur classique est dédié exclusivement à la production de chaleur, tandis que le capteur hybride répartit le rayonnement solaire entre la production thermique et électrique, ce qui réduit légèrement la température de sortie.

IV.11. Comparaison de l'efficacité des chauffe-eau solaires hybrides et classiques dans la production d'énergie Ouargla – 2024

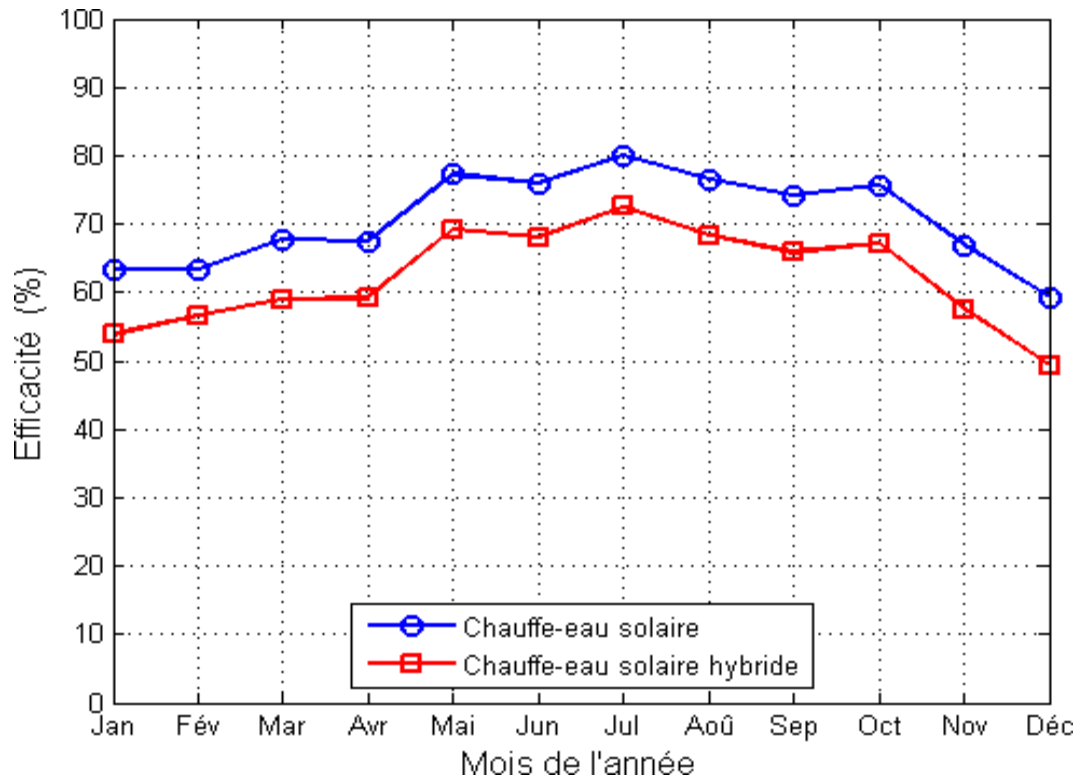


Figure IV.28: Analyse mensuelle des performances du chauffe-eau solaire durant l'année 2024

Ce graphique illustre l'évolution du rendement global des chauffe-eaux solaires classique et hybride au cours de l'année 2024. On observe que le rendement global du système hybride est supérieur à celui du système classique tout au long de l'année, grâce à sa double production d'énergie thermique et électrique. Bien que le rendement thermique seul puisse être plus élevé dans le système classique, l'apport électrique dans le système hybride améliore considérablement son efficacité globale. Cette différence est particulièrement notable durant les mois d'été, où le rayonnement solaire intense permet au système hybride de générer davantage d'électricité. En hiver, cette différence diminue en raison de la baisse du rayonnement solaire.

IV.14. Comparaison des performances entre le système classique et le système hybride :

IV.14.1. Comparaison de l'énergie thermique utile (Qu) :

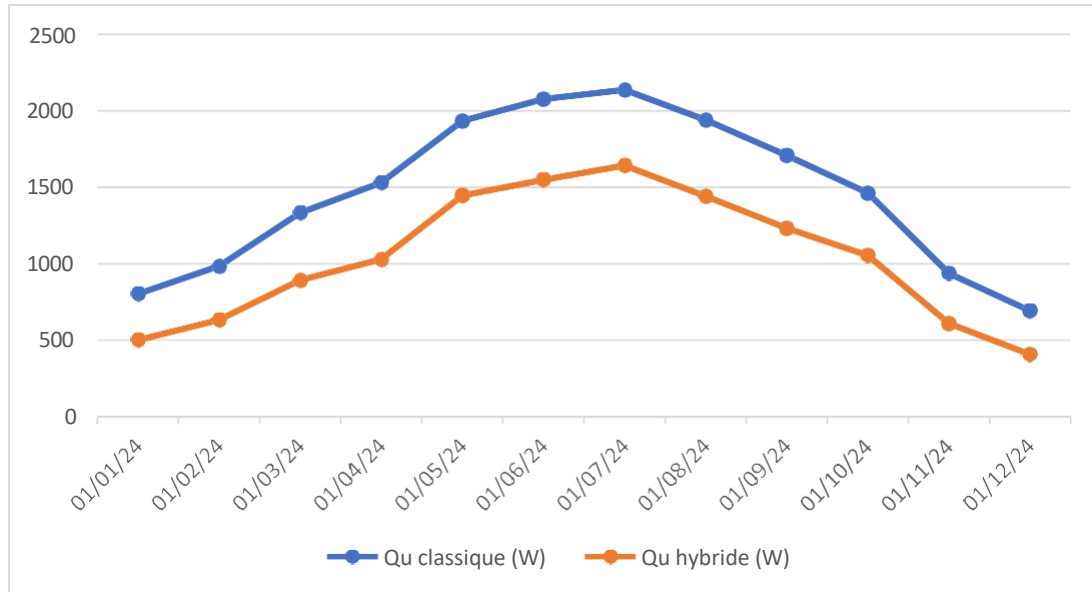


Figure IV.29 : La Comparaison de l'énergie thermique utile (Qu)

Le graphique compare l'énergie thermique utile (Qu) des systèmes classique et hybride en 2024 à Ouargla. Les deux atteignent leur pic de production en été, notamment entre mai et juillet. Le système classique se distingue par une production supérieure tout au long de l'année, témoignant d'un meilleur rendement dans la conversion de l'énergie solaire en chaleur. En hiver, la production diminue en raison de la baisse du rayonnement solaire.

IV.14.2. Comparaison de Température de sortie de l'eau :

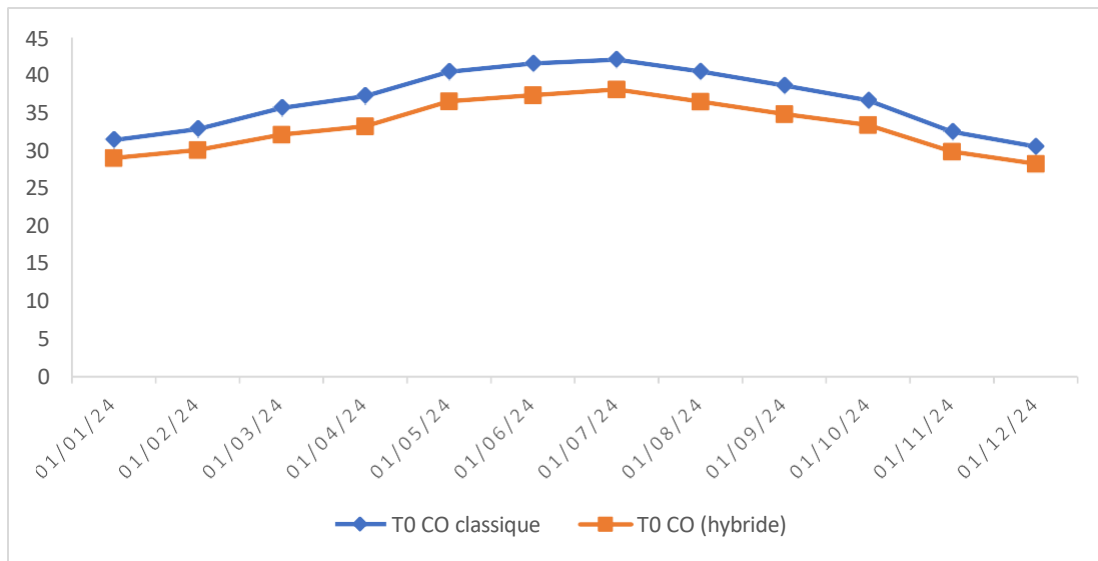


Figure IV.30: Comparaison de température de sortie de l'eau

Ce graphique illustre une comparaison des températures de sortie de l'eau (T0 CO) entre un système classique et un système hybride tout au long de l'année 2024. On remarque que les deux systèmes suivent une tendance similaire, avec une augmentation progressive des températures jusqu'à un pic en été (entre juin et août), suivie d'une diminution vers la fin de l'année. Le système classique affiche une légère supériorité en termes de température, avec un écart de 1 à 2 °C par rapport au système hybride dans la plupart des mois. Cela indique que le système classique chauffe l'eau un peu plus efficacement, bien que le système hybride reste performant et proche en termes de résultats.

IV.14.3. Comparaison de l'efficacité thermique (η_{th}) :

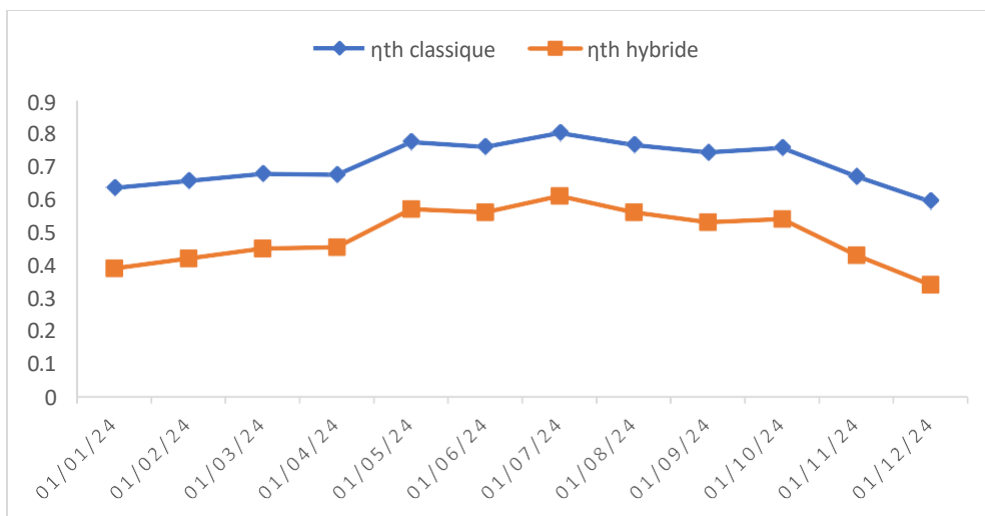


Figure IV.31: La Comparaison de l'efficacité thermique (η_{th})

Le graphique présente une comparaison de l'efficacité thermique entre un système classique (η_{th} classique) et un système hybride (η_{th} hybride) tout au long de l'année 2024. On remarque que le système classique maintient une efficacité thermique nettement supérieure, variant entre 0,6 et 0,8, avec un pic durant les mois de juin et juillet. En revanche, le système hybride présente une efficacité plus faible, oscillant entre 0,35 et 0,55, malgré une légère amélioration au milieu de l'année. Cela indique que le système classique est globalement plus performant et plus stable que le système hybride sur l'ensemble de la période observée.

IV.14.4. Comparaison de l'efficacité global :

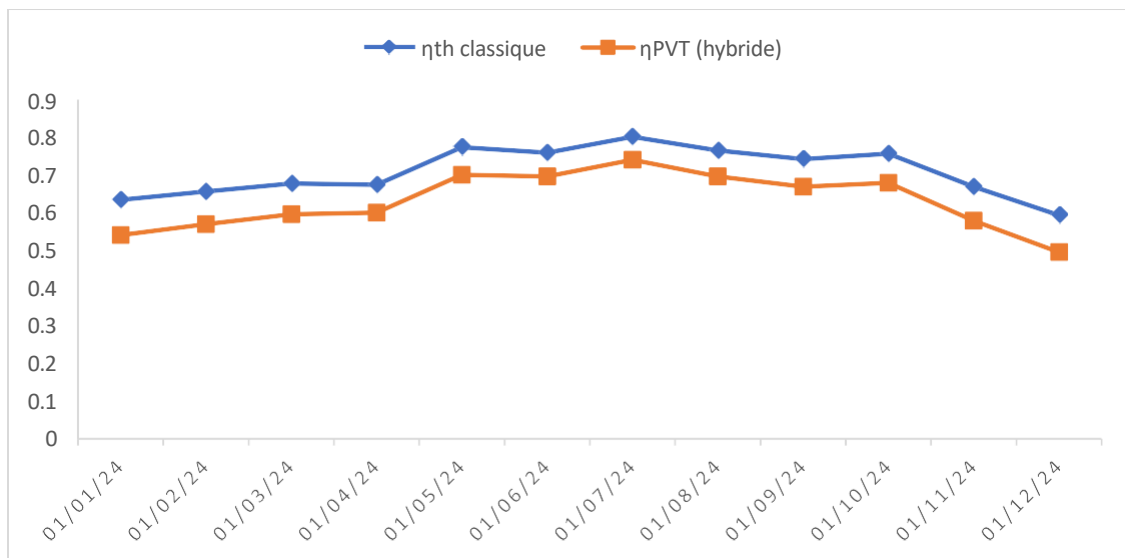


Figure IV.32: La Comparaison de l'efficacité global

Ce graphique présente une comparaison de l'efficacité globale entre le système classique (η_{th} classique) et le système hybride PVT (η_{PVT} hybride) tout au long de l'année 2024. On observe que les deux systèmes affichent des performances relativement proches, avec des valeurs d'efficacité comprises entre 0,55 et 0,8, atteignant leur maximum en juin et juillet. Bien que le système classique conserve une légère supériorité tout au long de l'année, l'écart reste faible, ce qui témoigne d'une amélioration notable de la performance du système hybride. Cela suggère que le système PVT hybride peut constituer une alternative compétitive au système classique en termes d'efficacité globale, notamment durant les périodes de forte demande énergétique.

IV.14.5. Comparaison de l'efficacité électrique entre le panneau solaire classique et le système hybride :

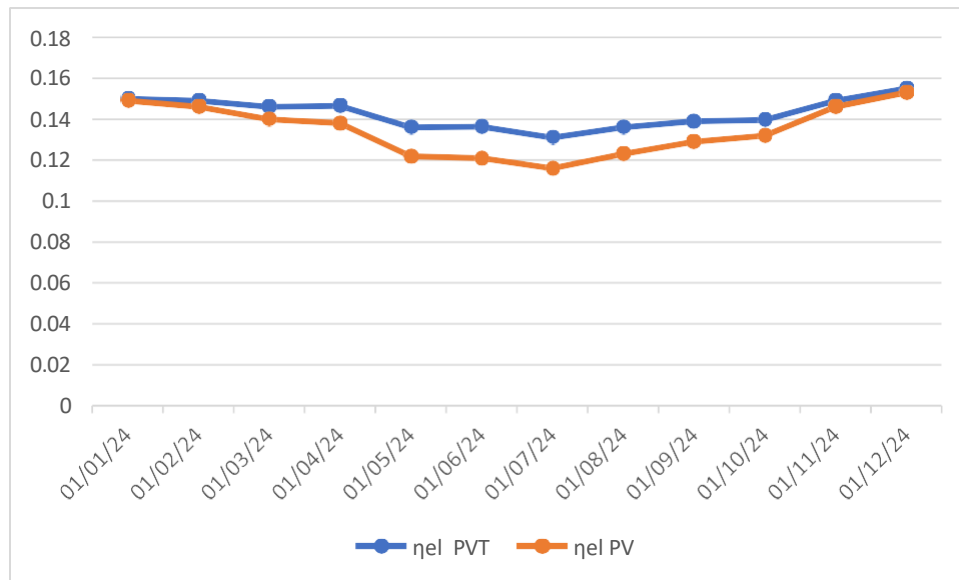


Figure IV. 33 : La Comparaison de l'efficacité électrique entre PV et PVT

Ce graphique montre une comparaison de l'efficacité électrique entre les systèmes PVT et PV au cours de l'année 2024. On observe une baisse progressive de l'efficacité pour les deux systèmes de janvier à mai, atteignant un minimum au milieu de l'année, avant de remonter progressivement jusqu'en décembre. Le système PVT affiche une performance légèrement supérieure à celle du système PV tout au long de l'année, avec un écart d'environ 0,01 à 0,015. Cela indique que l'intégration d'un système thermique au système photovoltaïque (PVT) permet une amélioration modérée mais constante de l'efficacité électrique par rapport au système PV classique.

IV.15. Améliorations du système PV/T

IV.15. 1. Modification du débit d'eau.

Effet du coefficient de récupération de chaleur sur le rendement du capteur solaire:

Chapitre IV : Résultats et discussions

Le coefficient de récupération de chaleur constitue l'un des paramètres clés influençant directement l'efficacité d'un capteur solaire thermique, car il reflète la capacité du capteur à transférer la chaleur de la plaque absorbante vers le fluide caloporteur (l'eau). L'augmentation de ce coefficient permet une amélioration significative des gains énergétiques, contribuant ainsi à de meilleures performances globales du système.

Ce paramètre est étroitement lié au débit d'eau circulant dans les tubes. Un faible débit permet à l'eau de rester plus longtemps dans les conduits, favorisant ainsi une absorption plus importante de la chaleur et une élévation notable de sa température. Toutefois, une accumulation excessive de chaleur au niveau de la plaque absorbante peut survenir en raison d'un transfert thermique insuffisant.

À l'inverse, un débit d'eau élevé entraîne une circulation rapide de l'eau dans les tubes. Cela limite le temps d'échange thermique mais permet un transfert plus efficace de la chaleur vers l'eau, réduisant ainsi la température de la plaque absorbante et améliorant le rendement du système.

Étant donné que le système étudié est un capteur solaire hybride (photovoltaïque/thermique), le maintien d'un débit d'eau optimal ne favorise pas uniquement la performance thermique, mais contribue également à refroidir les cellules photovoltaïques. Cela permet de maintenir leur efficacité énergétique en évitant les hausses excessives de température. De plus, ce débit idéal facilite le bon fonctionnement de la pompe assurant la circulation de l'eau à travers le système.

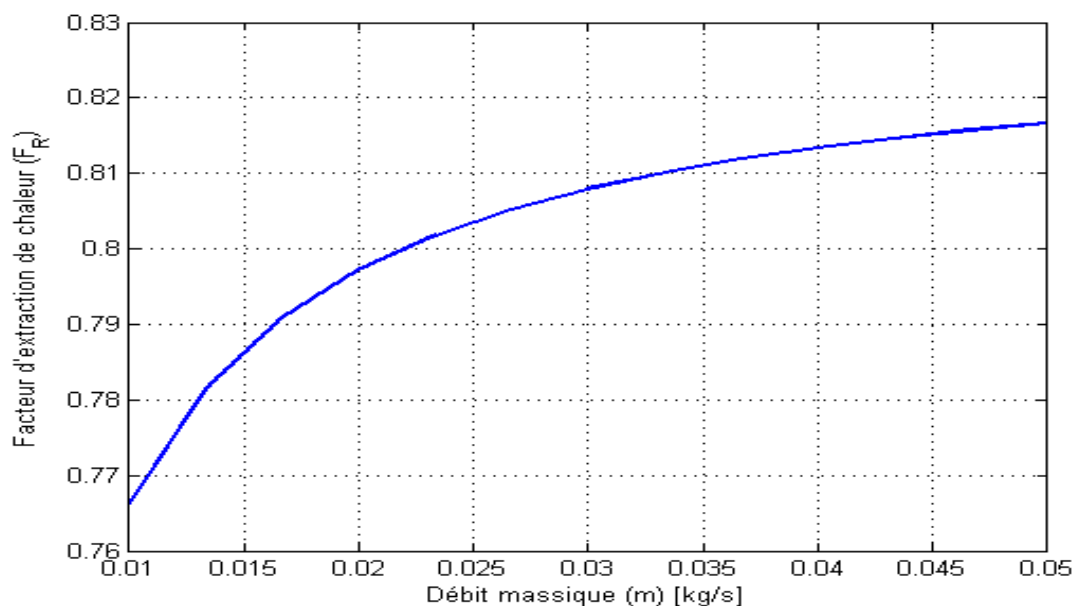


Figure IV. 34: Modification du **FR** en fonction du débit d'eau

La première courbe illustre la relation entre le facteur de récupération de chaleur et le débit massique de l'eau. On observe qu'une augmentation du débit entraîne une élévation progressive de la valeur de FR, ce qui reflète une amélioration de la capacité du capteur solaire à récupérer la chaleur. Cette augmentation est plus marquée aux faibles débits, puis tend à se stabiliser aux débits plus élevés, indiquant l'existence d'une limite pratique à l'amélioration du rendement par l'augmentation du débit.

IV.15. 2. Modifier la valeur du facteur d'efficacité du capteur solaire.

La courbe suivante représente l'effet de l'augmentation de F' sur le facteur d'efficacité du système solaire **FR**.

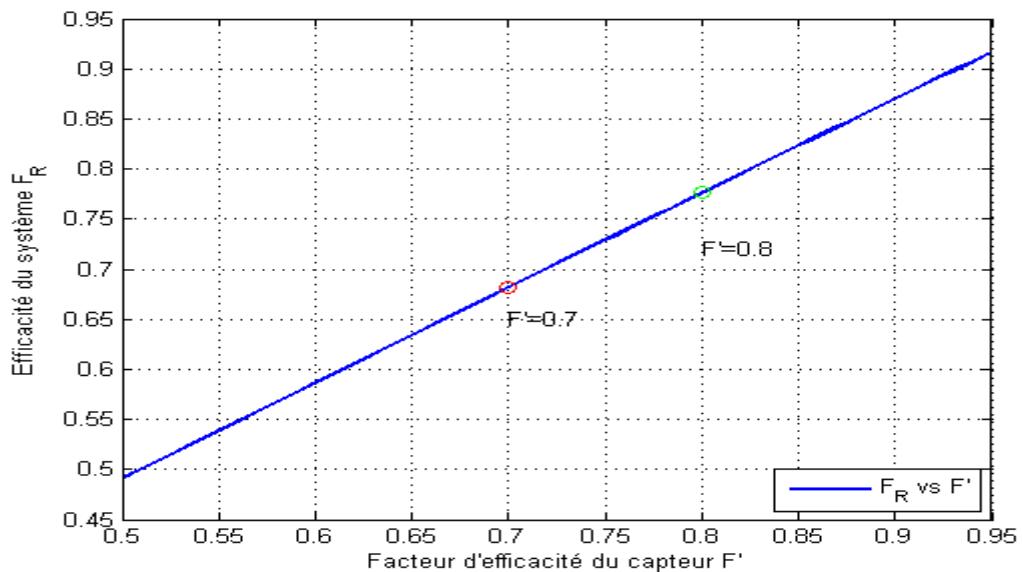


Figure IV 35: Effet de le facteur d'efficacité du capteur solaire sur l'efficacité du système solaire **FR**

La deuxième courbe montre l'impact du facteur d'efficacité interne du capteur sur l'efficacité globale. Il apparaît que la relation est quasi linéaire : l'augmentation de F' entraîne une amélioration directe de F_R . Cela indique que l'optimisation des propriétés de conduction thermique à l'intérieur du capteur (telles que le contact thermique entre les tubes et la plaque absorbante) a un effet significatif sur les performances globales du système.

IV.15. 2.1 Méthodes pour augmenter le facteur d'efficacité du capteur solaire F' .

Pour augmenter l'efficacité du capteur solaire F' , nous avons choisi de modifier le diamètre des tubes collecteurs. La courbe suivante représente l'effet de l'augmentation du diamètre des tubes collecteurs sur l'augmentation de l'efficacité du collecteur F' .

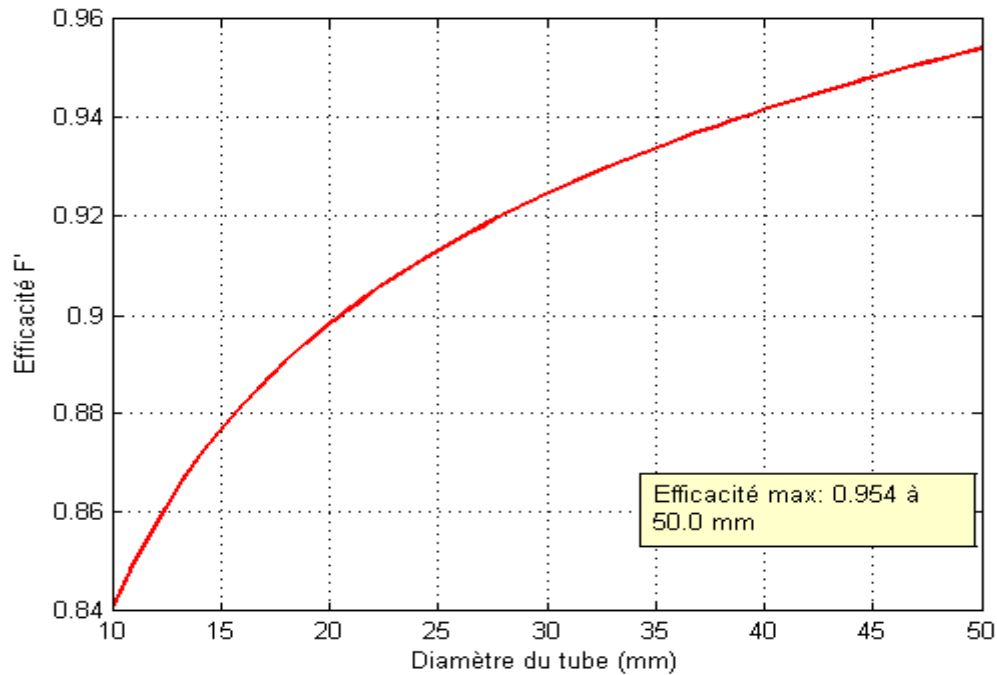


Figure IV.36 :L'effet de l'augmentation du diamètre des tubes sur l'efficacité du capteur solaire F' .

Le transfert de chaleur entre la plaque absorbante et le fluide caloporteur constitue un facteur déterminant dans le rendement global du capteur solaire. Parmi les paramètres influents, le diamètre des tubes joue un rôle essentiel. En effet, l'augmentation de ce diamètre permet d'élargir la surface de contact entre les tubes et la plaque absorbante, ce qui améliore le transfert thermique et réduit la résistance thermique entre la surface absorbante et le fluide. Cet effet est d'autant plus favorable lorsque les tubes sont bien isolés thermiquement, limitant ainsi les pertes de chaleur et optimisant la performance thermique du système.

Cependant, une augmentation excessive du diamètre des tubes peut engendrer certains inconvénients, notamment une hausse des coûts des matériaux et une réduction de la flexibilité d'installation, en raison de

Chapitre IV : Résultats et discussions

la rigidité accrue des tubes de grand diamètre. Il est donc essentiel de trouver un compromis entre l'amélioration des performances thermiques et les exigences économiques et techniques du système.

IV.16. Conclusion

Ce chapitre a présenté et analysé les résultats issus de la modélisation mathématique et de la simulation numérique des systèmes de chauffage d'eau solaire : le système classique (thermique uniquement) et le système hybride (photovoltaïque-thermique PVT), en se basant sur les conditions climatiques de la région de Ouargla durant l'année 2024.

Les résultats ont montré une supériorité claire du système classique en termes de rendement thermique, avec une efficacité (η_{th}) variant entre 0,6 et 0,8, atteignant son pic pendant les mois de juin et juillet. La température de sortie de l'eau a atteint jusqu'à 42°C en été et a chuté à 31–32°C en hiver.

Quant au système hybride, il a affiché un rendement thermique plus faible (η_{th} entre 0,35 et 0,55), avec une température de sortie maximale de 38°C en juillet. Cette baisse est due au partage du rayonnement solaire entre la production thermique et électrique.

Cependant, sur le plan électrique, le système hybride s'est révélé plus performant. Son rendement électrique (η_{el}) a varié entre 0,12 et 0,17, contre 0,10 à 0,15 pour le panneau photovoltaïque classique, grâce à l'effet de refroidissement assuré par la circulation de l'eau, limitant ainsi la surchauffe des cellules.

Concernant l'efficacité globale, le système hybride a atteint une performance compétitive, avec des rendements globaux allant de 0,65 à 0,80, proches de ceux du système classique (0,70 à 0,85), tout en assurant une double production d'énergie.

Ces résultats confirment que le système PVT hybride constitue une alternative viable, notamment dans les régions ensoleillées, à condition d'améliorer certains paramètres comme le débit d'eau et le diamètre des canaux thermiques, afin d'en optimiser le rendement énergétique.

Conclusion générale

Conclusion générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié et conçu un modèle intégré de chauffe-eau solaire hybride (PVT) combinant la production thermique et électrique dans un seul système. Notre démarche s'est appuyée sur une analyse théorique approfondie, consolidée par une modélisation mathématique rigoureuse, et validée par des simulations numériques via le logiciel MATLAB. Cette méthodologie a permis de dégager des résultats pertinents, tant sur le plan scientifique que sur le plan technique et pratique.

Les résultats issus des simulations ont montré que le système hybride proposé présente une amélioration significative de la performance globale par rapport aux systèmes traditionnels distincts, en particulier dans les zones à climat chaud comme Ouargla, où le rayonnement solaire est abondant tout au long de l'année.

Plus précisément, l'étude a révélé que :

Le rendement thermique (η_{th}) du système classique varie entre 0,6 et 0,8, atteignant un pic de 80% en juillet, contre un rendement thermique du système hybride compris entre 0,35 et 0,55.

En revanche, le rendement électrique (η_{el}) du système PVT est supérieur à celui du PV classique, atteignant jusqu'à 0,17 contre 0,15 pour le panneau photovoltaïque standard.

La température de sortie de l'eau a également été mesurée, atteignant environ 42°C dans le système classique et 38°C dans le système hybride durant les mois d'été.

Le rendement global du système hybride se situe entre 0,65 et 0,80, ce qui le rend compétitif face au système classique malgré une légère baisse thermique.

L'intégration des cellules photovoltaïques aux capteurs thermiques permet de valoriser la chaleur excédentaire, souvent perdue dans les panneaux solaires traditionnels, en la récupérant pour chauffer l'eau. Cette synergie entre production thermique et électrique améliore l'efficacité énergétique tout en réduisant la température des cellules PV, grâce au refroidissement par circulation d'eau, ce qui optimise leur performance électrique.

Conclusion générale

Par ailleurs, la modélisation mathématique a permis d'étudier l'effet des conditions climatiques (température ambiante, rayonnement solaire, vent) et des paramètres de conception (surface du collecteur, isolation, angle d'inclinaison) sur les performances. Les conditions à Ouargla se sont révélées particulièrement favorables, avec des niveaux d'irradiation dépassant souvent 700 W/m^2 en été, ce qui renforce la viabilité de ce type de systèmes pour les projets d'énergie durable dans le sud algérien.

En conclusion, cette étude démontre que le système PVT constitue une solution efficace, durable et adaptable aux besoins énergétiques locaux. Nous espérons qu'elle contribuera à encourager l'adoption de technologies solaires hybrides et qu'elle servira de fondement à de futurs travaux de recherche visant :

- ✓ L'optimisation de la conception technico-structurelle du système,
- ✓ L'intégration de dispositifs de stockage d'énergie thermique et électrique, et l'exploration de technologies de refroidissement innovantes afin de maximiser la production photovoltaïque, notamment dans les régions à fort ensoleillement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Hadri, O., & Benlamouar, A. A. (2017). Dimensionnement d'un chauffe-eau solaire. Ouargla.
- [2] Moulai, N. E. Y., & Noui, C. (2023). Optimisation d'un chauffe-eau solaire pour l'hydratation des dattes 'Deglet-Nour' sèches. Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [3] Temacini, N., & Kouacem, R. (2024). Optimisation du stockage d'énergie dans un chauffe-eau solaire (Mémoire de Master). Université Kasdi Merbah d'Ouargla.
- [4] Mehrazi, S. E., & Boudaa, S. (2020). L'influence du puisage sur un chauffe-eau solaire individuel alimentant un espace à usage de bureau. Blida.
- [5] Sekher, K., Bachi, R., & Lachi, F. (2022). Étude des performances thermiques d'une installation de chauffage solaire de l'eau et optimisation de son fonctionnement*. Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [6] Saidi, S. E., & Sais, M. E. (2019). *Étude d'une installation de production de l'eau chaude en utilisant différents systèmes d'appoint*. Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [7] Zaboubi, S. (2021). *Étude technico-économique d'une installation du chauffage solaire*. Université Mohamed Khider - Biskra.
- [8] Gama, F., Chekired, F., & Aouchiche, N. (s.d.). Étude, conception et réalisation d'un chauffe-eau solaire. ENP Belfort.
- [9] Mekki, A., & Djellab, S. (2021). Système photovoltaïque : Conception et analyse. Ouargla .
- [10] Atba, I. (2024). Étude numérique de l'effet de l'utilisation des panneaux solaires hybrides PV/T sur les comportements thermiques et cinétiques de séchage à air utilisé dans un séchoir solaire indirect. Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [11] Boutemour, M., & Bensalem, A. (2019). Conception et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Ouargla.
- [12] Messaoudi, M. T. (2021). Conception d'une résidence autonome utilisant la géothermie et l'énergie solaire dans le sud Algérien (Thèse de Doctorat). Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [13] Khenfer, N. (2021). *Contribution au développement et expérimentation d'un collecteur hybride photovoltaïque-thermique dans la zone de Ouargla* (Thèse de Doctorat). Université Kasdi Merbah - Ouargla.
- [14] Hayibo, K. S. (2016). *Modélisation et simulation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique* (Mémoire de Master). Université Ouaga I Pr. Joseph Ki-Zerbo.
- [15] Nedjar, A. (2024). *Dimensionnement et optimisation d'un système PVT avec intégration dans le bâtiment pour la production de froid* (Thèse de Doctorat). CY Cergy Paris Université, en cotutelle avec l'Université Frères Mentouri Constantine 1.
- [16] Beldjani, C. (2020). *Amélioration du refroidissement d'un module photovoltaïque par l'usage de

la nanotechnologie*. Université Mohamed Khider - Biskra.

[17] Ait Ouaret, Y., & Benkaci, A. (2021). *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau*. Université de Tlemcen.

[18] Bourouis, B., & Hachani, I. K. (2018). *Modélisation d'un capteur photovoltaïque/thermique*. Université Kasdi Merbah - Ouargla.

[19] Benbouza, C. (2014). *Production et performance des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment - cas de l'Algérie*. Université Constantine 1.

[20] Tabet, I. (2016). *Étude, réalisation et simulation d'un capteur solaire*. Université des Frères Mentouri - Constantine.

[21] Pervez, S. H., Kamran, M. A., Sallahudin, A., Khan, M. A. Z., & Faiq, M. (2021). *Development and performance analysis of hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) system*. Journal of Thermal Engineering, 7(8), Special Issue 14.

[22] Sun, V., Asanakham, A., Deethayat, T., & Kiatsiriroat, T. (2020). A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module. *Energy Reports*, 6, 1029–1042. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.04.026>

[23] Othman, M. Y., Hamid, S. A., Tabook, M. A. S., Sopian, K., Roslan, M. H., & Ibarahim, Z. (2016). Performance analysis of PV/T Combi with water and air heating system: An experimental study. *Renewable Energy*, Universiti Kebangsaan Malaysia.

[24] Duffie, J. A., Beckman, W. A., & Blair, N. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes, Photovoltaics and Wind*. John Wiley & Sons.

[25] Abdullah, A. L., Misha, S., Tamaldin, N., Mohd Rosli, M. A., & Sachit, F. A. (2019). Thermal efficiency and heat removal factor for hybrid photovoltaic thermal PVT system. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 58(1), 51–61.

[26] Nedjar, A. (2024). *Dimensionnement et optimisation d'un système PVT avec intégration dans le bâtiment pour la production de froid* (Thèse de Doctorat). CY Cergy Paris Université.

[27] NASA. (n.d.). *Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER) Data Access Viewer*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer>

[28] Brahimi, A. (2016). *Étude de performances d'un capteur solaire plan à eau*. Université de Lorraine.

[29] Mekhane, M. L., & Khedim, A. (2021). *Conception et réalisation d'un robot suiveur de ligne*. Ouargla.

[30] Hammache, M., & Boufetouh, F. (2022). Étude et conception d'un système de gestion d'énergie pour une maison intelligente. Université Kasdi Merbah - Ouargla.

[31] Bouhired, F. (2017). *Développement des chauffe-eau solaires en Algérie. CDER, Alger.

- [32] Tayseer, E., Rady, M., Ali, A. A., & Darwish, R. R. (2022). *Modeling of hybrid photovoltaic thermal water pumping system*. *Journal of Al-Azhar University Engineering Sector*, 17(62), 290–311.
- [33] Ebrahim, M. (2021). *Performance evaluation of a photovoltaic/thermal (PVT) collector with numerical modelling* (Master Thesis). KTH Royal Institute of Technology, Sweden.
- [34] AccuWeather. (2024). Ouargla, Algeria Weather on 2024. Consulté le 2 mai 2025, à partir de <https://www.accuweather.com/ar/dz/ouargla/5687/april-weather/5687>
- [35] Khenfer, A., & Naoui, A. (2022). *Étude et modélisation d'un système de chauffage d'eau à base d'énergie solaire. Ouargla.
- [36] Sayah, R., & Ouargli, S. (2023). Amélioration des performances thermiques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque et thermique (PV/T). Ouargla.
- [37] Chow, T. T. (2010). A review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology. Applied Energy, 87(2), 365–379. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy> .2009.06.037
- [38] Zondag, H. A. (2008). Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 12(4), 891–959. <https://doi.org/10.1016/j.rser>. 2005.12.012