

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRY OF HIGHER EDUCATION  
AND SCIENTIFIC RESEARCH

HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES  
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية  
École Supérieure en  
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث  
العلمي

المدرسة العليا في العلوم  
التطبيقية

*Mémoire de fin d'étude*

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Énergie et Environnement

**Présenté par : Fadli Abderrachid.  
Djezzar Abdelkrim.**

Thème

**Conception et optimisation d'un  
système couple hybride(PV/Thermique)  
pour le chauffage solaire de l'eau et la  
production d'électricité**

devant le jury composé de :

Mme N.Benahmed	Professeur	ESSA. Tlemcen	Présidente
Mme M. Bouchaour	MCA	UNIV. Tlemcen	Directrice de mémoire
M L. Merad	Professeur	UNIV. Tlemcen	Co- Directeur de mémoire
M A.Chemidi	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
M F. Oudjama	MAB	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire :2023/2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la volonté et la patience de mener à bien ce travail.

Sincères remerciements à nos encadreurs, **Mme Mama Bouchaour** et **Monsieur Laarej Merad**, pour leur écoute, leur soutien continu, leur aide précieuse, et les sages conseils prodigués tout au long de la préparation de ce mémoire.

Nous souhaitons également exprimer notre reconnaissance et nos remerciements les plus sincères aux membres du jury, à savoir madame **Benahmed Nadia** (Pr), monsieur **Chemidi Abdelkarim** (MCA) et monsieur **Oudjama Farid** (MAB), pour avoir généreusement accepté de consacrer leur temps et leur expertise à l'évaluation de ce travail.

Nous exprimons également notre gratitude envers nos professeurs, monsieur **Mohammed Mebrouki** et monsieur **Abdelkader Ghezouani**, pour leur aide précieuse.

Un grand merci à toutes les personnes ayant contribué à la préparation de cette thèse, ainsi qu'à tous nos professeurs et enseignants pour leurs efforts considérables pour nous guider et offrir un enseignement de qualité.

Enfin, merci à tous ceux qui ont offert leur aide et soutien dans la préparation de ce livre, ainsi qu'à ceux qui nous ont soutenus de quelque manière que ce soit, Nous vous remercions tous.

# *Dédicaces*

Je dédie ce travail :

À ma mère Barkaoui Mokhtaria , qui m'a enseigné à aimer et à partager, et qui m'a toujours soutenue dans mes rêves. Je t'aime plus que tout, mère chère.

À mon père Mohamed, rabi yarhmou, qui nous a quittés, ton amour, ta sagesse et ta bienveillance continuent de nous guider. Ton souvenir restera gravé dans nos cœurs à jamais.

À mon oncle Amar ,j'aimerais exprimer ma gratitude la plus sincère , qui a joué le rôle de mon père. Les conseils, la sagesse et l'amour qu'il m'a offerts ont été une véritable source d'inspiration et de soutien. Je tiens à exprimer ma gratitude pour l'amour et la dévotion qu'il a toujours manifestés envers moi. T'aime et je te suis reconnaissant pour tout.

À mes frères et sœurs : Samir,Sidahmad,Zineb et Fatiha, qui ont partagé mes bonheurs et mes souffrances, et qui continuent de me soutenir dans mes aspirations. Je vous aime énormément.

À Rassim , Douaa , Yacine et Rodaina, les enfants de mon cœur, je vous dédie ce travail avec amour et ma gratitude pour les moments de tendresse et de joie .

À ma tante maternelle Naima , qui a toujours été présente dans mon cœur, je dédie ce travail en reconnaissance de son amour et de son soutien constant. Je suis reconnaissant de l'attention et de la tendresse qu'elle m'a toujours montrées, et je l'aimerai toujours pour cela.

À mon binôme et mon ami Abdel Rachid Fadli, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables et des souvenirs précieux, qui m'a toujours été présent et m'a soutenu dans mes rêves, je dédie ce travail avec amour et ma gratitude pour les moments de joie et de rire que nous avons partagés ensemble.

À vous tous, mes proches et mes amis, je vous adresse mes plus sincères remerciements.

Avec une profonde gratitude,

## *Dédicaces*

*Je dédie ce travail à :*

- *Ma mère Bouaziz Mebrouka, son engagement constant et sa bienveillance tendre ont toujours été une véritable source d'inspiration pour moi. Je lui exprime ma profonde gratitude pour tout ce qu'elle a fait et continue de faire pour moi. Je te remercie, maman, d'incarner parfaitement la mère idéale.*
- *Mon père Mohamed, tu as toujours été plein de patience, de soutien constant et de bienveillance sincère, ce qui a joué un rôle essentiel dans la formation de mon identité actuelle. Avec toi, j'ai développé la valeur du dévouement, de l'intégrité et de la compassion envers les autres. Je suis profondément marqué par ces valeurs que tu as incarnées, et je m'engage quotidiennement à les transmettre dans mes actions.*
- *Mes frères Abderrahim et Elhadj, Vous avez été une précieuse bénédiction dans ma vie. Pendant les instants de joie comme pendant les difficultés, vous avez toujours été*

*présent, partageant les éclats de rire, apaisant les larmes, et faisant de chaque instant un souvenir important.*

*Chaque individu ajoute une dimension unique à ma vie, enrichissant ma vie grâce à son amour, son soutien et sa compréhension.*

- *Mes sœurs Fatima Zohra , Hafsa et Yamina, Aujourd'hui, je souhaite simplement exprimer ma gratitude. Je vous remercie d'être les magnifiques sœurs que vous êtes. Je vous remercie pour votre affection sans conditions, votre soutien inébranlable et votre présence apaisante. Je vous suis extrêmement reconnaissant(e) d'être présent(e) dans ma vie, et je garderai toujours notre communauté.*
- *Mon copain Djezzar Abdelkarim, je te suis infiniment reconnaissant d'avoir cru en moi et d'avoir été une part importante de cette étape de ma vie .*
- *Hanane Yacheur, Votre bienveillance et votre désir de me soutenir sont des qualités remarquables qui ne sont pas négligées. Je suis vraiment inspiré par votre aptitude à fournir des conseils pertinents et à ouvrir de nouvelles perspectives.*

## Résumé

Le système hybride PVT représente une avancée prometteuse dans le domaine de l'énergie solaire, car il combine la production simultanée d'électricité et de chaleur, ce qui en fait une solution efficace et polyvalente pour les applications résidentielles et industrielles. Les panneaux solaires hybrides utilisent le rayonnement solaire et la chaleur des cellules photovoltaïques pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou air). L'optimisation des performances de ce système permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire, ce qui contribue à réduire les coûts énergétiques et les émissions de carbone.

Après avoir simulé ce système à l'aide de MATLAB SIMULINK, les résultats de l'étude ont montré que le développement de systèmes solaires photovoltaïques peut jouer un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et plus respectueuses de l'environnement. Les résultats montrent qu'un système PVT hybride peut fournir une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'énergie solaire.

**Mot clé:** Système hybride PVT, Énergie solaire, Cellules photovoltaïques, MATLAB SIMULINK, Efficacité énergétique.

## Abstract

The hybrid PVT system represents a promising advancement in the field of solar energy, as it combines the simultaneous production of electricity and heat, making it an efficient and versatile solution for residential and industrial applications. Hybrid solar panels use solar radiation and the heat from photovoltaic cells to heat a heat transfer fluid (liquid or air). Optimizing the performance of this system allows for maximizing the use of solar energy, which helps reduce energy costs and carbon emissions.

After simulating this system using MATLAB SIMULINK, the study results showed that the development of photovoltaic solar systems can play a crucial role in the transition to more sustainable and environmentally friendly energy sources. The results indicate that a hybrid PVT system can provide greater efficiency in solar energy utilization.

**Keywords:** Hybrid PVT system, Solar energy, Photovoltaic cells, MATLAB SIMULINK, Energy efficiency.

## المخلص

يمثل النظام الهجين PVT تقدماً واعداً في مجال الطاقة الشمسية، حيث يجمع بين الإنتاج المتزامن للكهرباء والحرارة، مما يجعله حلاً فعالاً ومتعدد الاستخدامات للتطبيقات السكنية والصناعية. تستخدم الألواح الشمسية الهجينة الإشعاع الشمسي والحرارة المنبعثة من الخلايا الكهروضوئية لتسخين سائل نقل الحرارة (سائل أو هواء). يساهم تحسين أداء هذا النظام في زيادة استخدام الطاقة الشمسية إلى أقصى حد، مما يساعد على تقليل تكاليف الطاقة وانبعاثات الكربون.

بعد محاكاة هذا النظام باستخدام MATLAB SIMULINK، أظهرت نتائج الدراسة أن تطوير أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية يمكن أن يلعب دوراً حاسماً في الانتقال إلى مصادر طاقة أكثر استدامة وصديقة للبيئة. أظهرت النتائج أن النظام الهجين PVT يمكنه تحقيق كفاءة أكبر في استخدام الطاقة الشمسية.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الهجين PVT، الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، MATLAB SIMULINK، كفاءة الطاقة.

# Table de matière

Dédicaces	I
Resumé	I
Liste de Figures	IV
Liste de Tableaux	V
Abréviations	VI
Symbole	VII
Introduction Générale	1
Etat du l'art sur les systèmes solaires hybride PV/T	3
I.1 Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque /thermique (PV/T) . .	4
I.1.1 Capture du rayonnement solaire . . . . .	4
I.1.2 Conversion photovoltaïque . . . . .	5
I.1.3 Récupération de chaleur . . . . .	5
I.1.4 Refroidissement des cellules photovoltaïques . . . . .	6
I.2 Conception d'un système PV/T . . . . .	7
I.2.1 Choix des panneaux PV/T . . . . .	7
I.2.2 Intégration avec le système de chauffage d'eau . . . . .	8
I.2.3 Dimensionnement et orientation . . . . .	8
I.2.4 Maintenance et entretien . . . . .	9
I.3 Types des systèmes PV/T . . . . .	9
I.4 Avantages et Inconvénients de système hybride PV/T . . . . .	12
Modélisation d'un système PV/T	15
II.1 Modélisation de système hybride PV/T . . . . .	16
II.1.1 Définition des éléments du système PV/T utilisé pour le chauffage d'eau	16
II.1.1.1 Panneaux solaires photovoltaïques . . . . .	16
II.1.1.2 Capteurs thermiques . . . . .	18
II.1.1.3 Échangeurs de chaleur: . . . . .	19
II.1.1.4 Dispositifs de stockage thermique . . . . .	20
II.1.1.5 Système de régulation et de contrôle . . . . .	21



II.1.2	Modélisation du système photovoltaïque . . . . .	21
II.1.2.1	Paramètres d'une cellule photovoltaïque . . . . .	22
II.1.3	Modélisation du système thermique . . . . .	24
II.2	Performance électrique-thermique d'un système hybride PV/T . . . . .	27
II.2.1	Modélisation Électrique . . . . .	27
II.2.2	Modélisation Thermique . . . . .	28
II.2.3	Performance Énergétique Globale . . . . .	28
II.2.3.1	Rendement Total $\eta_{tot}$ . . . . .	29
II.2.3.2	la performance totale d'un panneau solaire hybride . . . . .	29

**Dimensionnement et simulation de système hybride PV/T (pour chauffage d'eau et produire d'électricité) . . . . . 31**

III.1	Dimensionnement d'un système photovoltaïque thermique (PV/T) . . . . .	31
III.2	Calcul des besoins thermiques . . . . .	32
III.2.1	Besoins thermiques pour chauffer l'eau . . . . .	32
III.2.1.1	Ballon de stockage . . . . .	32
III.2.2	Choix des panneaux PVT : . . . . .	33
III.2.2.1	Détermination de la puissance crête d'un système PVT . . . . .	34
III.2.2.2	Détermination le nombre serie et nombre parallèle du panneaux solaire . . . . .	35
III.2.3	Choix de l'onduleur . . . . .	36
III.2.4	Choix de batterie . . . . .	36
III.3	Application par MATLAB Simulink . . . . .	38
III.3.1	Simulation du système PV/T . . . . .	39
III.3.1.1	Fonctionnement . . . . .	39
III.3.2	Composants principaux du système PV/T . . . . .	40
III.3.2.1	Les panneaux PV/T . . . . .	40
III.3.2.2	Résistance Électrique . . . . .	41
III.3.2.3	Pompe . . . . .	41
III.3.2.4	Échangeur de Chaleur (Pipe) . . . . .	42
III.3.2.5	Réservoir de stockage (Tank) . . . . .	42
III.3.2.6	Capteurs de Température (T sens) . . . . .	43
III.3.3	Résultats de simulation . . . . .	43
III.3.3.1	Production d'énergie électrique . . . . .	43

III.3.3.2	Production d'énergie thermique . . . . .	44
III.3.3.3	Température dans L'échangeur . . . . .	45
III.3.3.4	Température de l'eau dans le réservoir . . . . .	45
III.3.3.5	État de fonctionnement de la résistance électrique . . . . .	46
<b>Conclusion Generale</b>		<b>48</b>
<b>Références</b>		<b>49</b>

## Liste des figures

I.1	Schématique du capteur hybride PV/T [1] . . . . .	4
I.2	Schéma de fonctionnement d'un système PV/T avec stockage d'eau et gestion de l'énergie [2] . . . . .	7
I.3	Configuration du capteur PV/T à air . . . . .	10
I.4	Capteur PVT à liquide . . . . .	11
II.1	Différents types de panneaux solaires photovoltaïques[3] . . . . .	17
II.2	les configurations serie et parallèle de système PV[4] . . . . .	17
II.3	Schéma principal de capteur plans[5] . . . . .	19
II.4	La structure d'un capteur à tube sous vide[6] . . . . .	19
II.5	Modèle d'un capteur à concentration[7] . . . . .	19
II.6	Échangeur air-eau[8] . . . . .	20
II.7	Échangeur fluide caloporteur-eau (serpentin) [9] . . . . .	20
II.8	Échangeur de chaleur à plaque[10] . . . . .	20
II.9	Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [11] . . . . .	21
III.1	Ballon de stockage[12] . . . . .	32
III.2	Température d'une journée en décembre(site Tlemcen) [13] . . . . .	38
III.3	Température d'une journée en décembre (site Adrar) [14] . . . . .	38
III.4	Irradiation solaire d'une journée en décembre(site Tlemcen) [13] . . . . .	39
III.5	Irradiation solaire d'une journée en décembre (site Adrar) [14] . . . . .	39
III.6	Schéma MATLAB SIMULINK d'un système PV/T . . . . .	40
III.7	Schéma de panneaux PV/T . . . . .	40
III.8	Résistance électrique pour chauffer l'eau . . . . .	41
III.9	Schéma de pompe . . . . .	41
III.10	Schéma d'échangeur de Chaleur . . . . .	42
III.11	Réservoir de stockage . . . . .	42
III.12	Capteur de température . . . . .	43
III.13	Production d'énergie électrique sur trois jours . . . . .	43
III.14	Courbe de production d'énergie thermique . . . . .	44
III.15	Courbe de température du l'échangeur . . . . .	45
III.16	Courbe qui représente la Température dans réservoir: . . . . .	46
III.17	Fonctionnement de la résistance électrique . . . . .	46

## Liste de tableaux

III.1 Profil de consommation d'électricité . . . . .	31
III.2 Caractéristiques de système PV/T [15] . . . . .	34
III.3 Caractéristiques de l'onduleur [16] . . . . .	36

## Abréviations

<b>FF</b>	Facteur de Forme
<b>MATLAB</b>	MATrix LABoratory
<b>MCP</b>	Matériaux à changement de phase
<b>MPP</b>	Maximum Power Point
<b>PV</b>	photovoltaïque
<b>PV/T</b>	photovoltaïque /thermique
<b>ROI</b>	retour sur investissement

## Symbole

<b>C</b>	La vitesse de la lumière ( $\text{m s}^{-1}$ )
<b>DOD</b>	Depth of Discharge (%) (Profondeur de décharge en français)
<b>Ec</b>	Énergie consommée pendant la disponibilité du rayonnement (J)
<b>Gi</b>	Irradiation solaire du mois le plus défavorable ( $\text{W m}^{-2}$ )
<b>I</b>	Courant nominal (A)
<b>Icc</b>	Courant de court-circuit (A)
<b>Iph</b>	Le photon-courant (A)
<b>Nj</b>	Nombre de jours d'autonomie
<b>Nb</b>	Nombre de batteries
<b>Npanneaux</b>	Nombre total des panneaux solaires
<b>Ns</b>	Nombre séries des panneaux solaires
<b>Np</b>	Nombre parallèle des panneaux
<b>Pc</b>	La puissance crête du panneau photovoltaïque (W)
<b>PN</b>	Puissance nominale des charges (W)
<b>Pi</b>	Irradiation solaire sous conditions STC ( $\text{W m}^{-2}$ )
<b>Pr</b>	Ratio de performance
<b>Rs</b>	Résistance en série ( $\Omega$ )
<b>Rsh</b>	Résistance en parallèle ( $\Omega$ )
$\rho$	Résistivité ( $\Omega \text{ m}$ )
<b>ST</b>	Surface totale du panneau solaire ( $\text{m}^2$ )
<b>Su</b>	Surface unitaire ( $\text{m}^2$ )
<b>T</b>	Température de cellule (K)
<b>VT</b>	Tension thermique (V)

Le développement majeur des petites énergies renouvelables comme le systèmes photovoltaïques. a conduit à l'intégration de systèmes hybrides, offrent de nombreux avantages en termes de production d'énergie. Parmi ces systèmes hybrides, on trouve le système hybride photovoltaïque thermique PV/T.

Lors de la conversion photovoltaïque du rayonnement solaire, une partie de l'énergie n'est pas convertie en électricité et est plutôt absorbée par la cellule photovoltaïque, ce qui entraîne une augmentation de sa température. Cette chaleur non convertie diminue l'efficacité de la cellule photovoltaïque, ce qui se traduit par une baisse de son rendement global. Ces températures élevées ont été perçues comme préjudiciables au rendement des capteurs solaires photovoltaïques et de nombreux efforts ont été déployés pour évacuer cette chaleur. On a également proposé d'utiliser ce phénomène en combinant un système photovoltaïque avec un autre.

Le capteur hybride PV/T est un système thermique qui va produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Le rendement électrique du capteur hybride PV/T pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps.

Étant donné l'épuisement des ressources énergétiques conventionnelles et leur impact négatif sur l'environnement et la santé humaine, il est devenu essentiel d'adopter des sources d'énergie propres, non polluantes et renouvelables telles que l'énergie solaire. Cette énergie peut être utilisée efficacement, par exemple, pour produire de l'eau chaude sanitaire dans des habitations solaires. L'objectif de ce projet est d'étudier une technologie spécifique de capture d'énergie solaire, telle que les capteurs photovoltaïques thermiques PV/T.

Dans le cadre de ce travail, nous intéressons à la puissance électrique et thermique d'un capteur photovoltaïque thermique PV/T. À cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. La simulation mathématique est sous MATrix LABoratory (MATLAB).

Le présent travail comporte trois chapitres:

Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique du système PV/T.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation des systèmes PV/T.

Les principaux résultats obtenus par simulation et leurs interprétations font l'objet du troisième chapitre.

Chapitre I

Etat de l'art sur les systèmes  
solaires hybrides PV/T



## Introduction

Le capteur hybride photovoltaïque thermique PV/T est un dispositif qui combine à la fois la production d'électricité et d'énergie thermique en utilisant l'énergie solaire[17].

Ce type de capteur est conçu pour répondre à la demande croissante d'électricité et de chaleur solaires, en exploitant la complémentarité entre les deux.

L'idée derrière le capteur PV/T est d'augmenter l'efficacité globale de conversion de l'énergie solaire en combinant un capteur thermique et un panneau photovoltaïque dans une seule unité.

Cette approche permet de tirer parti de synergies potentielles entre les deux systèmes, ce qui peut améliorer la performance globale du capteur.

La production totale d'énergie (électrique et thermique) d'un capteur PV/T dépend de plusieurs facteurs d'entrée, tels que le rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent, ainsi que de la température de fonctionnement du système.

Le mode d'extraction de la chaleur joue également un rôle important dans la production d'énergie. Il existe généralement deux types de capteurs hybrides PV/T: le type liquide et le type air. La différence entre les deux réside dans le caloporteur utilisé, qui peut être soit un liquide, soit de l'air. Chaque type de capteur a ses propres avantages et inconvénients, et le choix dépend des besoins spécifiques de l'application.

Ce système offre une synergie en améliorant le rendement électrique et en exploitant l'excès de chaleur des cellules photovoltaïques, tout en les préservant des dégradations au fil du temps[18].

Au fil des années, de nombreuses recherches ont été menées sur les capteurs PV/T, avec différents développements visant à intégrer le photovoltaïque et la production de chaleur dans un seul dispositif. Ces travaux de recherche ont porté notamment sur les systèmes connectés au réseau, les systèmes autonomes et les concentrateurs. PV/T systèmes ont été étudiés intensivement pour les trois dernières décennies, encore très peu de systèmes commerciaux sont disponibles sur le marché aujourd'hui[19]. Sopian et al. (1995 et 1996) ont mené des recherches sur les performances des capteurs hybrides. Dans les études mentionnées précédemment, les systèmes PV/T ont affiché un rendement thermique variant de 45 % à 65 %. Pour les capteurs hybrides, on peut envisager un rendement de conversion total qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique[20].

L'objectif principal de ces travaux était d'améliorer l'efficacité et la performance des capteurs PV/T, afin de favoriser leur adoption dans diverses applications énergétiques

## I.1 Principe de fonctionnement d'un système PV/T

Un panneau solaire hybride est composé de capteurs thermiques à très bon rendement qui sont associés à des cellules solaires photovoltaïques. Ces dernières convertissent le rayonnement solaire en électricité, tandis que les capteurs thermiques captent la chaleur émise par le soleil à l'aide d'un fluide caloporteur injecté par un échangeur ou d'un collecteur.

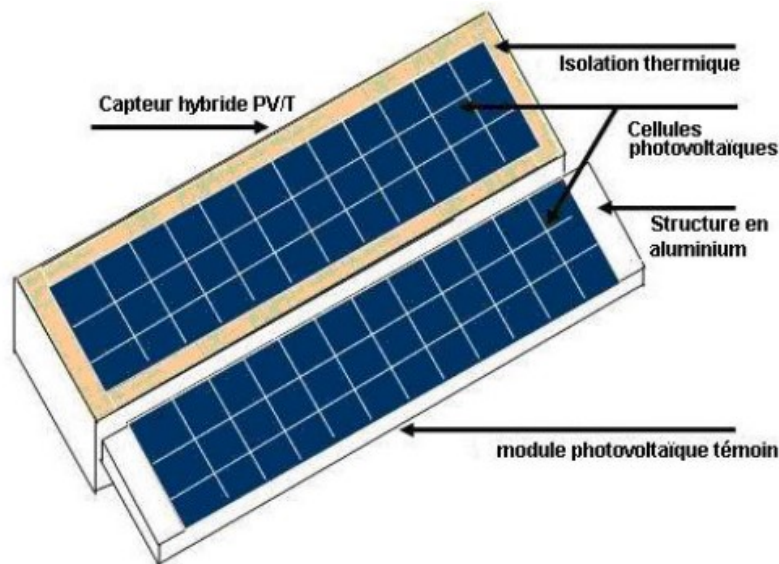


Figure I.1 Schématique du capteur hybride PV/T [1].

Plus d'électricité et de chaleur sont produites par un mètre carré de surface de PV/T que par un mètre carré de module photovoltaïque et d'un mètre carré de capteur solaire thermique installés séparément. Les systèmes combinés offrent une apparence plus homogène sur les toits et réduisent les coûts d'installation[21].

### I.1.1 Capture du rayonnement solaire

Les instruments principaux utilisés pour mesurer le rayonnement solaire sont constitués de différents capteurs qui ont été étudiés et décrits par de nombreux chercheurs au fil du temps. Les diverses catégories de ces instruments ont été étudiées par Kubin (1971) et Fritschen et Gay (1979).

Plus récemment, Bingham et Long (1985) ont établi une liste complète, mais non exhaustive, des capteurs commerciaux disponibles ainsi que certaines de leurs caractéristiques

techniques[22]. La capture du rayonnement solaire est un processus crucial dans les systèmes PV/T et dans toute technologie solaire. On peut utiliser différentes technologies pour capter le rayonnement solaire, telles que les panneaux photovoltaïques, les capteurs solaires thermiques, les miroirs concentrant et les systèmes PV/T. Toutes les technologies sont développées dans le but de transformer le rayonnement solaire en diverses formes d'énergie (électricité, chaleur, etc.).

### I.1.2 Conversion photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques utilisent des cellules solaires pour convertir directement la lumière du soleil en électricité. Ces cellules sont principalement composées de silicium et produisent de l'électricité lorsque la lumière du soleil frappe leurs surfaces[23].

### I.1.3 Récupération de chaleur

En plus de la conversion photovoltaïque, le système PV/T récupère la chaleur résiduelle provenant des cellules photovoltaïques. Cette chaleur peut être récupérée et utilisée à des fins diverses, notamment le chauffage de l'eau et des espaces intérieurs [24][25]. Voici quelques utilisations courantes de la chaleur récupérée dans les systèmes PV/T:

- Chauffage de l'eau : La chaleur résiduelle peut être utilisée pour chauffer l'eau, que ce soit pour des besoins domestiques tels que l'eau chaude sanitaire, le chauffage de piscines ou des applications industrielles nécessitant de l'eau chaude [26].
- Chauffage des espaces intérieurs : La chaleur récupérée peut être utilisée pour le chauffage des espaces intérieurs, que ce soit pour le chauffage résidentiel, commercial ou industriel. Elle peut être utilisée dans des systèmes de chauffage par le sol, des radiateurs ou des systèmes de ventilation[27].
- Processus industriels : La chaleur résiduelle peut être utilisée dans divers processus industriels nécessitant de la chaleur, tels que la stérilisation, le séchage, la cuisson ou la production de vapeur[27].
- Climatisation : Dans certains systèmes PV/T, la chaleur résiduelle peut être utilisée

pour alimenter un système de climatisation par absorption ou par adsorption, qui utilise la chaleur pour générer du froid[28].

#### I.1.4 Refroidissement des cellules photovoltaïques

Le refroidissement des cellules photovoltaïques est un aspect crucial pour maintenir leur efficacité et leur durabilité. Lorsque les cellules photovoltaïques sont exposées à la lumière solaire, elles absorbent une partie de cette énergie sous forme d'électricité, mais une autre partie est convertie en chaleur. Une élévation de température peut réduire l'efficacité des cellules photovoltaïques et affecter négativement leur performance globale. Voici quelques méthodes utilisées pour refroidir les cellules photovoltaïques dans les systèmes PV/T:

- Refroidissement par circulation d'air : Certains systèmes PV/T intègrent des canaux d'air qui passent sous les cellules photovoltaïques. L'air circule à travers ces canaux pour absorber la chaleur générée par les cellules, puis est évacué, permettant ainsi de maintenir les cellules à des températures plus basses[29].
- Refroidissement par circulation d'eau : Dans d'autres systèmes PV/T, de l'eau ou un liquide caloporteur circule à travers des canaux ou des tubes situés sous les cellules photovoltaïques. Cette circulation d'eau absorbe la chaleur des cellules et peut être utilisée pour le chauffage de l'eau ou d'autres applications thermiques[29].
- Refroidissement par contact direct : Certains dispositifs utilisent des matériaux spéciaux ou des dissipateurs de chaleur en contact direct avec les cellules photovoltaïques pour transférer la chaleur loin des cellules vers un système de refroidissement.
- Refroidissement par évaporation : Des techniques d'évaporation, telles que la pulvérisation d'eau sur les cellules photovoltaïques, peut également être utilisées pour refroidir les cellules en utilisant l'énergie de vaporisation de l'eau.

En bref, les panneaux solaires photovoltaïques/thermiques exploitent de manière plus exhaustive le potentiel énergétique du soleil en générant à la fois de l'électricité et de la chaleur, ce qui les rend particulièrement pertinents pour les applications résidentielles et commerciales qui nécessitent à la fois de l'électricité et de l'eau chaude.

## I.2 Conception d'un système PV/T

L'utilisation d'un système photovoltaïque thermique PV/T implique la combinaison de panneaux solaires et de dispositifs de captage de chaleur pour optimiser la production d'électricité et de chaleur à partir de l'énergie solaire.

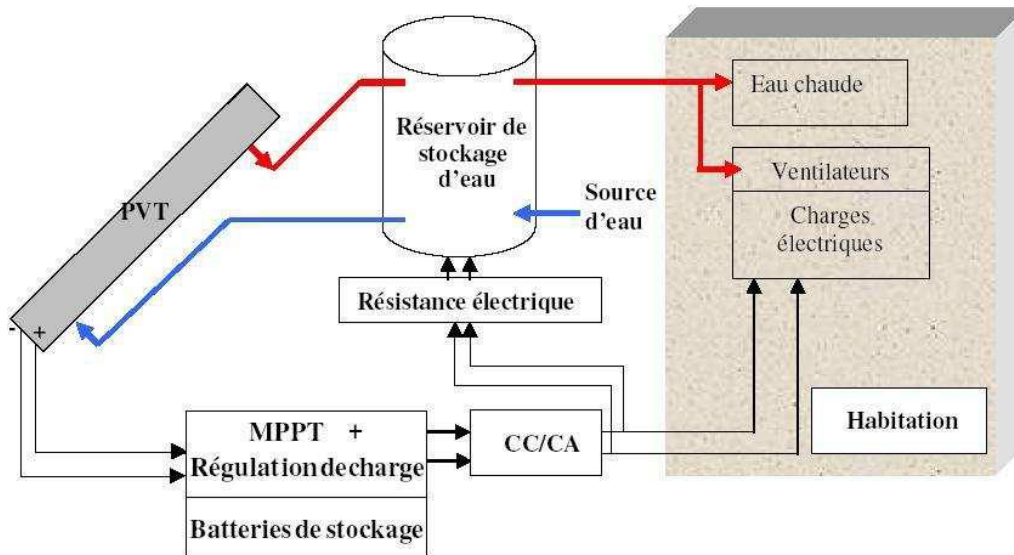


Figure I.2 Schéma de fonctionnement d'un système PV/T avec stockage d'eau et gestion de l'énergie [2].

### I.2.1 Choix des panneaux PV/T

Le choix des panneaux PV/T pour un système hybride est crucial pour assurer une performance optimale. Voici quelques aspects à prendre en compte lors de la sélection des panneaux solaires photovoltaïques/thermiques :

**Type de technologie PV/T:** Il existe diverses catégories de technologie PV/T disponibles sur le marché, chacune proposant des bénéfices particuliers en matière d'efficacité et de fonctionnalités. Par exemple

**Les panneaux solaires hybrides PV/T air-eau :** ces dispositifs exploitent la chaleur recueillie pour chauffer de l'eau, ce qui peut servir au chauffage domestique ou à d'autres fonctionnalités thermiques.

**Les panneaux solaires hybrides PV/T air-air :** exploitent la chaleur recueillie pour chauffer de l'air, fréquemment employés pour le chauffage de l'intérieur ou d'autres besoins de ventilation.

**Performance énergétique :** Analysez la performance énergétique des différentes technologies de panneaux solaires photovoltaïques/thermiques disponibles. Cela inclut la génération d'électricité grâce au solaire photovoltaïque et la génération de chaleur grâce au solaire thermique.

**Répartition de la surface et intégration :** Évaluez l'espace disponible pour la mise en place des panneaux solaires photovoltaïques ou thermiques.

**Durabilité :** Assurez-vous que les panneaux PV/T sélectionnés répondent aux normes et certifications pertinentes pour garantir leur qualité et leur sécurité.

**Coût et apport de valeur :** Comparez les coûts initiaux, l'efficacité énergétique et la durabilité pour évaluer le ROI.

### I.2.2 Intégration avec le système de chauffage d'eau

La réalisation d'un système PV/T associé à un système de chauffage d'eau peut constituer une méthode efficace pour maximiser l'efficacité de l'énergie solaire dans le secteur du chauffage d'eau. Voici quelques éléments essentiels à prendre en compte pour cette intégration :

- Un système PV/T combine généralement des panneaux photovoltaïques avec des éléments de captage thermique, permettant de générer de l'électricité tout en récupérant la chaleur du soleil.
- L'énergie générée par les panneaux solaires peut servir à fournir de l'électricité à un chauffe-eau électrique, tandis que la chaleur récupérée peut être utilisée pour chauffer l'eau via un échangeur de chaleur.
- Pour maximiser l'efficacité du système, il est recommandé d'utiliser un réservoir de stockage d'eau chaude pour conserver l'énergie solaire captée pendant les périodes où le soleil ne brille pas.

### I.2.3 Dimensionnement et orientation

Le dimensionnement approprié du système dépendra de la demande d'eau chaude, de la disponibilité de l'ensoleillement et des contraintes budgétaires. Voici les étapes et considérations im-

portantes pour le dimensionnement :

- Analyser l'utilisation quotidienne d'eau chaude dans le bâtiment ou le foyer et déterminer la température à laquelle l'eau doit être chauffée.
- Prendre en compte la production solaire disponible et calculer la capacité des panneaux PV/T en fonction de la quantité d'électricité nécessaire pour alimenter le chauffe-eau et d'autres charges électriques.
- Dimensionner le réservoir de stockage d'eau chaude pour répondre à la demande quotidienne et stocker l'énergie solaire produite pendant les périodes ensoleillées.
- Tenir compte du budget disponible pour le système, y compris les coûts d'installation, de matériaux et de maintenance.

#### **I.2.4 Maintenance et entretien**

Comme pour tout système solaire, une maintenance régulière est importante pour assurer le bon fonctionnement du système hybride PV/T. Cela peut inclure le nettoyage des panneaux, la vérification des connexions électriques, l'inspection des éléments thermiques, etc.

Il convient également de se référer aux réglementations locales et de solliciter des experts compétents pour concevoir et installer des systèmes hybrides PV/T, afin de s'assurer de la conformité aux normes de sécurité et d'efficacité énergétique.

### **I.3 Types des systèmes PV/T**

Les capteurs hybrides PV/T peuvent être classés en deux groupes, à savoir :

#### **Capteurs solaires hybrides PV/T à air**

Les capteurs solaires hybrides PV/T à air sont des dispositifs qui combinent la production d'électricité photovoltaïque et la récupération de chaleur pour le chauffage de l'air. Ils sont conçus pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire en captant à la fois la lumière du soleil pour produire de l'électricité et la chaleur pour le chauffage de l'air.

Le fonctionnement des capteurs solaires hybrides PV/T à air repose sur plusieurs composants clés. Tout d'abord, il y a les cellules photovoltaïques qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Ces cellules sont généralement intégrées dans un panneau solaire qui est exposé au

soleil. Ensuite, il y a un système de circulation d'air qui traverse le panneau solaire. L'air est chauffé par le rayonnement solaire lorsqu'il passe à travers le panneau, absorbant ainsi la chaleur. Cette chaleur peut ensuite être utilisée pour le chauffage de l'air ambiant, par exemple dans des systèmes de chauffage pour les bâtiments.



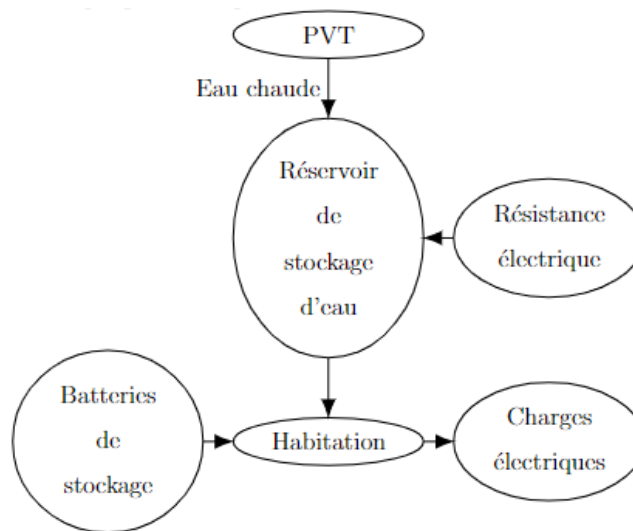
Figure I.3 Configuration du capteur PV/T à air.

En plus de la production d'électricité et du chauffage de l'air, les capteurs solaires hybrides PV/T à air peuvent également offrir d'autres avantages. Par exemple, le refroidissement des cellules photovoltaïques peut être amélioré grâce à la circulation de l'air, ce qui peut augmenter l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité. De plus, l'air chauffé peut être utilisé à d'autres fins, comme le séchage ou le chauffage de l'eau.

### Capteurs solaires hybrides PV/T avec un liquide

Les capteurs solaires hybrides photovoltaïques-thermiques (PV/T) utilisant un liquide sont des appareils qui emploient à la fois le soleil pour générer de l'électricité et la chaleur pour la récupération. Son objectif est d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en utilisant un fluide caloporteur pour capter la chaleur produite par les panneaux solaires. Le fonctionnement des capteurs solaires PV/T avec un liquide est assez similaire à celui des systèmes solaires thermiques classiques, mais avec l'ajout de panneaux photovoltaïques intégrés. Les panneaux solaires photovoltaïques convertissent la lumière du soleil en électricité, tandis que les tubes ou les plaques du capteur collectent la chaleur solaire et la transfèrent au fluide caloporteur.



Figure I.4 *Capteur PVT à liquide* .

Le fluide caloporteur peut être de l'eau, de l'huile ou un autre liquide spécialisé. Lorsqu'il circule à travers les tubes du capteur, il absorbe la chaleur générée par les panneaux solaires et se réchauffe. Ensuite, le fluide chaud est acheminé vers un échangeur de chaleur où il transfère sa chaleur à un système de stockage thermique ou à un circuit de chauffage, de ventilation et de climatisation . Cette chaleur récupérée peut être utilisée pour le chauffage de l'eau, le chauffage de l'air ambiant ou pour d'autres besoins thermiques.

L'utilisation d'un fluide caloporteur permet de refroidir les panneaux photovoltaïques, ce qui améliore leur efficacité de conversion d'énergie. En effet, les panneaux solaires photovoltaïques ont tendance à chauffer lorsqu'ils sont exposés à une forte intensité lumineuse, ce qui réduit leur rendement. En refroidissant les panneaux avec le fluide caloporteur, on maintient leur température à un niveau optimal, ce qui permet d'obtenir une production électrique plus élevée.

## I.4 Avantages et Inconvénients de système hybride PV/T

### Avantages

- **Rendement énergétique amélioré** : En combinant les technologies PV et thermique, le système hybride PV/T peut utiliser plus efficacement l'énergie solaire. Les panneaux PV convertissent la lumière du soleil en électricité, tandis que les collecteurs solaires thermiques récupèrent la chaleur pour le chauffage de l'eau ou d'autres applications thermiques. Cela permet d'obtenir une production d'énergie globale plus élevée par rapport aux systèmes PV ou thermiques autonomes.
- **Utilisation optimisée de l'espace** : Les systèmes hybrides PV/T utilisent le même espace pour la production d'électricité et de chaleur, ce qui permet une utilisation plus efficace de l'espace disponible. C'est particulièrement bénéfique dans les environnements où l'espace est limité, comme les toits des bâtiments[30].
- **Diversité des applications** : Les systèmes hybrides PV/T peuvent être utilisés pour alimenter à la fois les besoins électriques et thermiques d'un bâtiment ou d'un processus industriel[31]. L'électricité produite peut être utilisée pour les besoins quotidiens, tandis que la chaleur produite peut être utilisée pour le chauffage de l'eau, le chauffage de l'espace, la climatisation, le séchage des cultures, etc.
- **Réduction des coûts** : En utilisant un système hybride PV/T, il est possible de réduire les coûts globaux d'installation et d'exploitation par rapport à l'installation séparée de systèmes photovoltaïques et thermiques distincts[32]. De plus, l'utilisation combinée de l'électricité et de la chaleur peut réduire les factures d'énergie[33].

### Inconvénients

- **Complexité technique** : Les systèmes hybrides PV/T sont souvent plus complexes sur le plan technique que les systèmes PV ou thermiques autonomes. Ils nécessitent des composants supplémentaires tels que des échangeurs de chaleur et des systèmes de régulation pour optimiser le fonctionnement global[34]. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires de conception, d'installation et de maintenance.
- **Dépendance aux conditions météorologiques** : Comme tout système solaire, les systèmes hybrides PV/T dépendent de l'ensoleillement pour produire de l'énergie. Des conditions

météorologiques défavorables, comme les jours nuageux ou pluvieux, peuvent réduire la production d'électricité et de chaleur. Cependant, la combinaison de la production électrique et thermique peut atténuer cette dépendance par rapport aux systèmes PV autonomes.

- **Taille limitée de la production thermique :** Les systèmes hybrides PV/T ont généralement une capacité de production thermique limitée par rapport aux systèmes thermiques autonomes. Cela peut limiter leur efficacité dans les applications nécessitant une grande quantité de chaleur, comme le chauffage centralisé dans les grands bâtiments ou les processus industriels intensifs en chaleur[34].

## Conclusion

En résumé, les systèmes hybrides PV/T représentent une option prometteuse pour tirer parti de manière efficace de l'énergie solaire, présentant des bénéfices importants en termes d'efficacité énergétique et de diversité d'utilisation. Grâce à leur aptitude à combiner la production d'électricité et de chaleur, ils sont intéressants pour différentes applications telles que les résidentielles, commerciales et industrielles. Bien que leurs difficultés techniques et leurs limitations en matière de production thermique soient présentes, leur évolution continue et leur optimisation peuvent jouer un rôle crucial dans la transition vers des systèmes énergétiques plus durables et décarbonnés.

Chapitre II

**Modélisation d'un système PV/T**

## Introduction

Dans ce chapitre, le système hybride PV/T est considéré. C'est un système solaire hybride qui permet la génération simultanée d'énergie électrique et d'énergie thermique.

L'objectif principal de ce système est d'exploiter l'énergie solaire pour produire de l'eau chaude et de l'électricité.

La modélisation d'un système hybride photovoltaïque-thermique PV/T consiste à créer un modèle mathématique qui décrit le fonctionnement et les performances du système. Ce type de système combine la production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques avec la récupération de chaleur à partir de ces mêmes panneaux.

Les équations qui expliquent comment l'énergie solaire est convertie en électricité peuvent être utilisées comme fondement du modèle photovoltaïque, telles que l'équation de Shockley-Queisser.

Le modèle a la possibilité de prendre en compte les caractéristiques du panneau, comme le rendement, la température de fonctionnement et la surface active. Quand le panneau fonctionne en mode hybride PV/T, la production d'électricité et la récupération de chaleur interagissent. On peut représenter cette interaction en considérant les pertes thermiques causées par la production d'électricité ainsi que les pertes d'efficacité du panneau photovoltaïque causées par l'élévation de la température.

Il convient de noter que le niveau de détail et la complexité du modèle peuvent varier en fonction des objectifs spécifiques de l'étude. Des modèles plus avancés peuvent prendre en compte des facteurs supplémentaires tels que les conditions météorologiques, les variations de charge, les pertes de câblage, etc.

## II.1 Modélisation de système hybride PV/T

### II.1.1 Définition des éléments du système PV/T utilisé pour le chauffage d'eau

Le système PV/T est utilisé pour chauffer l'eau en combinant des éléments photovoltaïques et thermiques pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur.

#### II.1.1.1 Panneaux solaires photovoltaïques

Ce sont des panneaux solaires qui convertissent l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques. Dans le cas d'un système PV/T pour le chauffage de l'eau, les panneaux solaires photovoltaïques génèrent de l'électricité qui peut être utilisée pour alimenter des appareils électriques ou être injectée dans le réseau électrique.

##### Types de panneaux solaires photovoltaïques

- **Panneaux polycristallins:** Leur rendement est compris entre 12% et 15%. Ils sont légèrement moins chers que les panneaux monocristallins. Leurs productions diminuent avec l'élévation de température. Il est donc conseillé de les installer sur un système d'intégration bien aéré.
- **Panneaux monocristallins:** Leur rendement est plus élevé que les panneaux polycristallins (15% à 18%). À production égale, les panneaux monocristallins nécessiteront donc une surface de toit plus petite. Privilégiez ce type de modules si votre espace est limité. Les panneaux monocristallins sont en revanche légèrement plus chers. Tout comme les panneaux polycristallins, ils sont sensibles aux élévations de températures.
- **Panneaux amorphes:** Ce sont des modules souples généralement utilisés sur de grandes toitures plates (entrepôts...). Ils se combinent efficacement avec un système d'étanchéité. Leur rendement est de l'ordre de 7% à 9%.

En revanche, les panneaux amorphes sont plus performants que les panneaux cristallins en lumière diffuse (nuage, ombre). Ils peuvent donc être intéressants dans les régions où l'ensoleillement est plus faible. Ils sont également moins sensibles aux élévations de températures. Leur prix est inférieur aux modules poly ou mono cristallins. À leurs débuts, les panneaux amorphes ont pâti de problèmes de dégradation rapide du rendement. Ces défauts semblent

avoir été résolus.

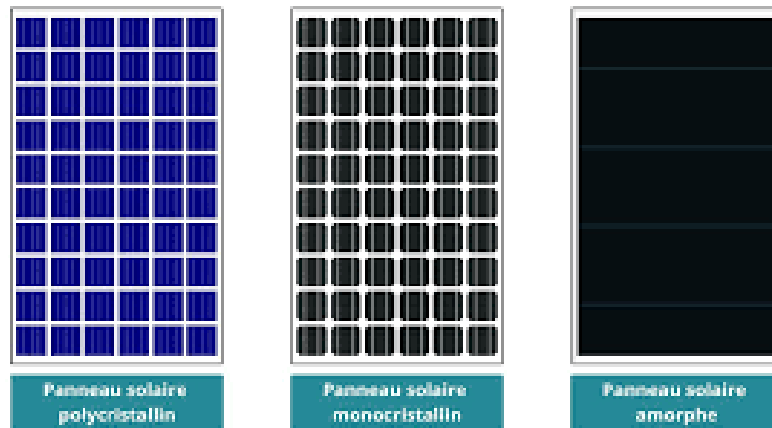


Figure II.1 Différents types de panneaux solaires photovoltaïques[3].

### Configurations d'installation

- **Configuration en parallèle:** Les panneaux solaires photovoltaïques sont connectés à la même source électrique. Cette configuration est couramment utilisée lorsque la priorité est donnée à la production d'électricité plutôt qu'à la chaleur.
- **Configuration en série:** Les panneaux solaires photovoltaïques sont connectés en série. Cette configuration est couramment utilisée lorsque la priorité est donnée à la production de chaleur plutôt qu'à l'électricité.
- **Configuration mixte:** Certains panneaux sont connectés en parallèle pour la production d'électricité, tandis que d'autres sont connectés en série pour la production de chaleur. Cela permet de tirer parti des avantages des deux systèmes.

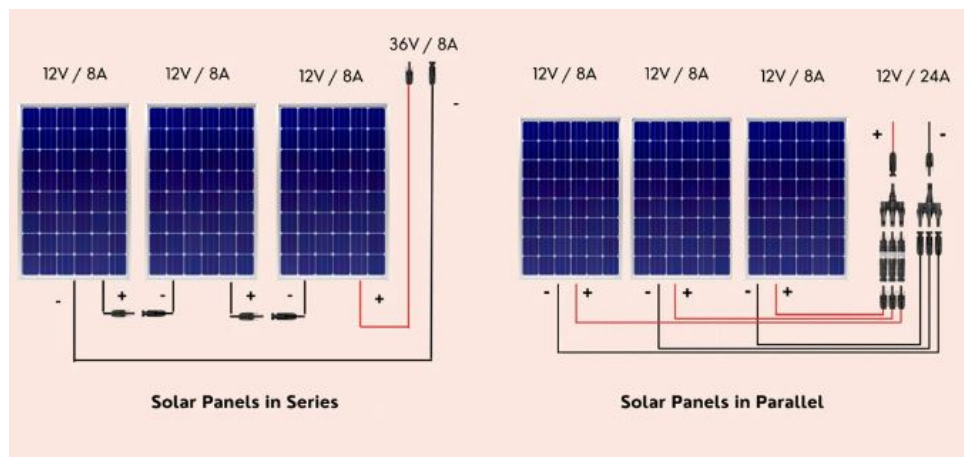


Figure II.2 les configurations serie et parallèle de système PV[4].

**Orientation et inclinaison** L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques ont un impact essentiel sur leur performance. Il est préférable qu'ils soient orientés soit vers le sud (dans l'hémisphère nord) soit vers le nord (dans l'hémisphère sud) afin de maximiser l'exposition au soleil. Il est également nécessaire d'adapter l'inclinaison des panneaux en fonction de la latitude géographique afin d'optimiser la capture de l'énergie solaire.

### II.1.1.2 Capteurs thermiques

Les capteurs thermiques sont des équipements capables de recueillir la chaleur provenant de l'énergie solaire. Dans un dispositif de chauffage de l'eau utilisant des panneaux solaires photovoltaïques/thermiques, les capteurs thermiques captent la chaleur solaire et la transmettent à un fluide caloporteur, généralement de l'eau, qui se déplace à travers les capteurs.

#### Types de capteurs thermiques

- **Capteurs plans:** Ils se composent d'un absorbeur plat, habituellement fabriqué à partir d'un matériau métallique noir, recouvert d'une couche transparente afin de diminuer les pertes thermiques. En général, les capteurs plans sont placés sur les toits ou les structures orientées vers le soleil[35].
- **Capteurs à tubes sous vide:** Ils sont composés de tubes en verre placés sous vide, où un absorbeur métallique est mis en place. Les pertes de chaleur sont réduites grâce à l'existence d'un vide dans les tubes[35].
- **Capteurs à concentration:** Ils utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière solaire sur un absorbeur. Ils peuvent atteindre des températures très élevées et sont souvent utilisés dans les systèmes PV/T pour la production de chaleur à grande échelle[35].



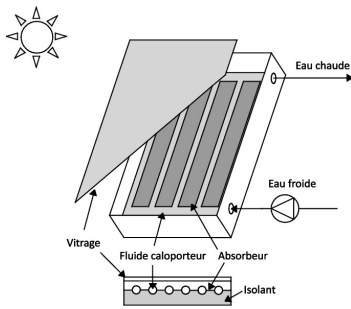


Figure II.3 Schéma principal de capteur plans[5].

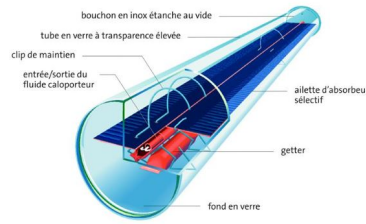


Figure II.4 La structure d'un capteur à tube sous vide[6].

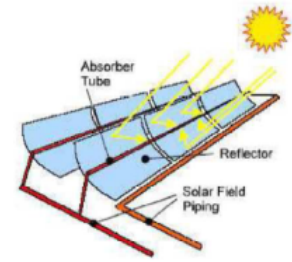


Figure II.5 Modèle d'un capteur à concentration[7].

### II.1.1.3 Échangeurs de chaleur:

Les capteurs thermiques transmettent la chaleur collectée à l'eau qui sera chauffée par les échangeurs de chaleur.

#### Types d'échangeurs utilisés:

- **Échangeur air-eau:** Un échangeur air-eau est un élément indispensable pour le transfert de chaleur entre l'air et l'eau dans différents systèmes tels que la climatisation, le chauffage, la réfrigération et les processus industriels. Il permet une régulation précise de la température, ce qui améliore l'efficacité énergétique et permet de réduire les coûts opérationnels. Bien que son installation puisse être coûteuse et complexe, ses avantages en termes de performance et de flexibilité en font un élément essentiel dans la gestion thermique des bâtiments et des procédés.
- **Échangeur fluide caloporteur-eau (serpentin):** La chaleur du fluide caloporteur est transférée vers de l'eau stockée dans un réservoir grâce à cet échangeur.
- **Échangeur de chaleur à plaque:** Il permet de transférer la chaleur entre différents fluides avec une efficacité élevée grâce à une série de plaques minces.



Figure II.6 *Échangeur air-eau*[8].



Figure II.7 *Échangeur fluide caloporteur-eau (serpentin)* [9] .

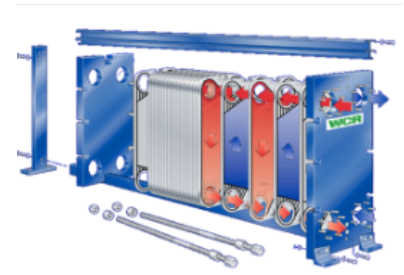


Figure II.8 *Échangeur de chaleur à plaque*[10] .

#### II.1.1.4 Dispositifs de stockage thermique

- **Réservoir d'eau chaude** : Les réservoirs d'eau chaude sont les dispositifs de stockage thermique les plus simples et les plus couramment utilisés. L'eau chaude produite par les capteurs thermiques est stockée dans un réservoir isolé pour une utilisation ultérieure. Les réservoirs d'eau chaude peuvent être de différentes tailles en fonction des besoins de chauffage ou de production d'eau chaude.
- **Ballon tampon** : Un ballon tampon est un réservoir d'eau plus grand utilisé dans les systèmes PV/T pour stocker la chaleur excédentaire produite par les capteurs thermiques. Le ballon tampon agit comme un réservoir de stockage thermique supplémentaire pour une utilisation ultérieure lorsque la demande en chaleur est plus élevée ou lorsque la production d'électricité est réduite.
- **Matériaux à changement de phase (MCP)** : Sont des matériaux qui peuvent stocker et libérer de la chaleur lorsqu'ils passent d'un état solide à un état liquide ou vice versa. Les MCP sont utilisés dans les systèmes PV/T pour le stockage de chaleur à haute densité. Les matériaux couramment utilisés comprennent les sels fondus, les paraffines à changement de phase et les hydrates métalliques.
- **Systèmes de stockage thermique avancés** : Des technologies de stockage thermique avancées, telles que les systèmes de stockage thermochimique ou les systèmes de stockage d'énergie à haute température, peuvent également être utilisées dans les systèmes hybrides PV/T. Ces systèmes utilisent des réactions chimiques ou des matériaux spéciaux pour stocker et libérer de l'énergie thermique de manière plus efficace.

### II.1.1.5 Système de régulation et de contrôle

Les flux d'eau et de chaleur dans le système PV/T sont régulés par le système de régulation et de contrôle. Il supervise la marche des pompes, des vannes et d'autres éléments afin d'améliorer le rendement du système et garantir une utilisation optimale de l'énergie solaire.

### II.1.2 Modélisation du système photovoltaïque

La figure ci-dessous présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque sous éclairement. Il correspond à un générateur de courant  $I_{ph}$  monté en parallèle avec une diode. Deux résistances parasites sont introduites dans ce schéma. Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique  $I = f(V)$  de la cellule.

**La résistance série ( $R_s$ ):** est la résistance interne de la cellule elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

**La résistance shunt ( $R_{sh}$ ):** est due à un courant de fuite au niveau de la jonction, elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée.

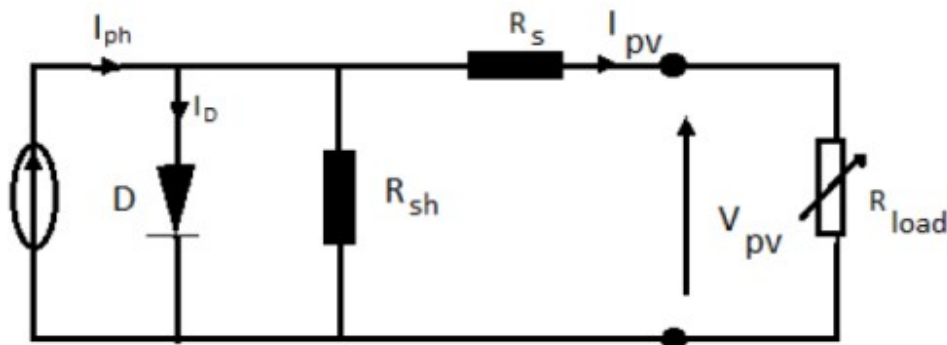


Figure II.9 Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [11].

Le modèle mathématique pour la caractéristique courant-tension d'une cellule PV est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{q(V_{pv} + N_s I_{pv} R_s)}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + N_s I_{pv} R_s}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

où :

$I_{pv}$  est le courant fourni par la cellule.

$V_{pv}$  est la tension aux bornes de la cellule.

$I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule.

$I_{sat}$  est le courant de saturation.

$q$  est la charge de l'électron ( $1.6 \times 10^{-19}$  C).

$k$  est la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K).

$T_c$  est la température effective des cellules en Kelvin (K).

$n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ).

$R_s$  est la résistance série.  $R_{sh}$  est la résistance shunt.

$N_s$  est le nombre de cellules en série dans le module.

Le photo-courant de la cellule ( $I_{ph}$ ), est variable en fonction de l'éclairage et de la température, ainsi que du courant de court-circuit. La résistance shunt  $R_{sh}$  est utilisée pour caractériser les courants de fuite de la jonction. Les différentes résistances de contacts et de connexions sont représentées par la résistance série  $R_s$ .

### II.1.2.1 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivants :

**Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) :** Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est un paramètre important dans les systèmes photovoltaïques (PV). Il représente le courant maximal qui peut circuler à travers le circuit du panneau solaire lorsqu'il est court-circuité, c'est-à-dire lorsqu'il n'y a pas

de charge connectée.

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{q(R_s I_{cc})}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.2})$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement  $I_{cc} \approx I_{ph}$ ).

**Tension de circuit-ouvert ( $V_{co}$ ) :** La tension de circuit ouvert (en anglais, open-circuit voltage ou  $V_{co}$ ) fait référence à la tension mesurée aux bornes d'un dispositif électrique ou d'un composant lorsqu'aucun courant ne circule à travers lui, c'est-à-dire lorsqu'il est en circuit ouvert.

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left( e^{\frac{qV_{co}}{nkT_c}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (\text{II.3})$$

En supposant que  $R_{sh}$  est très grand et que le terme de fuite peut être négligé, l'équation se simplifie à :

$$V_{co} = \frac{nkT_c}{q} \ln \left( \frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

où :

- $I_{cc}$  est le courant de court-circuit.
- $V_{co}$  est la tension de circuit ouvert.
- $I_{ph}$  est le photo-courant de la cellule.
- $I_{sat}$  est le courant de saturation.
- $q$  est la charge de l'électron ( $1.6 \times 10^{-19}$  C).
- $k$  est la constante de Boltzmann ( $1.381 \times 10^{-23}$  J/K).
- $T_c$  est la température effective des cellules en Kelvin (K).
- $n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ ).
- $R_s$  est la résistance série.
- $R_{sh}$  est la résistance shunt.

**Facteur de Forme :** Facteur de Forme (FF) est défini par le rapport de la puissance maximale  $P_{max}$  à la valeur du produit du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension en circuit ouvert  $V_{co}$ [36] :

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (\text{II.5})$$

La puissance maximale  $P_{\max}$  est le produit de la tension  $V_{\text{mpp}}$  et du courant  $I_{\text{mpp}}$  au point de puissance maximale "en anglais Maximum Power Point (MPP)".

$$P_{\max} = V_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}} \quad (\text{II.6})$$

Ainsi, le facteur de forme peut être réécrit comme suit :

$$FF = \frac{V_{\text{mpp}} \cdot I_{\text{mpp}}}{V_{co} \cdot I_{cc}} \quad (\text{II.7})$$

### II.1.3 Modélisation du système thermique

#### a) Bilan thermique du fluide caloporteur

Le fluide caloporteur circule à travers le panneau solaire et absorbe la chaleur du soleil. On peut modéliser le comportement du fluide en utilisant l'équation de bilan thermique suivante [27]:

$$\dot{Q}_{\text{in}} = \dot{m} c_p (T_s - T_e) \quad (\text{II.8})$$

- $\dot{Q}_{\text{in}}$  : la puissance thermique absorbée par le fluide caloporteur (W).
- $\dot{m}$  : le débit massique du fluide caloporteur (kg/s).
- $c_p$  : la capacité thermique massique du fluide (J/kg°C).
- $T_s$  : la température de sortie du fluide (°C).
- $T_e$  : la température d'entrée du fluide (°C).

**b) Bilan énergétique du panneau solaire** combinant les flux thermiques absorbés par le fluide caloporteur et les pertes thermiques du panneau, on peut écrire le bilan énergétique du panneau solaire :

$$\dot{Q}_{\text{utilisée}} = \dot{Q}_{\text{in}} - \dot{Q}_{\text{pertes}} \quad (\text{II.9})$$

**Puissance Solaire Incidente** La puissance solaire incidente sur la surface du panneau solaire

thermique dépend de l'irradiance solaire (flux de rayonnement solaire) reçu par le panneau :

$$\dot{Q}_{\text{in}} = A \times G \quad (\text{II.10})$$

Avec,

- $A$  : aire de surface du panneau solaire thermique ( $\text{m}^2$ ).
- $G$  : irradiance solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

### Puissance thermique utilisée

La quantité de chaleur transférée au fluide caloporteur circulant à travers le panneau solaire détermine la puissance thermique utilisée ou récupérée .

L'énergie thermique utile de tout système de chauffage d'eau peut être calculée à l'aide de la formule suivante [37]:

$$\dot{Q}_{\text{utilisée}} = \dot{m} c_p (T_s - T_e) \quad (\text{II.11})$$

- $\dot{m}$  : débit massique du fluide caloporteur ( $\text{kg}/\text{s}$ ).
- $c_p$  : capacité thermique massique du fluide ( $\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$ ).
- $T_s$  : température de sortie du fluide caloporteur ( $^\circ\text{C}$ ).
- $T_e$  : température d'entrée du fluide caloporteur ( $^\circ\text{C}$ ).
- $\dot{Q}_{\text{utilisée}}$  : puissance thermique utilisée par le système (W).

**c) Rendement thermique du panneau** Le rendement thermique d'un panneau solaire est défini comme le rapport entre la chaleur utile récupérée par le panneau solaire et l'énergie solaire incidente sur la surface du panneau :

$$\eta_{\text{thermique}} = \frac{\dot{Q}_{\text{utilisée}}}{\dot{Q}_{\text{in}}} \quad (\text{II.12})$$

- $\dot{Q}_{\text{utilisée}}$  : puissance thermique utilisée ou récupérée par le système (W).
- $\dot{Q}_{\text{in}}$  : puissance solaire incidente sur la surface du panneau (W).

Le rendement thermique dépend de plusieurs facteurs, tels que la conception du panneau, les matériaux utilisés, les pertes thermiques et les conditions d'exploitation.

### Coefficient d'absorption

Le coefficient d'absorption du panneau solaire indique la quantité d'énergie solaire absorbée par rapport à celle qui est incidente [31]:

$$\alpha = \frac{\text{Énergie solaire absorbée par le panneau solaire}}{\text{Énergie solaire incidente}} \quad (\text{II.13})$$

Le coefficient d'absorption est généralement une valeur comprise entre 0 et 1, où  $\alpha = 0$  signifie qu'aucune énergie solaire n'est absorbée et  $\alpha = 1$  signifie que tout le rayonnement solaire incident est absorbé.

### Pertes par conduction et convection

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = U A \Delta T \quad (\text{II.14})$$

- $\dot{Q}_{\text{cond}}$  : perte de chaleur par conduction (W).
- $U$  : coefficient de transfert de chaleur (W/m<sup>2</sup>K).
- $A$  : surface de transfert de chaleur (m<sup>2</sup>).
- $\Delta T$  : différence de température (K) à travers laquelle la chaleur est transférée.

### Pertes par rayonnement

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \epsilon \sigma A (T^4 - T_{\text{ambient}}^4) \quad (\text{II.15})$$

- $\dot{Q}_{\text{rad}}$  : perte de chaleur par rayonnement (W).
- $\epsilon$  : émissivité de la surface.
- $A$  : surface de rayonnement (m<sup>2</sup>).
- $T$  : température de la surface (K).
- $T_{\text{ambient}}$  : température ambiante (K).

### Température de fonctionnement

Le rendement thermique du panneau solaire peut être affecté par la température de fonctionnement. En général, une augmentation de la température du panneau solaire peut réduire son efficacité, car cela peut entraîner une augmentation des pertes thermiques ou une diminution de la différence de température entre le panneau et le fluide caloporteur.



**Conditions d'ensoleillement** Le rendement thermique dépend également des conditions d'ensoleillement, telles que l'intensité du rayonnement solaire et la durée d'ensoleillement. Des conditions d'ensoleillement plus élevées peuvent entraîner une augmentation de l'énergie solaire captée et donc une amélioration du rendement thermique.

## II.2 Performance électrique-thermique d'un système hybride PV/T

L'utilisation de panneaux solaires hybrides permet de combiner la production d'électricité et de chaleur dans les systèmes PV/T (Photovoltaïque-Thermique). La modélisation de ces systèmes nécessite la représentation mathématique de leurs performances électriques et thermiques. Un aperçu des concepts et des équations essentielles employés dans la modélisation des systèmes PV/T, ainsi que des indicateurs de performance énergétique, est présenté ci-dessous.

### II.2.1 Modélisation Électrique

La production d'électricité d'un panneau photovoltaïque (PV) peut être modélisée par l'équation de puissance électrique suivante [31]:

$$P_{\text{elec}} = \eta_{\text{elec}} \cdot G \cdot A \quad (\text{II.16})$$

où :

- $P_{\text{elec}}$  est la puissance électrique produite (W),
- $\eta_{\text{elec}}$  est l'efficacité électrique du panneau PV,
- $G$  est l'irradiance solaire ( $\text{W}/\text{m}^2$ ),
- $A$  est la surface du panneau ( $\text{m}^2$ ).

L'efficacité électrique  $\eta_{\text{elec}}$  dépend de la température de fonctionnement du module PV et peut être exprimée par [38]:

$$\eta_{\text{elec}} = \eta_{\text{elec,ref}} \cdot [1 - \beta(T_{\text{cell}} - T_{\text{ref}})] \quad (\text{II.17})$$

où :

- $\eta_{\text{elec,ref}}$  est l'efficacité de référence à la température de référence,
- $\beta$  est le coefficient de température de l'efficacité électrique,
- $T_{\text{cell}}$  est la température de la cellule PV ( $^{\circ}\text{C}$ ),
- $T_{\text{ref}}$  est la température de référence ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### II.2.2 Modélisation Thermique

La production de chaleur d'un panneau thermique peut être modélisée par :

$$Q_{\text{th}} = \eta_{\text{th}} \cdot G \cdot A \quad (\text{II.18})$$

où :

$Q_{\text{th}}$  est la puissance thermique produite (W),

$\eta_{\text{th}}$  est l'efficacité thermique du panneau.

L'efficacité thermique  $\eta_{\text{th}}$  dépend de la température de fonctionnement et peut être exprimée par :

$$\eta_{\text{th}} = \eta_{\text{th},0} - a_1 \cdot (T_f - T_a) - a_2 \cdot (T_f - T_a)^2 \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$\eta_{\text{th},0}$  est l'efficacité thermique de base,

$a_1$  et  $a_2$  sont des coefficients de perte thermique,

$T_f$  est la température du fluide caloporteur ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_a$  est la température ambiante ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Le rendement thermique élevé indique que le panneau thermique peut transformer une part plus importante de l'énergie solaire reçue en chaleur bénéfique. Cela conduit à une amélioration des performances énergétiques, ce qui revêt une importance capitale pour optimiser la production de chaleur à partir des ressources disponibles.

### II.2.3 Performance Énergétique Globale

La performance énergétique globale d'un système PVT est généralement évaluée en utilisant les indicateurs suivants : Pour évaluer la performance énergétique globale d'un système PVT , on utilise généralement les indicateurs suivants :

### II.2.3.1 Rendement Total $\eta_{\text{tot}}$

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{elec}} + \eta_{\text{th}} \quad (\text{II.20})$$

### II.2.3.2 la performance totale d'un panneau solaire hybride

$$F_{\text{perf}} = \frac{E_{\text{elec}} + Q_{\text{th}}}{E_{\text{in}}} \quad (\text{II.21})$$

où:

$E_{\text{elec}}$  est l'énergie électrique produite sur une période donnée (J),  $Q_{\text{th}}$  est l'énergie thermique produite sur une période donnée (J), et  $E_{\text{in}}$  est l'énergie solaire incidente sur la surface du panneau sur la même période (J)[39].

## Conclusion

En résumé, la modélisation des systèmes photovoltaïques thermiques (PV/T) joue un rôle crucial dans l'amélioration et l'évolution de cette technologie. En permettant une analyse approfondie et des ajustements précis de paramètres variés tels que les conditions climatiques, les choix de matériaux, et les configurations spécifiques, la modélisation contribue à maximiser l'efficacité et la performance des systèmes PV/T. Par ailleurs, grâce à l'utilisation de méthodes de simulation avancées, il est possible d'évaluer de multiples scénarios, d'optimiser l'implantation des systèmes et de prendre des décisions stratégiques éclairées. Cette approche favorise ainsi non seulement une exploitation optimale des ressources énergétiques, mais aussi une réduction significative des impacts environnementaux et des risques associés.

Chapitre III

**Dimensionnement et simulation de  
système hybride PV/T**

## Introduction

Capteur solaire hybride PV/T se compose de deux composants clairement distingués ; un module solaire photovoltaïque et un dispositif installé à l'arrière qui utilise un capteur thermique plat. Ce système hybride produit simultanément de l'électricité pour alimenter les appareils électriques domestiques et de la chaleur pour la production d'eau chaude sanitaire[40].

L'énergie solaire est captée et transformée en chaleur utile par des capteurs hybrides, qui utilisent un processus thermodynamique. Un fluide caloporteur, généralement de l'eau, circule dans ces capteurs et absorbe la chaleur solaire. Cette chaleur est ensuite transférée à un échangeur thermique situé dans un réservoir de stockage d'eau chaude[41].

### III.1 Dimensionnement d'un système photovoltaïque thermique (PV/T)

Pour dimensionner un système photovoltaïque thermique (PV/T) pour une salle d'ablution, nous devons prendre en compte les besoins énergétiques spécifiques en électricité et en chauffage de l'eau.

le tableau ci-dessous présente le profil de consommation d'électricité.

Type	Puissance (W)	Heures de fonctionnement (h)	Énergie journalière (kWh)
Lampe LED	10 × 15	5	0.75
Résistance chauffante	1500	4	6.00
Pompe	400	5	2.00
<b>Total</b>			8.75

Tableau III.1 *Profil de consommation d'électricité.*

## III.2 Calcul des besoins thermiques

### III.2.1 Besoins thermiques pour chauffer l'eau

Dans notre étude, nous aurons besoin de 500 litres d'eau chaude par jour , Nous supposons que la température de l'eau avant chauffage est de 20°C et après chauffage est de 40°C.

#### III.2.1.1 Ballon de stockage

Il a une capacité de 500 litres et contient un échangeur immergé à l'intérieur, comme illustré dans la figure 2.



Figure III.1 *Ballon de stockage*[12].

Pour calculer l'énergie nécessaire pour chauffer 500 litres d'eau de 20°C à 40°C, nous pouvons utiliser la formule de la chaleur spécifique.

La formule est la suivante :

$$Q = m.c.\Delta T \quad (\text{III.1})$$

Où

$Q$  = l'énergie thermique en joules (J)

$m$  = la masse de l'eau en kilogrammes (kg)

$c$  = la capacité thermique spécifique de l'eau (4,18 J/g°C ou 4180 J/kg°C)

$\Delta T$  = la différence de température (°C)

**Numériquement:**

$$Q = 500 \times 4180 \times 20 = 41800000 \text{ joules (J)}$$

Convertir les joules en kilowattheures (kWh) :

$$1 \text{ kWh} = 3,600,000$$

$$Q = \frac{41800000}{3600000}$$

$$= 11.61 \text{ kWh}$$

**Besoins énergétiques totaux:**

**Électricité : 8.75 kWh**

**Chauffage de l'eau : 11.61 kWh**

L'énergie totale nécessaire par jour, comprenant l'électricité et le chauffage de l'eau, est de **20,36 kWh**, se décomposant en 8,75 kWh pour l'électricité et 11,61 kWh pour le chauffage de l'eau.

### III.2.2 Choix des panneaux PVT :

Le tableau III.2 représente les caractéristiques des panneaux PV/T que nous utilisons.

Tableau III.2 *Caractéristiques de système PV/T [15].*

Paramètre	Valeur
Dimensions hors tout (mm)	2115 × 1052 × 35mm
Pression de travail (MPa)	0.6
Matériau du cadre	Aluminium 6063-T5
Couleur du cadre	Noir
Taille du module PV (mm)	1950 × 986 × 4.2
Puissance (W)	450
Tension à Puissance Maximale (V)	34.67
Courant à Puissance Maximale (A)	12.98
Transmittance (%)	91.50
Plaque arrière	Feuille d'aluminium gaufrée
Processus d'encapsulation	PID
Dimension du tuyau d'en-tête (mm)	Cuivre $\phi$ 22 mm
Dimension du tuyau élévateur (mm)	Cuivre $\phi$ 8 mm / 8 pièces

### III.2.2.1 Détermination de la puissance crête d'un système PVT

La puissance crête  $P_c$  d'un système PV/T est déterminée par la formule suivante :

$$P_c = \frac{E_c \cdot P_i}{G_i \cdot P_r} \quad (\text{III.2})$$

Avec ;

$E_c$  : Énergie consommée

$P_r$  : Ratio de performance (Ce facteur prend en compte les pertes et l'efficacité du système, qui est d'environ 70 à 85 %).

$P_i$  : Irradiation solaire sous conditions STC.

$G_i$  : Irradiation solaire du mois le plus défavorable.



Nous avons choisi le site de Tlemcen pour l'étude. L'irradiation solaire la plus basse est de 2.7 kWh/m<sup>2</sup> par jour en décembre. Ainsi :

$$P_c = \frac{8.75 \times 1}{2.7 \times 0.75} \approx 4.32 \text{ kWc}$$

Le nombre total de panneaux,  $N_p$ , est calculé comme suit :

$$N_p = \frac{P_c}{P_{mod}} = \frac{4.32}{0.45} \approx 9.6$$

où  $P_{mod}$  est la puissance d'un module (panneau).

### III.2.2.2 Détermination le nombre serie et nombre parallèle du panneaux solaire

#### Nombre des panneaux en serie

Le nombre de panneaux en série,  $N_s$ , est déterminé par :

$$N_s = \frac{U_{ond}}{U_{mod}} \quad (\text{III.3})$$

Avec

$U_{ond}$  : Tension de l'onduleur.

$U_{mod}$  : Tension aux bornes d'un module.

Donc :

$$N_s = \frac{48}{34.67} \approx 1.38 \implies N_s = 2$$

### Nombre de panneaux en parallèle

Le nombre de panneaux en parallèle,  $N_p$ , est déterminé par :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s} \quad (\text{III.4})$$

$$N_p = \frac{N_m}{N_s} = \frac{10}{2} = 5 \implies N_p = 5$$

Ainsi, le nombre total de panneaux est 9 panneaux.

### III.2.3 Choix de l'onduleur

La puissance d'entrée maximale de ce type d'onduleur doit être compatible avec la puissance maximale du champ photovoltaïque (PV). Elle doit respecter la condition suivante :  $0.8 P_c \leq P_{ond} \leq 1.2 P_c$ .

Donc, on choisit un onduleur caractérisé par :

<b>Type d'onduleur</b>	Hybride Non-Raccordé
<b>Tension de batterie</b>	24 V
<b>Puissance d'entrée Max (PV)</b>	3000 W
<b>Tension de sortie AC</b>	230 VAC $\pm$ 5%
<b>Tension d'entrée Max PV</b>	145 Vdc
<b>Puissance de sortie (AC)</b>	2500 W
<b>Rendement max.</b>	90% – 93%
<b>PV courant max.</b>	80 A
<b>AC courant max.</b>	30 A
<b>Fréquence</b>	50 Hz/60 Hz (détection automatique)

Tableau III.3 *Caractéristiques de l'onduleur [16].*

### III.2.4 Choix de batterie

La sélection appropriée d'un parc de batteries dépend de deux caractéristiques principales : la capacité, indiquée en ampères-heures (Ah), et la tension, mesurée en volts (V). La décision

concernant la tension des batteries est généralement basée sur la puissance nominale (PN) des appareils à alimenter. Les directives suivantes peuvent être utilisées pour déterminer la tension adéquate :

- Pour une  $P_n$  de 500 W ou moins : Utilisez une tension de 12 V.
- Pour une  $P_n$  jusqu'à 2000 W : Optez pour une tension de 24 V.
- Pour une  $P_n$  supérieure à 2000 W : Il est préférable de choisir une tension de 48 V.

Dans le cas présent, nous avons sélectionné une batterie de 24 V pour répondre aux exigences de notre système.;

Calcul du nombre de batteries (200 Ah 24 V) :

$$E_{\text{batterie}} = C \times V_b = 250 \times 24 = 6 \text{ kWh}$$

Le nombre des batteries nécessaire ( $N_b$ ) :

$$N_b = N_j \times \frac{E_c}{E_{\text{utilisable}}} \quad (\text{III.5})$$

$N_j$  : nombre de jours d'autonomie du parc de batteries

$$E_{\text{utilisable}} = E_{\text{batterie}} \times \text{DOD} \times \eta$$

Où

DOD : profondeur de décharge (0.80)

$\eta$  : rendement de batterie (0.98)

AN:

$$E_{\text{utilisable}} = 6 \times 0.8 \times 0.98 = 4.704 \text{ kWh}$$

$$N_b = \frac{8.750 \times 2}{4.704} = 3.72$$

Alors, le nombre de batteries utilisées est de 4 batteries.

### III.3 Application par MATLAB Simulink

Dans cette simulation, nous choisirons deux sites (Tlemcen et Adrar) pour notre étude.

les données météorologiques de site de Tlemcen seront présentées ci-dessous. Les caractéristiques géographiques du site de Tlemcen sont les suivantes :

Latitude : 34°, Altitude : 842 m, Longitude : 1°.

Et pour site Adrar :

Latitude: 27°52'00" Nord, Longitude: 0°17'00" Ouest, Altitude: 258 m .

#### Température

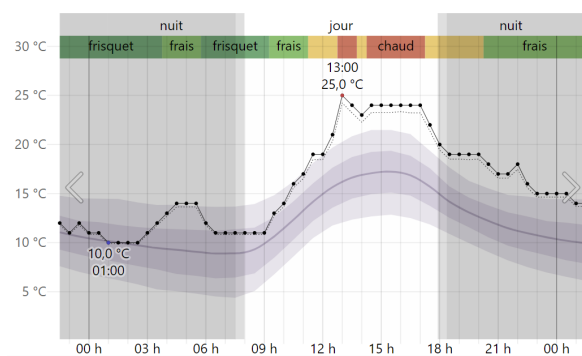


Figure III.2 Température d'une journée en décembre (site Tlemcen) [13].

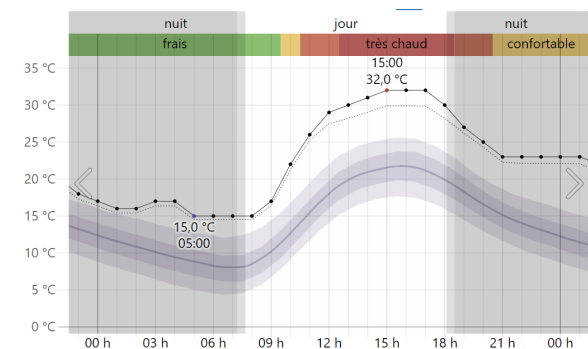


Figure III.3 Température d'une journée en décembre (site Adrar) [14].

Dans site de Tlemcen ,Durant la nuit en décembre, la température fluctue entre 10 et environ 15 °C. Elle se stabilise entre 6h00 et 9h00, avant d'augmenter progressivement pour atteindre une valeur maximale de 25 °C à 13h00.

La température à Adrar varie significativement au cours de la journée. Durant la nuit, elle commence à 17°C à minuit, atteint un minimum de 15°C à 07h30, puis redescend de 32°C à 15h à 23°C à minuit. Le matin (07h30 - 12h), elle augmente rapidement de 15°C à 26°C entre 8h et 11, puis atteint 29°C à 11h45. L'après-midi (12h - 18h), la température culmine à 32°C à 15h avant de redescendre à 29°C à 18h.

#### L'irradiation solaire

Les Figures III.4 et III.5 présente le profil de l'irradiation solaire dans chaque site . Ces données sont pertinentes et applicables à notre étude. Elles ont été enregistrées pendant une journée typique [19].

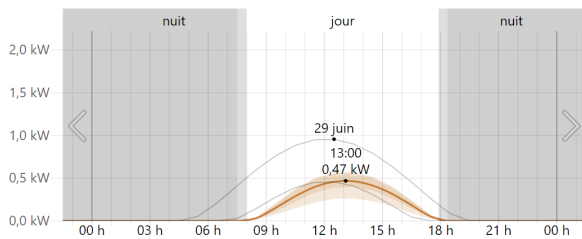


Figure III.4 Irradiation solaire d'une journée en décembre (site Tlemcen) [13].

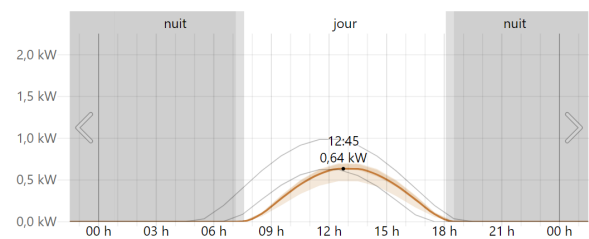


Figure III.5 Irradiation solaire d'une journée en décembre (site Adrar) [14].

Dans site de Tlemcen, Le rayonnement solaire est absent pendant la nuit et la puissance reste à 0 kW. Le matin (07h30 - 12h), le rayonnement commence à augmenter après 07h30, atteignant environ 0,6 kW à 09h et culminant vers 0,47kW à 12h45, indiquant le moment le plus intense de la journée. L'après-midi le rayonnement solaire diminue progressivement après son pic de 0,47 kW à 12h45 et revient à 0 kW vers 18h, marquant la fin de la période de jour.

À Adrar, le rayonnement solaire est nul pendant la nuit, avec une valeur de 0 kW. Le matin, entre 07h30 et 12h00, le rayonnement commence à augmenter à partir de 07h30, atteignant environ 0,3 kW à 09h00 et culminant à environ 0,64 kW à 12h45, marquant le moment le plus intense de la journée. L'après-midi, le rayonnement solaire diminue progressivement après son pic de 0,64 kW à 12h45, et redescend à 0 kW vers 18h00. marquant la fin de la période de jour.

### III.3.1 Simulation du système PV/T

Le système PV/T modélisé combine à la fois la production d'électricité et la récupération de chaleur thermique.

#### III.3.1.1 Fonctionnement

En mode ensoleillé, lorsque l'ensoleillement est suffisant, le fluide caloporteur chauffe l'eau en passant à travers les panneaux PV/T. La pompe circule le fluide chaud vers le réservoir de stockage, où l'énergie thermique est transférée à l'eau. En mode faible ensoleillement, les capteurs de température (T sens) détectent une baisse de la température de l'eau en dessous d'un seuil prédéfini. Le contrôleur de commutation active la résistance électrique pour compenser le manque de chaleur solaire. La résistance électrique chauffe l'eau jusqu'à ce que la température requise soit atteinte.

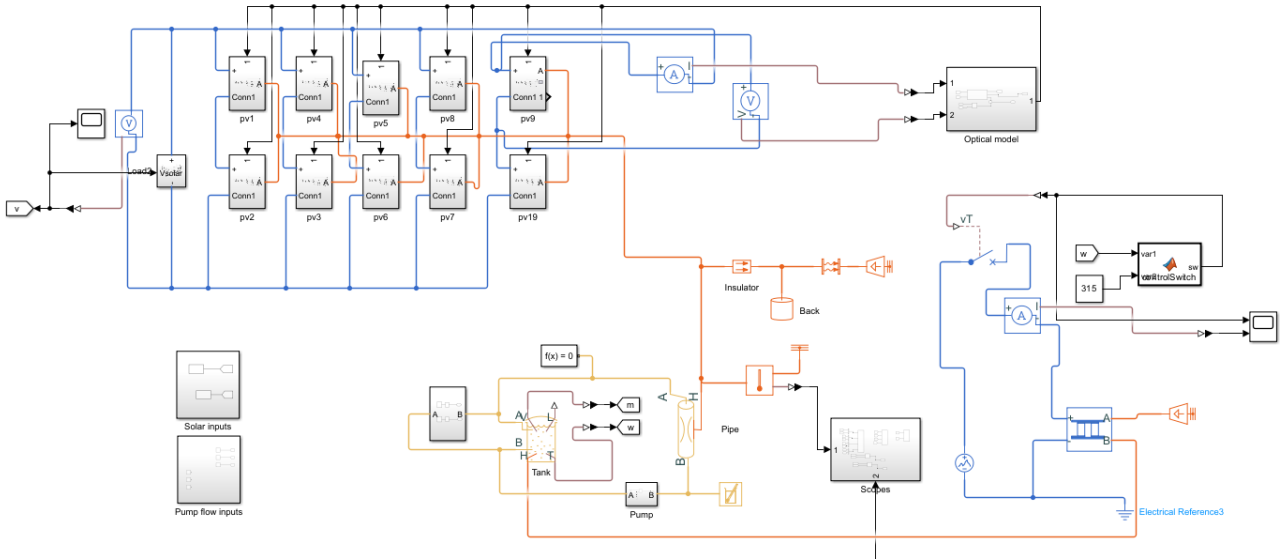


Figure III.6 Schéma MATLAB SIMULINK d'un système PV/T.

### III.3.2 Composants principaux du système PV/T

#### III.3.2.1 Les panneaux PV/T

Le schéma ci-dessous représente un système hybride photovoltaïque-thermique (PV/T) conçu pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire en produisant simultanément de l'électricité et de la chaleur. Le fluide caloporteur, initialement à température ambiante, circule à travers un réseau de tuyauterie et de vannes, capte la chaleur solaire via un échangeur de chaleur sur un panneau en verre, puis transfère cette chaleur à un échangeur secondaire. En parallèle, une cellule solaire convertit l'irradiation solaire en électricité. Ce système intégré optimise l'efficacité énergétique en combinant la production électrique et thermique, tout en refroidissant les cellules pour améliorer leur performance.

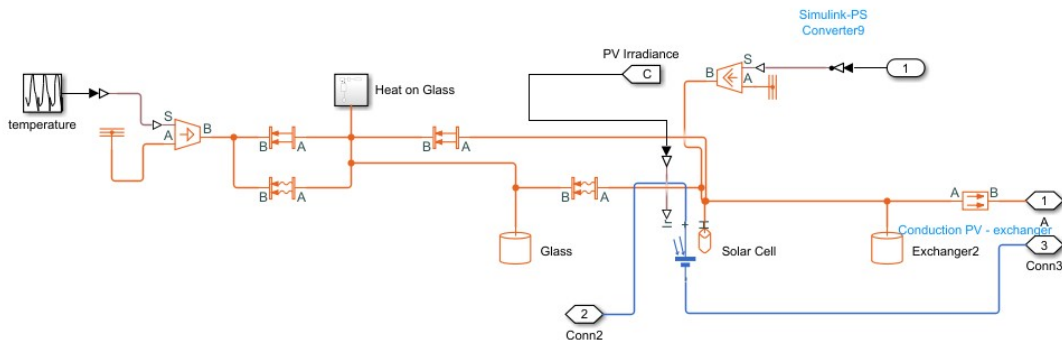


Figure III.7 Schéma de panneaux PV/T.

### III.3.2.2 Résistance Électrique

La résistance électrique est intégrée dans le réservoir de stockage d'eau (Tank), Elle est activée automatiquement lorsque le niveau d'ensoleillement est insuffisant pour maintenir la température de l'eau à un niveau requis

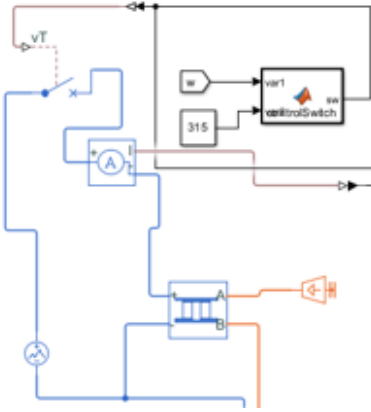


Figure III.8 Résistance électrique pour chauffer l'eau.

### III.3.2.3 Pompe

La pompe est utilisée pour faire circuler le fluide caloporteur à travers le système. Elle assure le transfert de chaleur des panneaux PV/T vers le réservoir de stockage.

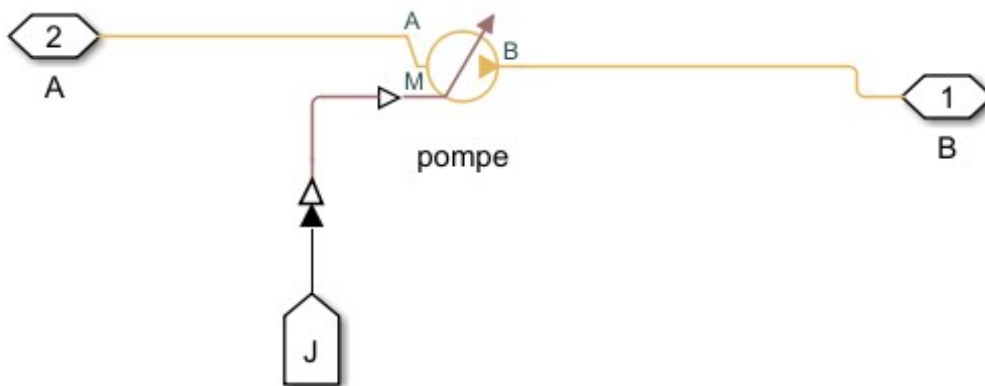


Figure III.9 Schéma de pompe.

### III.3.2.4 Échangeur de Chaleur (Pipe)

L'échangeur de chaleur est utilisé pour transférer l'énergie thermique du réservoir à d'autres parties du système ou à des applications externes. il permet de distribuer la chaleur de manière efficace et équilibrée

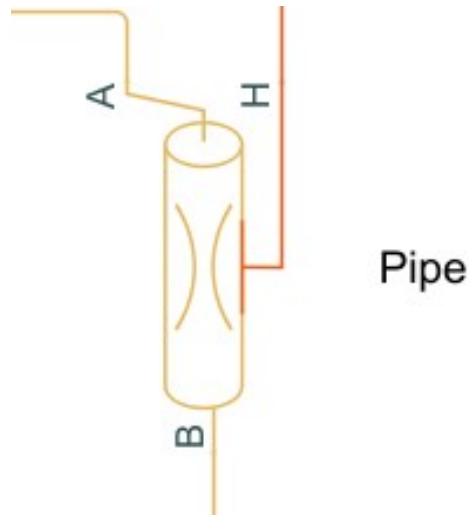


Figure III.10 Schéma d'échangeur de Chaleur.

### III.3.2.5 Réservoir de stockage (Tank)

Le réservoir de stockage est conçu pour accumuler la chaleur générée par les panneaux photovoltaïques. Cette chaleur est ensuite utilisée pour diverses applications, garantissant que l'énergie solaire est efficacement stockée et disponible même lorsque l'ensoleillement est faible.

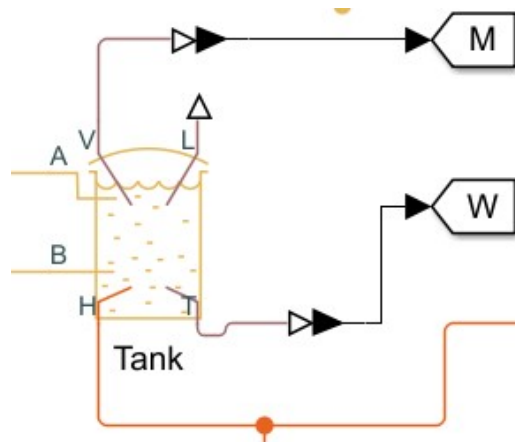


Figure III.11 Réservoir de stockage .



### III.3.2.6 Capteurs de Température (T sens)

Les capteurs de température sont intégrés dans le réservoir pour surveiller en continu la température de l'eau ou du fluide stocké. Ces capteurs fournissent des données essentielles pour le contrôle de la chaleur et l'activation de la résistance électrique si nécessaire.

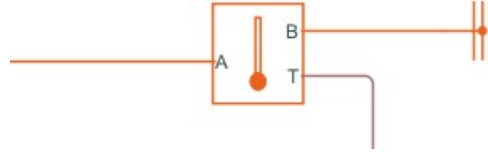


Figure III.12 Capteur de température .

### III.3.3 Résultats de simulation

#### III.3.3.1 Production d'énergie électrique

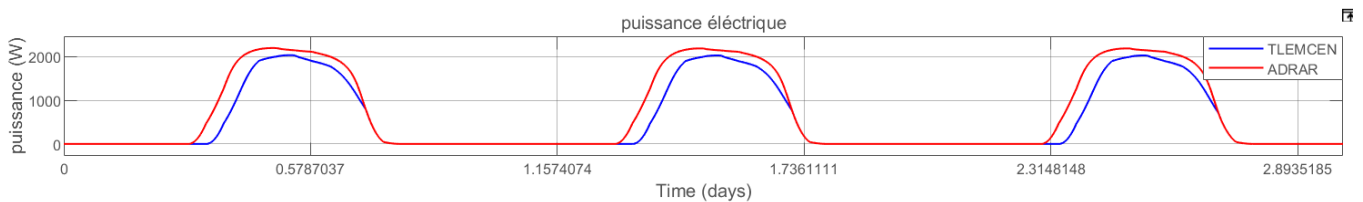


Figure III.13 Production d'énergie électrique sur trois jours .

La production d'énergie pour les sites d'Adrar et de Tlemcen suit un cycle journalier dicté par les heures d'ensoleillement. Chaque matin, la puissance démarre à zéro et augmente rapidement, atteignant un pic d'environ 2200 W pour Adrar et 2000 W pour Tlemcen . Après ce pic, la puissance redescend progressivement à zéro en fin de journée. Ce schéma symétrique indique que l'énergie est générée exclusivement pendant les heures d'ensoleillement, avec une absence totale de production la nuit. Ce comportement est typique des systèmes de production d'énergie solaire qui dépendent directement de l'intensité de la lumière solaire disponible tout au long de la journée.

Le système PV/T produit de l'énergie pendant une période de trois jours. Chaque cycle de vie quotidienne est marqué par une courbe gaussienne distinctive, ce qui suggère une dépendance directe à l'exposition au soleil. le site d'Adrar se distingue par un pic de puissance plus élevé, atteignant environ 2200 W, comparé aux 2000 W de Tlemcen. Cette différence peut s'expliquer

par des conditions d'ensoleillement plus favorables à Adrar, situé dans une région désertique, par rapport à Tlemcen, qui est dans une zone plus tempérée et susceptible de variations climatiques plus fréquentes. En somme, bien que les deux sites présentent des performances similaires, Adrar bénéficie d'une intensité solaire plus élevée, ce qui se traduit par une production d'énergie légèrement supérieure.

### III.3.3.2 Production d'énergie thermique

Le graphique ci-dessous représente deux courbes montrant la production d'énergie thermique d'un système PV/T pour les deux sites (Tlemcen et Adrar) sur une période de trois jours.

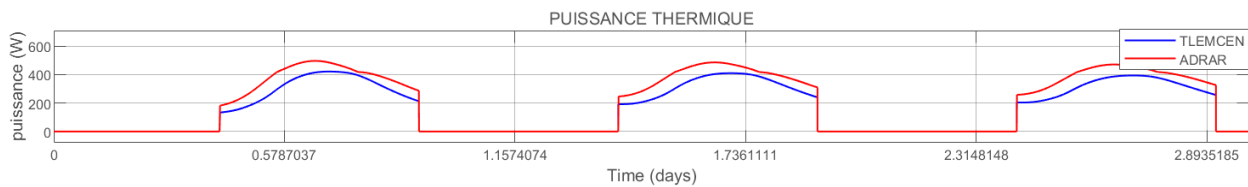


Figure III.14 Courbe de production d'énergie thermique.

La production thermique d'un système photovoltaïque thermique PV/T est intrinsèquement liée à l'irradiation solaire. Les courbes montrent clairement que, pour le site d'Adrar, la production thermique peut atteindre jusqu'à 500 W, tandis que pour le site de Tlemcen, elle atteint environ 400 W, en fonction de l'intensité de la lumière solaire. Cette production diminue lorsque le rayonnement solaire se réduit, illustrant la dépendance directe de la production thermique à l'irradiation solaire reçue. Cette disparité découle des variations dans l'irradiation solaire entre les deux sites, avec Adrar bénéficiant généralement de conditions d'ensoleillement plus intenses et constantes par rapport à Tlemcen, ce qui influence directement la performance du système photovoltaïque thermique.

Le transfert de chaleur dans un système PV/T se déroule en plusieurs étapes clés :

#### 1. Absorption de la Chaleur Solaire :

- Les panneaux PV/T captent l'énergie solaire à travers une couche de verre qui protège les cellules photovoltaïques.
- Le verre et les cellules photovoltaïques absorbent la chaleur du soleil.

## 2. Transfert de Chaleur à l’Air :

- L’air circulant à travers le panneau PV/T est chauffé par la chaleur absorbée par le verre et les cellules photovoltaïques.
- L’air chaud passe ensuite à travers le système, transférant une partie de cette chaleur.

## 3. Conduction de la Chaleur vers l’Eau :

- L’air chauffé transfère la chaleur à l’eau dans un échangeur de chaleur.
- L’échangeur de chaleur est conçu pour maximiser le transfert thermique de l’air chaud à l’eau.

4. **Circulation de l’Eau Chauffée :** L’eau chauffée est ensuite dirigée vers un réservoir de stockage ou directement vers des applications nécessitant de l’eau chaude.

### III.3.3.3 Température dans L’échangeur

Le graphique ci-dessous montrant les variations de température sur une période de trois jours de l’échangeur pour les deux sites (Tlemcen et Adrar).

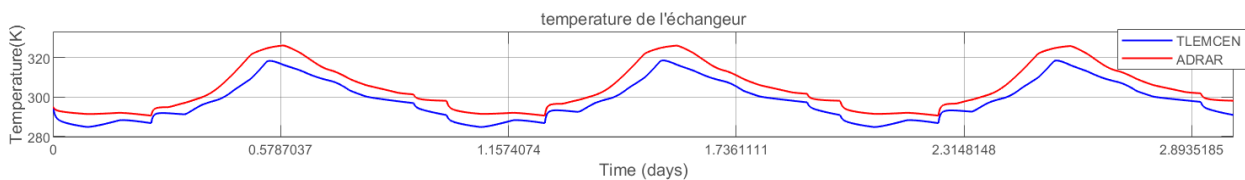


Figure III.15 *Courbe de température du l’échangeur.*

La température de l’échangeur est d’environ 325 K pendant la journée et de 295 K pendant la nuit sur le site d’Adrar. Concernant le site de Tlemcen, sa température oscille entre 319 K pendant la journée et diminue progressivement à environ 287 K pendant la nuit. Le système PVT chauffe l’eau pendant les périodes ensoleillées, ce qui augmente sa température de 290 K à 319 K.

### III.3.3.4 Température de l’eau dans le réservoir

Le graphe montre la variation de la température de l’eau dans un réservoir sur une période de trois jours, en comparant deux lieux : Tlemcen et Adrar , La température est mesurée en

Kelvin (K) et le temps est exprimé en jours.

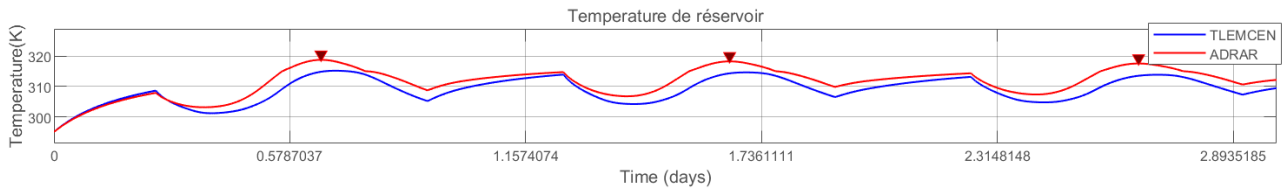


Figure III.16 Courbe qui représente la Température dans réservoir:.

**Pour Tlemcen**, la température minimale observée est d'environ 302 K, tandis que la température maximale atteint environ 315 K. Les variations diurnes de température montrent une montée progressive jusqu'à 315 K, suivie d'une descente pendant la nuit où la température est maintenue ou légèrement augmentée.

**Pour Adrar**, la température minimale est également d'environ 305 K, mais la température maximale atteint environ 320 K. La courbe de température pour Adrar montre des variations similaires à celles de Tlemcen, avec des pics légèrement plus élevés.

Tlemcen et Adrar montrent des performances similaires, bien que les pics de température soient légèrement plus élevés à Adrar, atteignant 320 K comparé à 315 K pour Tlemcen. Cela pourrait être dû à des conditions climatiques plus favorables à Adrar, comme une meilleure exposition solaire.

### III.3.3.5 État de fonctionnement de la résistance électrique

La figure III.17 présentée le fonctionnement de la résistance électrique pour le chauffage de l'eau sur une période de 3 jours pour deux sites : Adrar et Tlemcen .

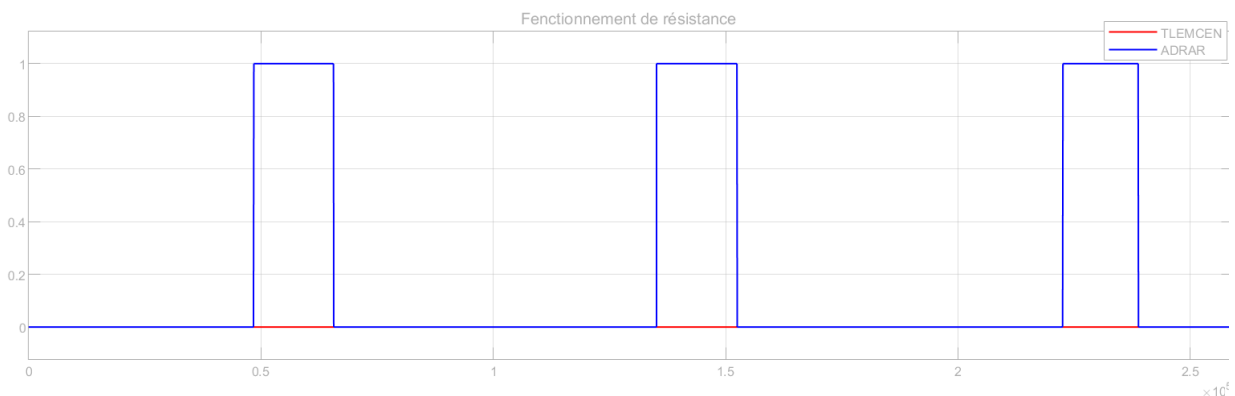


Figure III.17 Fonctionnement de la résistance électrique.

La résistance électrique fonctionne (0) de manière intermittente à Adrar, étant activée pendant certaines périodes et désactivée (1) pendant d'autres. Cela suggère que l'énergie fournie par les panneaux solaires à Adrar est suffisante pour chauffer l'eau pendant une partie de la journée, mais pas pour toute la journée et la nuit, nécessitant l'utilisation de la résistance pour compléter le chauffage lorsque l'énergie solaire est insuffisante.

En revanche, à Tlemcen, la résistance électrique est constamment activée, ce qui indique que l'énergie fournie par les panneaux solaires est insuffisante pour chauffer l'eau même pendant la journée, nécessitant ainsi l'utilisation continue de la résistance électrique pour assurer le chauffage de l'eau.

## Conclusion

Lors de la prise en compte du chauffage de l'eau par un système hybride qui intègre des panneaux photovoltaïques et thermiques pour les salles d'ablution à Adrar et Tlemcen, chaque région présente des bénéfices différents.

La simulation par MATLAB permet d'affiner ces considérations en ajustant la conception et le dimensionnement du système pour maximiser son efficacité énergétique dans chaque contexte régional.

À Adrar et Tlemcen, la production d'énergie solaire est régulièrement régulée avec des pics de puissance d'environ 2200 W à Adrar et 2000 W à Tlemcen, en fonction de l'ensoleillement. En raison de son climat désertique, Adrar a une intensité solaire plus élevée, ce qui lui confère une légère supériorité dans la production d'énergie par rapport à Tlemcen.

La production d'énergie thermique entre Tlemcen et Adrar est principalement influencée par les variations d'intensité solaire liées aux variations climatiques entre les deux régions. La production d'Adrar est légèrement plus élevée en raison de conditions d'ensoleillement plus régulières et intenses, tandis que celle de Tlemcen est similaire mais avec des niveaux légèrement plus faibles en raison de son climat.

Les performances des systèmes PV/T varient significativement selon les conditions climatiques et la période de l'année. En décembre, une période particulièrement défavorable, le site de Tlemcen montre une dépendance constante à la résistance électrique en raison de la faible production d'énergie solaire. La faible intensité de l'ensoleillement durant ce mois limite la quantité d'énergie captée par les panneaux PV/T, nécessitant un recours constant à la résistance électrique pour maintenir le chauffage de l'eau.

En revanche, Adrar bénéficie de conditions solaires nettement meilleures tout au long de l'année. Grâce à un ensoleillement plus intense et plus régulier, le site d'Adrar utilise la résistance électrique de manière intermittente, principalement la nuit, lorsque l'énergie solaire n'est pas disponible. Cela montre une utilisation plus efficace de l'énergie solaire, même pendant les périodes de moindre ensoleillement.

Adrar bénéficie de conditions d'ensoleillement favorables, ce qui permet une meilleure performance globale du système PV/T, tant en termes de production électrique que thermique. Les températures plus élevées dans l'échangeur et le réservoir d'eau confirment cette meilleure performance. Cependant, pendant les périodes estivales, le besoin de la partie thermique est réduit en raison des températures naturellement élevées. En été, les températures ambiantes élevées diminuent la demande de chauffage de l'eau, mais la production électrique reste optimisée grâce à l'abondance de la lumière solaire.

Tlemcen montre des performances réduites, particulièrement en décembre, nécessitant l'utilisation constante de la résistance électrique pour assurer le chauffage de l'eau. Cette dépendance indique une insuffisance de l'énergie solaire captée par les panneaux PV/T pour répondre aux besoins de chauffage. Les conditions climatiques moins favorables et la faible intensité du rayonnement solaire durant cette période limitent considérablement la performance du système PV/T, soulignant la nécessité d'un soutien constant par la résistance électrique.

Finalement, les systèmes PV/T sont plus efficaces dans des régions avec une bonne insolation, comme Adrar, même en hiver. Cependant, les périodes estivales à Adrar ne nécessitent que la partie électrique du système, car la région est très chaude.

## Bibliographie

- [1] K Touafek, A Malek, and M Haddadi. Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique. *Journal of Renewable Energies*, 9(3):143–154, 2006.
- [2] researchgate. "<https://www.researchgate.net>".
- [3] La maison saint-gobin. "<https://www.lamaisonsaintgobain.fr/>".
- [4] Jackery-solar-generator. "<https://fr.jackery.com>".
- [5] researchgate. "<https://www.researchgate.net/capteur-plan>".
- [6] solairethermique.guidenr. "<https://www.solairethermique.guidenr.fr/capteur-sous-vide>".
- [7] Ronesolar. "<https://www.ronesolar.com/tag/rotating-parabolic-mirror>".
- [8] Swapland. "<https://www.swapland.fr/intercooler/5793-echangeur-air-eau>".
- [9] Geurtsheatexchangers. "<https://www.geurtsheatexchangers.com/fr/products/>".
- [10] Factoryfuture. "<https://www.factoryfuture.fr/fonctionnement-echangeur-plaques>".
- [11] M. Abdillah and H. Setiadi. "design of maximum power point tracking system based on single ended primary inductor converter using fuzzy logic controller". *International Journal of Intelligent Engineering & Systems, Université Jakarta, Indonesia*, 15(1), 2022.
- [12] Bouilleur. "<https://www.bouilleur.fr/estimer-cout-pertes-ballon-ecs-ou-stockage>".
- [13] weatherspark. "<https://fr.weatherspark.com/Mto-moyenne-dcembre-Tlemcen-Algrie>".
- [14] weatherspark. "<https://r.weatherspark.com/Mto-moyenne-dcembre--Adrar-Algrie>".
- [15] ensuntec. "<https://fr.ensuntec.com/pvt-system/pvt-solar-panels.html>".
- [16] solar-esterel. "<https://solar-esterel.fr/convertisseur-2500w-dcac-pur-sinus.html>".
- [17] P. Haurant, C. Menzo, L. Gaillard, and P. Duperyat. "modélisation numérique d'un système hybride photovoltaïque/thermique intégré à un système de chauffe-eau solaire", université de lyon. *3ième Colloque International Francophone d'Energétique et Mécanique Les énergies renouvelables et la mécanique appliquée à l'industrie.*, pages 4–65, 2014.

- [18] L. Ouhsaine, A. Scipioni, M.El Ganaoui, and A. Mimet. "modélisation d'échangeur fractal pour un système hybride photovoltaïque/thermique". "présenté à Le congrès International sur les Matériaux et l'Énergie, Tunisie", 2016.
- [19] A. Khelifa. "contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique pvt". 2017.
- [20] H. Ben Cheikh El Hocine and M. Marir-Benabbas. "étude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride pvt". *Journal of Renewable Energies*, 16(2):257–268, 2013.
- [21] D. Douesand and N. Kerrouche. "étude d'un système combiné de chauffage solaire et de refroidissement en utilisant un système pv/t". *Université de Jijel*, 2021.
- [22] C Varlet-Grancher, G Gosse, M Chartier, H Sinoquet, R Bonhomme, and JM Allirand. Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. *Agronomie*, 9(5):419–439, 1989.
- [23] C.Cabal. Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, thèse doctorat. "Thèse de doctorat", "Université de Toulouse", 2008.
- [24] N.Moulay and K.Foudil. "étude théorique et expérimentale de l'influence des paramètres climatiques de la région d'adrar sur le fonctionnement des capteurs solaires". "Mémoire de Master", "université d'Adrar", 2020.
- [25] H. Mellouki and H. Mekadem. "étude paramétrique d'un capteur hybride doté d'un concentrateur parabolique composé (pvt-cpc)". "Université de Adrar", 2022.
- [26] O. Chettibi and I. Zine. "analyse énergétique d'un système solaire destiné pour le froid et le chauffage des bâtiments.". "Mémoire de Master", "Université de Jijel", 2022.
- [27] K. Touafek, B. W. Touafek, A. Malek, M. Haddadi, and L. Serir. Etude d'un système de cogénération par les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques destinés à l'habitat'. "Revue des Energies Renouvelables, CER", 7:177–180, 2007.
- [28] A. Taleb Ahmed. "conception et réalisation d'une nouvelle configuration de capteur solaire hybride pvt". "Thèse Doctorat", "Université de Ghardaia".



- [29] A. Yunus and A. Michael. "*Thermodynamique : an Engineering Approach, New York*". 2002.
- [30] S.A Kalogirou. "*Solar energy engineering: processes and systems*". Elsevier, 2023.
- [31] T.T Chow. "a review on photovoltaic/thermal hybrid solar technology". *Renewable Energy*, 4:88–119, 2018.
- [32] C.N. Markides M.Herrando and K. Hellgardt. "a uk-based assessment of hybrid pv and solar-thermal systems for domestic heating and power: System performance, department of chemical engineering, london". *Applied Energy*, 122:288–309, 2014.
- [33] IEA. "technology roadmap: solar photovoltaic energy", 2014.
- [34] B. Roula and H. Boulouaret. "l'influence des paramètres de fonctionnement sur les performances d'un capteur hybride pv/t.". 2020.
- [35] N. Zarai, M. Chaabane, and S. Gabsi. "outil de planification de la production thermique des capteurs solaires". In *International Renewable Energy Congress, Sousse, Tunisia*, 2010.
- [36] D.E. Belfennache. "analyse de la neutralisation du dopant dans le silicium par l'hydrogène pour une corrélation avec la tension en circuit ouvert mesurée sur des cellules photovoltaïques". "*Thèse de doctorat en sciences*", "*Université de jijel*", 2019.
- [37] C.Kandilli. "a comparative study on the energetic-exergetic and economical performance of a photovoltaic thermal system (pvt)". *Res. Eng. Struct. Mater*, 5(1):75–89, 2019.
- [38] H.A. Refaey, Mathkar A. Alharthi, M.R. Salem, Ali A. Abdel-Aziz, H.E. Abdelrahman, and M.A. Karali. "thermal regulation of photovoltaic panels using pcm with multiple fins configuration: Experimental study with analysis ". "*Thermal Science and Engineering Progress*", 24:100934, 2021.
- [39] H.A. Zondag. "flat-plate pv-thermal collectors and systems: A review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(4):891–959, 2008.
- [40] D. Zeroukhi. "dimensionnement d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique en vue de son installation sur le toit d'un bâtiment administratif, master en génie mécanique". "*Mémoire de Master en génie mécanique*" "*Université de Tizi-Ouzou*", 2013.

- [41] A. Khelifa, H. Ben Moussa, K. Touafek, M. Adouane, and I. Tabet. ””etude du chauffage de l’eau par le capteur solaire hybride”,”unité de recherche appliquée en energies renouvelables”, ghardaïa. *Revue des Energies Renouvelable SIENR*, 14:285–291, 2009.

## Résumé

Le système hybride PVT représente une avancée prometteuse dans le domaine de l'énergie solaire, car il combine la production simultanée d'électricité et de chaleur, ce qui en fait une solution efficace et polyvalente pour les applications résidentielles et industrielles. Les panneaux solaires hybrides utilisent le rayonnement solaire et la chaleur des cellules photovoltaïques pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou air). L'optimisation des performances de ce système permet de maximiser l'utilisation de l'énergie solaire, ce qui contribue à réduire les coûts énergétiques et les émissions de carbone.

Après avoir simulé ce système à l'aide de MATLAB SIMULINK, les résultats de l'étude ont montré que le développement de systèmes solaires photovoltaïques peut jouer un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie plus durables et plus respectueuses de l'environnement. Les résultats montrent qu'un système PVT hybride peut fournir une plus grande efficacité dans l'utilisation de l'énergie solaire.

**Mot clé:** Système hybride PVT, Énergie solaire, Cellules photovoltaïques, MATLAB SIMULINK, Efficacité énergétique.

## Abstract

The hybrid PVT system represents a promising advancement in the field of solar energy, as it combines the simultaneous production of electricity and heat, making it an efficient and versatile solution for residential and industrial applications. Hybrid solar panels use solar radiation and the heat from photovoltaic cells to heat a heat transfer fluid (liquid or air). Optimizing the performance of this system allows for maximizing the use of solar energy, which helps reduce energy costs and carbon emissions.

After simulating this system using MATLAB SIMULINK, the study results showed that the development of photovoltaic solar systems can play a crucial role in the transition to more sustainable and environmentally friendly energy sources. The results indicate that a hybrid PVT system can provide greater efficiency in solar energy utilization.

**Keywords:** Hybrid PVT system, Solar energy, Photovoltaic cells, MATLAB SIMULINK, Energy efficiency.

## المخلص

يمثل النظام الهجين PVT تقدماً واعداً في مجال الطاقة الشمسية، حيث يجمع بين الإنتاج المتزامن للكهرباء والحرارة، مما يجعله حلاً فعالاً ومتعدد الاستخدامات للتطبيقات السكنية والصناعية. تستخدم الألواح الشمسية الهجينة الإشعاع الشمسي والحرارة المنبعثة من الخلايا الكهروضوئية لتسخين سائل نقل الحرارة (سائل أو هواء). يساهم تحسين أداء هذا النظام في زيادة استخدام الطاقة الشمسية إلى أقصى حد، مما يساعد على تقليل تكاليف الطاقة وانبعاثات الكربون.

بعد محاكاة هذا النظام باستخدام MATLAB SIMULINK، أظهرت نتائج الدراسة أن تطوير أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية يمكن أن يلعب دوراً حاسماً في الانتقال إلى مصادر طاقة أكثر استدامة وصديقة للبيئة. أظهرت النتائج أن النظام الهجين PVT يمكنه تحقيق كفاءة أكبر في استخدام الطاقة الشمسية.

**الكلمات المفتاحية:** النظام الهجين PVT، الطاقة الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، MATLAB SIMULINK، كفاءة الطاقة.