



**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**En** : Génie mécanique

**Spécialité** : Energie renouvelable

**Par** :

ACHACHI Mohamed

BOUFIR Mohammed

**Sujet**

Développement d'un système de panneaux photovoltaïques avec miroirs ajustables et suivi dynamique

Soutenu publiquement, le 01 / 07 / 2025 , devant le jury composé de :

M Korti A. Nabil	Pr	Université de Tlemcen	Président
M Aliane Abdenour	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M Yousfi Sidi Med	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
MGuellil Hocine	MCA	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme.OURAD Soumia	MCB	Université de Tlemcen	Experte I2E
M.BERRAHOU Med	ING	Université de Tlemcen	Expert Eco

Année universitaire : 2024 / 2025

### *Remerciements*

Je tiens tout d'abord à exprimer ma sincère gratitude à mes encadrants, **M. Guellil Hocine** et **M. Yousfi Sidi Mohamed**, pour leur encadrement précieux, leurs conseils avisés et leur soutien constant tout au long de ce travail. Leur expertise et leur disponibilité ont été d'une aide inestimable pour mener à bien ce projet.

Je souhaite également adresser un remerciement tout particulier à ma mère, pour son amour, son soutien et son dévouement sans faille. Elle a su, avec force et courage, jouer le rôle de père et de mère à la fois. Son sacrifice et sa persévérance m'ont inspiré et motivé à persévérer dans mon parcours universitaire. À elle, je dédie ce travail avec tout mon respect et ma reconnaissance.

## *Dédicaces*

À toute ma famille, qui m'a toujours entouré de bienveillance et de motivation,  
et à mes chers amis, pour leur amitié sincère et leur soutien constant durant cette aventure universitaire.

## المخلص:

تناول هذا البحث دراسة تأثير المرايا العاكسة على الألواح الشمسية، ويهدف إلى تحديد ما إذا كان استخدام العواكس يحسن من كفاءة أنظمة الطاقة الكهروضوئية. تُستخدم هذه المرايا لزيادة كمية الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الألواح، مما قد يؤدي إلى زيادة في الطاقة المنتجة.

في الوقت نفسه، يهتم هذا البحث بمشكلة ارتفاع درجة حرارة الألواح الشمسية الناتجة عن التركيز الزائد للإشعاع، وهي ظاهرة معروفة تؤثر سلبًا على كفاءة التحويل الكهربائي. نقوم بتحليل هذه الظاهرة من خلال مقارنة أداء لوح شمسي مع وبدون عواكس، في ظروف متماثلة، لمعرفة ما إذا كان التأثير الحراري يحدّ من الفائدة المنتظرة من استخدام العواكس.

تعتمد هذه الدراسة على منهج تجريبي للوصول إلى نتائج دقيقة حول تحسين أداء الألواح الشمسية في ظروف إشعاع متفاوتة.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الكهروضوئية، الإشعاع الشمسي، الحرارة، العاكس، الطاقة الشمسية

## **Abstract**

This research focuses on the effect of reflective mirrors on solar panels, aiming to determine whether their use enhances the efficiency of photovoltaic systems. These mirrors are designed to increase the amount of solar radiation received by the panel's surface, potentially boosting energy production.

At the same time, the study addresses the issue of solar panel overheating, caused by the increased concentration of radiation a well-known phenomenon that negatively affects electrical conversion efficiency. The research analyzes this by comparing the performance of a solar panel with and without reflectors under similar conditions, to assess whether the thermal effect limits the anticipated benefit.

This study follows both an experimental approach to provide accurate results on optimizing solar panel performance under varying irradiance conditions.

**Keywords:** Photovoltaic, solar radiation, temperature, reflectors, solar energy.

## **Résumé**

Ce travail de recherche étudie l'effet des miroirs réfléchissants sur les panneaux solaires, avec pour objectif principal de déterminer si leur utilisation améliore l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Ces miroirs sont conçus pour augmenter la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface du panneau, ce qui peut entraîner une augmentation de la production d'énergie.

En parallèle, la recherche se penche sur le problème de la surchauffe des modules solaires, causée par la concentration accrue du rayonnement, un phénomène bien connu qui réduit le rendement de conversion électrique. L'étude analyse cette problématique en comparant les performances d'un panneau solaire avec et sans réflecteurs, dans des conditions similaires, afin d'évaluer si l'effet thermique limite les bénéfices attendus.

Cette étude adopte une approche expérimentale afin de produire des résultats précis concernant l'optimisation des performances des panneaux solaires dans des conditions d'irradiance variable.

**Mots-clés** : Photovoltaïque, rayonnement solaire, température, réflecteurs, énergie solaire.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE I.....	3
ÉTAT DE L'ART.....	3
INTRODUCTION.....	4
I. REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	4
I.1 MÉCANISME DES MIROIRS RÉFLÉCHISSANTS DANS LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES .....	4
I.2 ÉTUDES ANTÉRIEURES SUR L'AMÉLIORATION DE L'EFFICACITÉ DES PANNEAUX GRÂCE AUX MIROIRS .....	4
I.3 EFFET DES GRANDS RÉFLECTEURS (LARGE MIRROR) :.....	5
I.4 DÉFIS ET LIMITATIONS TECHNIQUES.....	5
I.4.1 Élévation de la température des panneaux solaires.....	5
I.5 HÉTÉROGÉNÉITÉ DE L'ÉCLAIRAGE ET APPARITION DE POINTS CHAUDS .....	6
I.6 COMPARAISON DES MATÉRIAUX RÉFLÉCHISSANTS ET LEUR IMPACT SUR LES PERFORMANCES.....	6
I.7 PERSPECTIVES ET RECOMMANDATIONS .....	6
I.7.1 Développement de systèmes à miroirs intelligents.....	6
I.8 TECHNOLOGIES AVANCÉES DE REFROIDISSEMENT .....	7
CONCLUSION.....	7
CHAPITRE II.....	8
ENERGIE SOLAIRE ET PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES .....	8
II.1 ÉNERGIE SOLAIRE.....	9
II.2 RAYONNEMENT.....	9
II.3 CARACTÉRISTIQUES DU RAYONNEMENT SOLAIRE.....	9
II.3.1 Composition spectrale.....	9
II.3.2 Transition électronique .....	10
II.3.3 Loi de Planck .....	10
II.3.4 Condition de rayonnement d'un corps .....	11
II.4 TECHNOLOGIES DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE.....	11
II.5 CONVERSION PHOTOVOLTAÏQUES .....	12
II.5.1 Principe de Fonctionnement : Conversion de la Lumière en Électricité.....	12
II.6 CONVERSION THERMIQUE.....	13
II.6.1 Chauffe-eau solaire.....	13
II.6.2 Centrales solaires thermodynamiques .....	14
CHAPITRE III.....	16
APPROCHES AVANCEES DE REFROIDISSEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES .....	16
INTRODUCTION AUX TRANSFERTS THERMIQUES.....	17
III.1 QU'EST-CE QUE LA CHALEUR ?.....	17
III.2 QU'EST-CE QU'UN TRANSFERT DE CHALEUR ? .....	18
III.3 COMMENT LA CHALEUR EST-ELLE TRANSFÉRÉE ?.....	18
III.3.1 Modes de transfert de chaleur : .....	18
III.4 REFROIDISSEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES PAR CIRCULATION D'EAU .....	19
III.4.1 Principe et Composants du Système.....	19
III.4.2 Performance Thermique .....	19
III.5 REFROIDISSEMENT DES PANNEAUX SOLAIRES PAR CIRCULATION D'AIR .....	20
III.5.1 Refroidissement Naturel .....	20
III.5.2 Refroidissement Forcé.....	20
III.6 INTEGRATION DES MATERIAUX A CHANGEMENT DE PHASE (MCP).....	21
III.6.1 Sélection des Matériaux.....	21

III.7	MÉCANISME DE RÉGULATION THERMIQUE .....	22
III.8	REFROIDISSEMENT PASSIF AILETTES THERMIQUES.....	23
II.8.1	<i>Augmentation de la Surface d'Échange.....</i>	23
II.8.2	<i>Amélioration de la performance des modules PV par un système de refroidissement passif à ailettes multiples (MLFHS) Application en climat chaud.....</i>	23
II.8.3	<i>Résultats expérimentaux :.....</i>	23
III.9	RECOMMANDATIONS ET PERSPECTIVES.....	25
CONCLUSION.....		25
CHAPITRE IV.....		26
EQUIPEMENTS ET PROCEDURE EXPERIMENTALE.....		26
IV.1	INTRODUCTION .....	27
IV.2	CONFIGURATION DU PROJET .....	27
IV.3	COMPOSANTS DU SYSTÈME.....	27
IV.3.1	<i>Miroirs réfléchissants.....</i>	28
IV.4	ORIENTATION ET POSITIONNEMENT .....	29
IV.5	APPAREILS DE MESURE ET DE CONTRÔLE .....	30
IV.6	ASSURANCE DE L'ÉQUIVALENCE ET DE L'ÉTALONNAGE.....	31
IV.7	STRUCTURE DE SUPPORT RÉGLABLE POUR PANNEAU SOLAIRE AVEC MIROIRS LATÉRAUX MOBILES .....	34
CHAPITRE V.....		35
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.....		35
INTRODUCTION.....		36
IV.8	MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DE LA TEMPÉRATURE MOYENNE D'UN PANNEAU SOLAIRE.....	36
V.9	RÉSULTATS D'UNE JOURNÉE ENSOLEILLÉE : 15/05/2025 .....	37
V.9.1	<i>Circuit sans charge .....</i>	37
V.10	LE CIRCUIT AVEC CHARGE .....	47
V.10.1	<i>Une journée ensoleillée du 01/06/2025.....</i>	47
V.10.2	<i>Une journée partiellement nuageuse du 11/06/2025 .....</i>	58
RESUME GLOBAL DES ESSAIS.....		68
V.11	RÉSULTATS DES MESURES EN CHARGE (IMPP & VMPP) JOURNÉE ENSOLEILLÉE .....	68
V.12	RÉSULTATS DES MESURES SANS CHARGE (ISC & VOC) .....	68
V.13	OBSERVATIONS THERMIQUES ET ENVIRONNEMENTALES.....	68
ANALYSE COMPARATIVE DE PERFORMANCE DES PANNEAUX SOLAIRES AVEC ET SANS REFLECTEURS .....		69
V.14	PANNEAU SOLAIRE SANS RÉFLECTEURS .....	69
V.15	PANNEAU SOLAIRE AVEC RÉFLECTEURS .....	70
CONCLUSION FINALE .....		71
REFERENCES :.....		72

## Nomenclature

<b>Symbole Abréviation</b>	<b>Description</b>	<b>Unité</b>
P	Puissance électrique produite par le panneau solaire	(W)
V	Tension électrique	(V)
I	Courant électrique	(A)
$\eta$	Rendement du panneau solaire	%
A	Surface du panneau solaire	m <sup>2</sup>
G	Irradiation solaire incidente	W/m <sup>2</sup>
Iavec	Intensité lumineuse avec l'utilisation des miroirs réfléchissants	W/m <sup>2</sup>
Isans	Intensité lumineuse sans l'utilisation des miroirs réfléchissants	W/m <sup>2</sup>
Geffective	Irradiation solaire totale reçue par le panneau	W/m <sup>2</sup>
Tm	Température moyenne du module du panneau solaire	°C
Ta	Température ambiante	°C
Voc	Tension en circuit ouvert	(V)
Isc	Courant de court-circuit	(A)
Vmpp	Tension au point de puissance maximale	(V)
Impp	Courant au point de puissance maximale	(A)
UV	Ultraviolet	nm
PV	Panneaux Photovoltaïque	-
PCM	Matériaux à Changement de Phase (Phase Change Materials)	-
$\Delta E$	Changement d'énergie	(J)
h	Constante de Planck	J.s
$\nu$	Fréquence	s <sup>-1</sup>

$c$	Vitesse de la lumière dans le vide	m/s
$\lambda_0$	Longueur d'onde	m

## Liste des figures

### CHAPITRE II :

Figure 2. 2: Spectre de l'énergie solaire .....	10
Figure 2. 3: Propagation des ondes électromagnétiques.....	11
Figure 2. 4: Schéma de conversion de l'énergie solaire en électricité.....	13
Figure 2. 5: Schéma fonctionnement de chauffe-eau solaire.....	14
Figure 2. 6: Types de concentrateurs solaires thermiques.....	15

### CHAPITRE III :

Figure 3. 2: Diagramme schématique des modèles de transfert de chaleur .....	18
Figure 3. 3: Une image illustrative de l'expérience montrant .....	20
Figure 3. 4: Développement d'un mécanisme de refroidissement par ventilateur à courant continu. .....	21
Figure 3. 5: Diagramme de comparaison des températures. ....	22
Figure 3. 6: Schéma montrant l'intégration du MCP avec le panneau solaire .....	23
Figure 3. 7: Nouvelles ailettes multi-niveaux sont montées à l'arrière d'un module de 120 Wc. ....	24

### CHAPITRE IV :

Figure 4. 1: Représentation du panneau solaire utilisé.....	28
Figure 4. 2 : Représentation du panneau solaire sur le support mobile et les réflecteurs.....	29
Figure 4. 3: Position géographique de Tlemcen .....	30
Figure 4. 4: Position des capteurs de température .....	30
Figure 4. 5: Afficheur Voltmètre/Ampèremètre 10A-100V DC .....	32
Figure 4. 6 : capteur de température .....	32
Figure 4. 7: Appareil servant à l'étalonnage du courant .....	32
Figure 4. 8 : lamp 100W (charge) .....	32
Figure 4. 9: solarimètre.....	32
Figure 4. 10: Dispositif de mesure.....	33
Figure 4. 11: Contrôle de précision entre l'alimentation de laboratoire et le système de mesure .....	33
Figure 4. 12: Support ajustable pour panneau solaire et miroirs latéraux .....	34

### CHAPITRE V :

Figure 5. 1: Position des capteurs de température .....	38
Figure 5. 2: Evolution temporelles des (09) capteurs.....	40
Figure 5. 3: Evolution temporelles des (09) capteurs de température du panneau (avec réflecteur) .....	40
Figure 5. 4: Evaluation des courants entre les deux panneaux solaires .....	44
Figure 5. 5: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires.....	44
Figure 5. 6: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires .....	45
Figure 5. 7: Relevé de températures de panneaux solaires avec/sans réflecteurs .....	47
Figure 5. 8: Variations Horaires des Températures de panneaux sans réflecteur .....	48
Figure 5. 9: Suivi des moyennes de température.....	48
Figure 5. 10: Suivi des moyennes de température.....	49
Figure 5. 11: Évolution Horaires de l'Irradiation (Avec et Sans Réflecteur) et des Températures (Ambiante et Moyennes des Panneaux) .....	50
Figure 5. 12: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires.....	53
Figure 5. 13: Evaluation des courants entre les deux panneaux solaires .....	53
Figure 5. 14: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires .....	54
Figure 5. 15: Impact de la température sur le Puissance électrique .....	56
Figure 5. 16: Variations Horaires des Températures de panneaux sans réflecteur .....	59
Figure 5. 17: Suivi des moyennes de température.....	59

Figure 5. 18: Variations Horaires des Températures de panneaux avec réflecteur.....	60
Figure 5. 19: Suivi des moyennes de température.....	60
Figure 5. 20: Évolution Horaires de l'Irradiation (Avec et Sans Réflecteur) et des Températures (Ambiante et Moyennes des Panneaux) .....	61
Figure 5. 21: Evaluation des courant entre les deux panneaux solaires.....	63
Figure 5. 22: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires.....	63
Figure 5. 23: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires .....	64
Figure 5. 24: L'impact des miroirs sur la puissance .....	66

## Liste des tableau

### CHAPITRE I :

Tableau 1. 2: comparaison des performances des matériaux réfléchissants ..... 6

### CHAPITRE III :

Tableau 3. 2: Tableau montrant quelques unités d'énergie..... 17

Tableau 3. 3: Comparaison des stratégies de refroidissement ..... 24

### CHAPITRE IV :

Tableau 4. 2: Spécifications Techniques du Panneau Solaire ..... 27

Tableau 4. 3: Spécifications Techniques du Panneau Solaire ..... 29

### CHAPITRE V :

Tableau 5. 1: Relevé de températures de panneaux solaires avec/sans réflecteurs ..... 38

Tableau 5. 2: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs ..... 43

Tableau 5. 3: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs ....**Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 5. 4: Amélioration de la puissance ..... 55

Tableau 5. 5: Relevés de température de panneaux solaires avec/sans réflecteur ..... 58

Tableau 5. 6: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs ..... 62

Tableau 5. 7: Amélioration de puissance ..... 65

# **Introduction**

Face aux défis environnementaux croissants et à la demande mondiale accrue en énergies renouvelables, l'énergie solaire s'impose aujourd'hui comme un pilier fondamental dans les stratégies de transition énergétique durable. Toutefois, le rendement limité des panneaux solaires constitue encore un obstacle technique majeur qui nécessite des solutions innovantes pour améliorer leur performance dans des conditions réelles d'utilisation.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'études vise à améliorer la productivité des panneaux solaires grâce à la conception et à l'expérimentation d'un support équipé de deux miroirs latéraux réfléchissants, permettant d'orienter plus efficacement le rayonnement solaire vers le panneau tout en facilitant l'ajustement de son inclinaison. Cet ajout a pour but d'augmenter l'irradiance reçue par le module et, par conséquent, d'améliorer la production d'énergie, sans recourir à des solutions complexes ou coûteuses.

Ce système allie simplicité technique et efficacité économique, ce qui le rend particulièrement adapté aux environnements pédagogiques et aux laboratoires de recherche. Il offre également des perspectives de développement futur en intégrant des technologies de contrôle automatisé telles que l'Arduino, les capteurs intelligents et les servo-moteurs, pour un suivi solaire dynamique et une optimisation continue des performances.

Pour évaluer l'efficacité de cette solution, nous avons mené une série d'expérimentations comparatives entre un panneau standard et un autre équipé de réflecteurs, en mesurant des paramètres clés comme l'irradiance, la température du module, la tension, le courant et la puissance générée, afin d'aboutir à une analyse scientifique rigoureuse.

Nous nous attacherons également à étudier l'effet combiné de l'augmentation de l'irradiance solaire et de la température du module sur les performances électro-énergétiques du panneau, afin de mieux comprendre l'interaction entre le gain lumineux et les contraintes thermiques.

Ce travail s'inscrit ainsi dans une démarche de recherche appliquée visant à proposer des solutions concrètes, accessibles et efficaces pour valoriser davantage l'énergie solaire et contribuer aux avancées dans le domaine des technologies énergétiques renouvelables.

**Chapitre I**  
**État de l'art**

## INTRODUCTION

L'intégration de miroirs réfléchissants dans les systèmes photovoltaïques (Photovoltaïque Systèmes - PV) constitue une approche prometteuse visant à augmenter l'absorption du rayonnement solaire et, par conséquent, à améliorer l'efficacité des panneaux solaires et la production d'énergie. Le principe fondamental de cette technique repose sur l'utilisation de miroirs pour rediriger davantage de lumière solaire vers les panneaux, optimisant ainsi la conversion de l'énergie solaire en électricité. Cette solution suscite un intérêt croissant dans la recherche scientifique en raison de son potentiel à pallier les limitations des systèmes fixes, notamment la réduction du rayonnement solaire aux premières et dernières heures de la journée. Cette étude vise à analyser les avancées récentes dans ce domaine, ainsi que les défis et perspectives de cette technologie.

### I. REVUE DE LA LITTÉRATURE

#### I.1 Mécanisme des miroirs réfléchissants dans les systèmes photovoltaïques

L'intégration des miroirs réfléchissants repose sur le principe de la réflexion et de l'orientation des rayons solaires vers les cellules photovoltaïques afin d'augmenter la quantité de lumière incidente. L'efficacité de cette technique dépend de plusieurs facteurs, notamment la qualité du matériau réfléchissant, l'angle d'incidence et la prévention des effets d'ombrage partiel qui peuvent nuire aux performances des panneaux.[1]

#### I.2 Études antérieures sur l'amélioration de l'efficacité des panneaux grâce aux miroirs

Plusieurs études ont été menées pour évaluer l'impact de l'utilisation des miroirs réfléchissants sur l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Par exemple, l'étude de **Rached et al. (2023)**, réalisée dans les régions désertiques d'Algérie, trois types de matériaux réfléchissants (miroirs, aluminium et verre transparent) ont été testés pour améliorer l'efficacité des modules solaires, Les résultats analytiques et expérimentaux ont révélé les conclusions suivantes : [2]

- **Miroirs** : L'amélioration la plus élevée, avec une augmentation moyenne de **14,24 %** de la production d'énergie électrique.
  - **Aluminium** : Une augmentation de **11,41 %** a été observée.
  - **Verre transparent** : Une amélioration plus modeste de **4,7 %** a été constatée.
- **Cette étude fournit des aperçus précieux pour le choix des matériaux réfléchissants adaptés à l'optimisation des systèmes solaires, tout en soulignant l'importance du refroidissement pour assurer une performance durable.**

### **I.3 Effet des grands réflecteurs (Large Mirror) :**

Lorsque des réflecteurs de grande taille (équivalant à trois fois la surface du panneau solaire) ont été utilisés, une amélioration notable des performances a été enregistrée, avec une augmentation maximale de la puissance électrique de 20,84 % par rapport au système conventionnel. Cependant, cette amélioration s'est accompagnée d'une élévation de la température des panneaux, nécessitant des systèmes de refroidissement pour atténuer l'impact négatif sur l'efficacité.[2]

D'autre part, l'étude menée par **Odungat et al. (2020)** sur un système photovoltaïque de 0,3 kW équipé de miroirs inclinés à 37° en *Inde* a révélé une augmentation de la production énergétique de 30,3 % par rapport aux systèmes traditionnels, avec une amélioration de l'efficacité de conversion de 10,04 % à 13,09 %.[1]

Enfin, l'étude de **Abdullah et al. (2022)** a examiné un système combinant panneaux photovoltaïques et miroirs réfléchissants associés à un mur de Trombe-PV. Les résultats ont montré une efficacité thermique maximale de 74,4 % en l'absence de système de refroidissement et une amélioration de l'efficacité électrique à 13,9 % avec une ventilation forcée.[3]

### **I.4 Défis et limitations techniques**

#### **I.4.1 Élévation de la température des panneaux solaires**

Bien que l'ajout de miroirs réfléchissants permette une amélioration notable de l'efficacité des panneaux solaires, l'un des principaux défis de cette technique est l'élévation de la température des cellules due à la concentration du rayonnement solaire. Selon **Odungat et al. (2020)**, la température des panneaux peut augmenter de

8°C, entraînant une diminution de leur durée de vie avec un taux de dégradation annuel de 0,9 %.[1]

## **I.5 Hétérogénéité de l'éclairage et apparition de points chauds**

L'utilisation de miroirs réfléchissants peut provoquer une distribution inégale de la lumière sur la surface des panneaux, générant ainsi des points chauds (*Hot Spots*) qui peuvent accélérer la dégradation des cellules photovoltaïques.[3]

## **I.6 Comparaison des matériaux réfléchissants et leur impact sur les performances**

Pour évaluer l'efficacité des différents matériaux réfléchissants, plusieurs études ont comparé leur performance. Le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus pour différents types de matériaux :

**Tableau 1. 1: comparaison des performances des matériaux réfléchissants**

<b>Matériau réfléchissant</b>	<b>Amélioration de la production énergétique</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
Miroirs classiques	+14,24%	Réflectivité élevée (>90%)	Coût élevé, entretien régulier
Aluminium poli	+11,41%	Résistant à la corrosion	Réflectivité moyenne (~80%)
Verre réfléchissant	+4,7%	Coût faible	Réflectivité faible (~40%)

## **I.7 Perspectives et recommandations**

### **I.7.1 Développement de systèmes à miroirs intelligents**

Les recherches récentes portent sur le développement de systèmes de miroirs intelligents capables d'ajuster automatiquement leur angle en fonction de la position du soleil, améliorant ainsi l'efficacité énergétique et réduisant les effets indésirables liés aux variations d'incidence du rayonnement.

## **I.8 Technologies avancées de refroidissement**

Pour atténuer l'élévation de la température des panneaux, des solutions innovantes sont envisagées, telles que l'utilisation de matériaux à changement de phase (MCP – Matériau à changement de phase) ou le refroidissement par nano-fluides, permettant une gestion thermique optimisée des systèmes photovoltaïques.

### **CONCLUSION**

L'intégration des miroirs réfléchissants aux panneaux solaires constitue une solution efficace pour améliorer la production d'énergie photovoltaïque, en particulier dans les zones à fort ensoleillement. Toutefois, des défis techniques tels que l'élévation de la température, l'hétérogénéité de l'éclairage et les coûts élevés de maintenance doivent être pris en compte pour garantir la viabilité de cette approche. Il est donc recommandé de poursuivre les recherches sur les technologies de refroidissement, l'optimisation des matériaux réfléchissants et l'évaluation de la rentabilité économique de ces systèmes afin de favoriser leur adoption à grande échelle.

**Chapitre II**  
**Energie solaire et panneaux photovoltaïques**

## **II.1 Énergie solaire**

L'énergie solaire est une forme d'énergie renouvelable issue du rayonnement du **soleil**. Elle constitue une ressource abondante et propre, jouant un rôle essentiel dans la transition énergétique mondiale. Son importance réside dans sa capacité à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à limiter les émissions de gaz à effet de serre. Les sources de l'énergie solaire comprennent principalement le rayonnement solaire direct et diffus, qui peuvent être captés et convertis en énergie utilisable via différentes technologies. Cette énergie peut être exploitée à travers diverses applications, notamment la production d'électricité, le chauffage et le refroidissement des bâtiments, ainsi que la désalinisation de l'eau.

## **II.2 Rayonnement**

Le rayonnement solaire désigne l'ensemble de l'énergie électromagnétique émise par le soleil et qui parvient jusqu'à la terre. Ce rayonnement, qui couvre une vaste gamme de longueurs d'onde, est à la base de nombreux phénomènes naturels et technologiques, de la photosynthèse à la production d'énergie photovoltaïque.[4]

## **II.3 Caractéristiques du rayonnement solaire**

### **II.3.1 Composition spectrale**

Le rayonnement solaire se décompose principalement en trois parties :

#### **Ultraviolet (UV)**

- **UV-C (100–280 nm)** : La majeure partie est absorbée par l'atmosphère, en particulier par l'ozone, et ne parvient donc pas à la surface.
- **UV-B (280–315 nm)** : Partiellement absorbé, il est responsable de certains effets biologiques négatifs (comme les coups de soleil) tout en étant indispensable pour la synthèse de vitamine D.
- **UV-A (315–400 nm)** : Moins absorbé, il atteint la surface en plus grande quantité et contribue notamment à l'apparition de certaines altérations cutanées.

**Lumière visible (400–700 nm)** : C'est la partie du spectre que nos yeux perçoivent. Elle représente la majeure partie de l'énergie utile pour la vision et contribue de manière significative à l'irradiance totale reçue.[5]

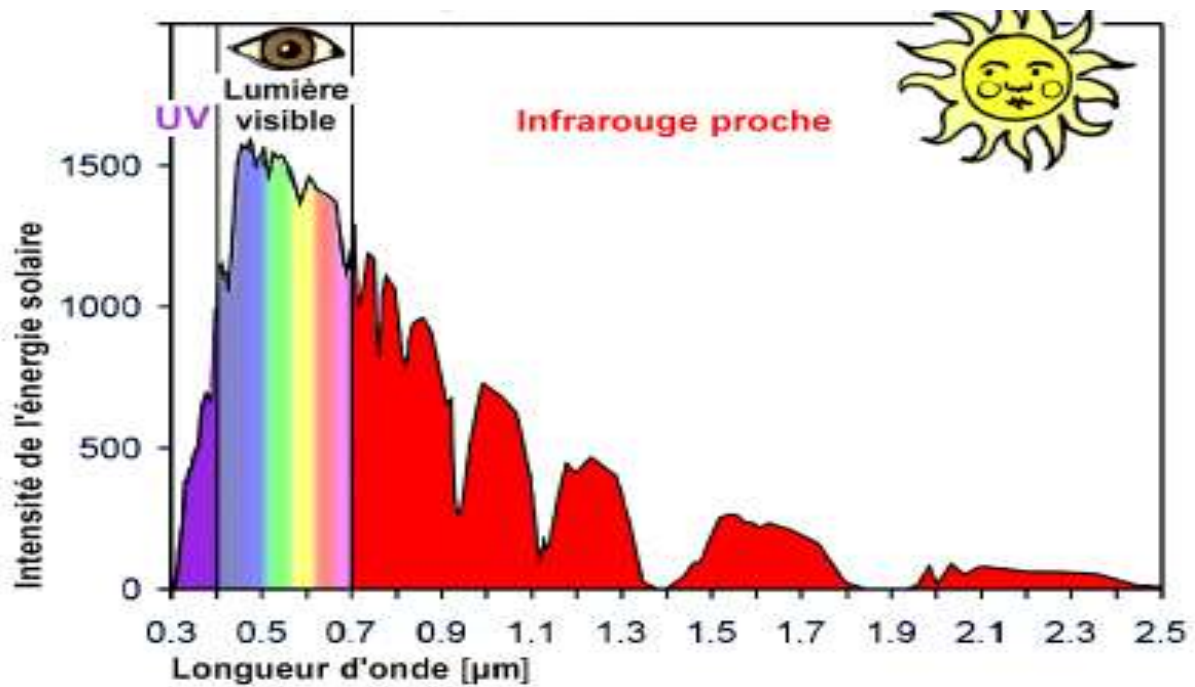


Figure 2. 1: Spectre de l'énergie solaire

### II.3.2 Transition électronique

Le rayonnement électromagnétique est émis lorsqu'un électron effectue une transition entre deux niveaux d'énergie d'un atome ou d'une molécule, selon la relation :[4]

$$\Delta E = h\nu$$

### II.3.3 Loi de Planck

Le passage du niveau d'énergie  $E$  à un niveau d'énergie  $E - \Delta E$  s'accompagne de l'émission d'un rayonnement de fréquence  $\nu$  et d'énergie  $h\nu$  où  $h$  est la constante de Planck :

$$E = h\nu \quad (2.1)$$

avec :  $\nu = c / \lambda$

$[h] = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$

$[\nu] = \text{s}^{-1}$

### II.3.4 Condition de rayonnement d'un corps

La figure 2.2 représente la vitesse de la lumière dans le vide. Cette vitesse diminue lorsqu'elle rencontre des obstacles selon leur indice réfractaire.

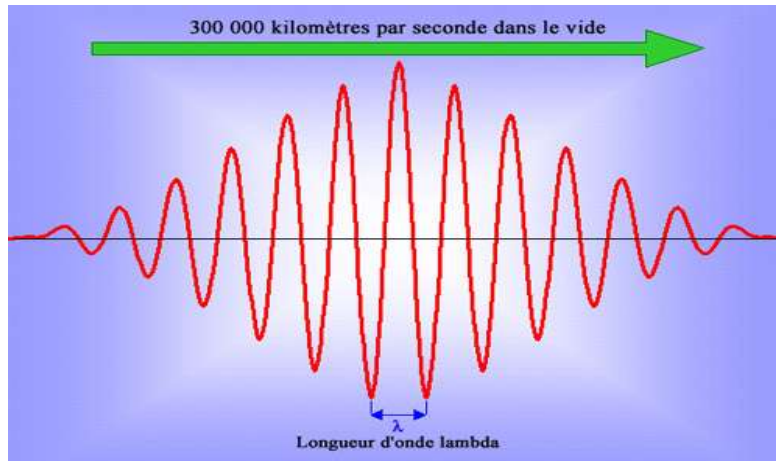


Figure 2. 2: Propagation des ondes électromagnétiques

#### II.3.4.1 Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques

Dans le vide, l'énergie se propage sous forme d'ondes électromagnétiques à une vitesse donnée par :

$$c = 3.10^8 \text{ m/s} \quad (2.2)$$

#### II.3.4.2 Longueur d'onde

La périodicité spatiale d'une onde  $\lambda_0$  : [4]

$$\lambda_0 = c T = c/v \quad (2.3)$$

avec  $[\lambda_0] = m$

$[c] = m.s^{-1}$

$[T] = 1/v$  : (Temps) en s

$[v] = s^{-1}$

### II.4 Technologies de conversion de l'énergie solaire

Il existe plusieurs technologies permettant de convertir l'énergie solaire en énergie utilisable. Ces technologies peuvent être classées en trois catégories principales :

1. **Cellules photovoltaïques** : Ces dispositifs transforment directement la lumière du soleil en électricité à l'aide de matériaux semi-conducteurs, tels que le silicium. Le phénomène photovoltaïque repose sur l'excitation des électrons par les photons solaires, produisant un courant électrique. Cette technologie est largement utilisée dans les systèmes solaires résidentiels, industriels et les grandes centrales solaires.
2. **Collecteurs solaires thermiques** : Ces dispositifs captent la chaleur du rayonnement solaire pour produire de l'énergie thermique utilisée principalement pour le chauffage de l'eau, le chauffage des bâtiments et la génération d'électricité à travers des centrales solaires thermodynamiques. On distingue plusieurs types de collecteurs, tels que les capteurs plans, les capteurs à tubes sous vide et les concentrateurs solaires.
3. **Technologies hybrides** : Ces systèmes combinent les avantages des cellules photovoltaïques et des collecteurs thermiques pour optimiser la conversion de l'énergie solaire. Un exemple notable est le panneau photovoltaïque thermique (PVT), qui produit simultanément de l'électricité et de la chaleur, améliorant ainsi le rendement global du système.

## **II.5 Conversion photovoltaïques**

Les panneaux solaires photovoltaïques représentent une technologie essentielle dans la transition énergétique, permettant de convertir directement l'énergie lumineuse en électricité. Cette section présente le principe de fonctionnement, les différents types de cellules solaires utilisées ainsi que les facteurs influençant leur efficacité.

### **II.5.1 Principe de Fonctionnement : Conversion de la Lumière en Électricité**

La conversion de la lumière en électricité repose sur le phénomène physique appelé **effet photovoltaïque**. Dans une cellule photovoltaïque, des photons issus du

rayonnement solaire sont absorbés par un matériau semi-conducteur (généralement du silicium). L'énergie apportée par ces photons permet d'exciter des électrons et de créer des paires électron-trou.

Ces porteurs de charge sont ensuite séparés grâce à un champ électrique interne, créé par la jonction p-n intégrée dans la cellule. La différence de potentiel ainsi générée force les électrons à circuler dans un circuit externe, ce qui se traduit par la production d'un courant continu (CC). Par la suite, ce courant est converti en courant alternatif (CA) par un onduleur pour être utilisé dans le réseau ou en autoconsommation

Plusieurs études et documents confirment que l'efficacité de ce processus dépend de la qualité des matériaux semi-conducteurs utilisés ainsi que de la conception de la cellule. Ce principe, mis en lumière dès les premières recherches sur l'effet photovoltaïque par Becquerel, reste à la base de toute la technologie moderne des panneaux solaires



Figure 2. 3:Schéma de conversion de l'énergie solaire en électricité

## II.6 Conversion thermique

### II.6.1 Chauffe-eau solaire

Les capteurs thermiques absorbent la chaleur solaire et la transfèrent à un fluide caloporteur pour chauffer l'eau domestique.

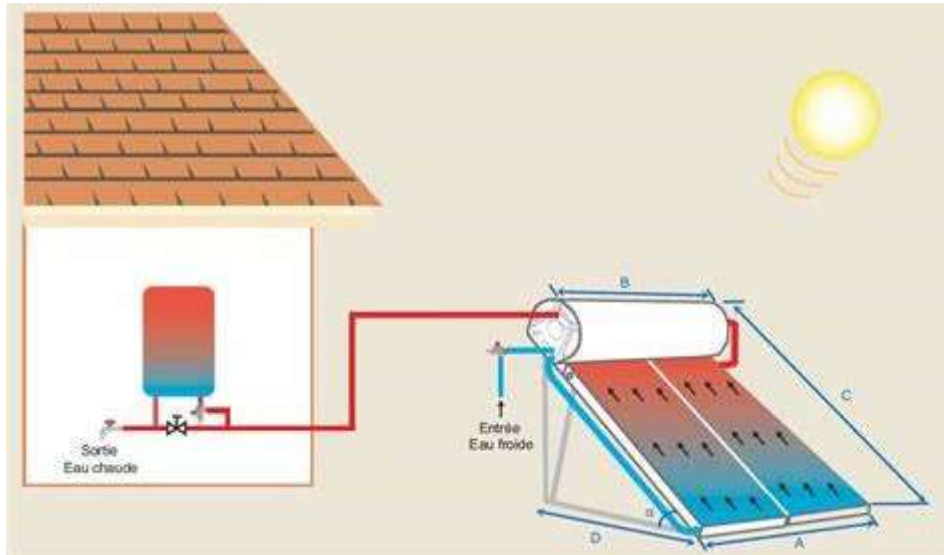


Figure 2. 4: Schéma fonctionnement de chauffe-eau solaire

## II.6.2 Centrales solaires thermodynamiques

Ces centrales exploitent des miroirs pour concentrer l'énergie solaire sur un fluide caloporteur, qui, en chauffant, génère de la vapeur utilisée pour actionner une turbine reliée à un générateur électrique. On distingue principalement trois types de technologies :

- **Les centrales à tour solaire** : Les miroirs orientent la lumière vers un récepteur situé en hauteur.
- **Les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques** : La lumière est focalisée sur un tube central contenant le fluide.
- **Les centrales à disques paraboliques** : Fonctionnant de manière similaire aux antennes paraboliques, elles servent à la production d'électricité.

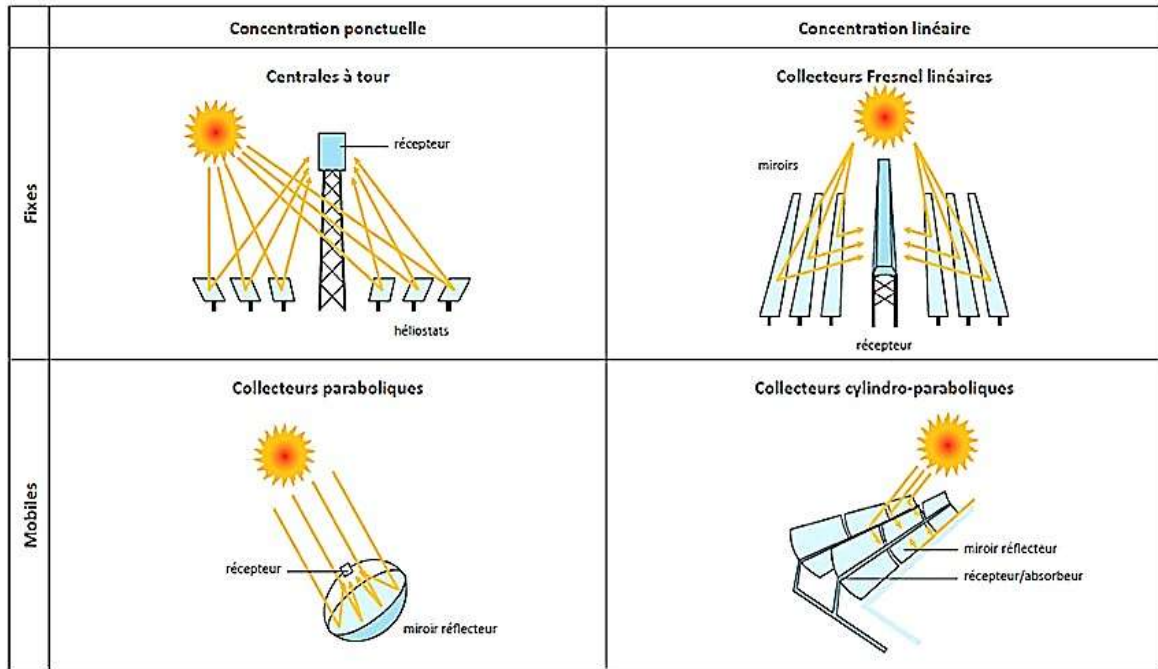


Figure 2. 5: Types de concentrateurs solaires thermiques

**Chapitre III**  
**Approches Avancées de Refroidissement des**  
**Panneaux Solaires**

## INTRODUCTION AUX TRANSFERTS THERMIQUES

Le transfert de chaleur, ou transfert thermique, est un phénomène fondamental qui régit l'échange d'énergie entre des systèmes ou des régions d'un même système en raison d'une différence de température. Contrairement à un système à l'équilibre thermodynamique où la température est uniforme, un système siège de transfert thermique qui présente des gradients de température. Ces gradients constituent la force motrice du transfert d'énergie, conduisant le système vers un état d'équilibre où la température s'homogène.

L'analyse des transferts thermiques vise à comprendre les mécanismes par lesquels l'énergie est transférée et à quantifier l'évolution spatio-temporelle du champ de température au sein du système. Cette compréhension est cruciale dans de nombreux domaines de l'ingénierie, de la physique et des sciences de l'environnement, car elle permet de prédire et de maîtriser les flux d'énergie thermique dans divers processus.

Dans ce chapitre, nous abordons les techniques de transfert de chaleur afin de comprendre les différentes stratégies de refroidissement applicables aux panneaux solaires, facilitant ainsi l'étude de leur efficacité en fonction des variations de température.

### III.1 Qu'est-ce que la chaleur ?

La chaleur est une forme d'énergie résultant de l'agitation des molécules et des atomes au sein de la matière. Ainsi, l'« énergie thermique » ou chaleur représente l'énergie associée au mouvement désordonné des particules constituant une substance. L'unité de mesure de la chaleur est le joule, bien que d'autres unités énergétiques soient également employées.

Tableau 3. 1: Tableau montrant quelques unités d'énergie

Joule (J)	kcal	British thermal unit (Btu)
1	$2,39 \cdot 10^{-4}$	$9,478 \cdot 10^{-4}$
4184	1	3,966
1055	0,252	1

### III.2 Qu'est-ce qu'un transfert de chaleur ?

Un transfert de chaleur, également appelé transfert thermique ou transfert par chaleur, est le déplacement d'énergie thermique d'un système à un autre en raison d'une différence de température.

### III.3 Comment la chaleur est-elle transférée ?

Deux corps ayant la même température sont dits en « équilibre thermique ». En revanche, si leurs températures diffèrent, un transfert de chaleur s'effectue entre eux. Selon le deuxième principe de la thermodynamique, la chaleur (ou énergie thermique) ne peut se transférer que d'un corps chaud vers un corps froid, autrement dit d'un corps ayant une température donnée vers un autre dont la température est plus basse.

#### II.3.1 Modes de transfert de chaleur :

Les trois modes de transfert de chaleur :

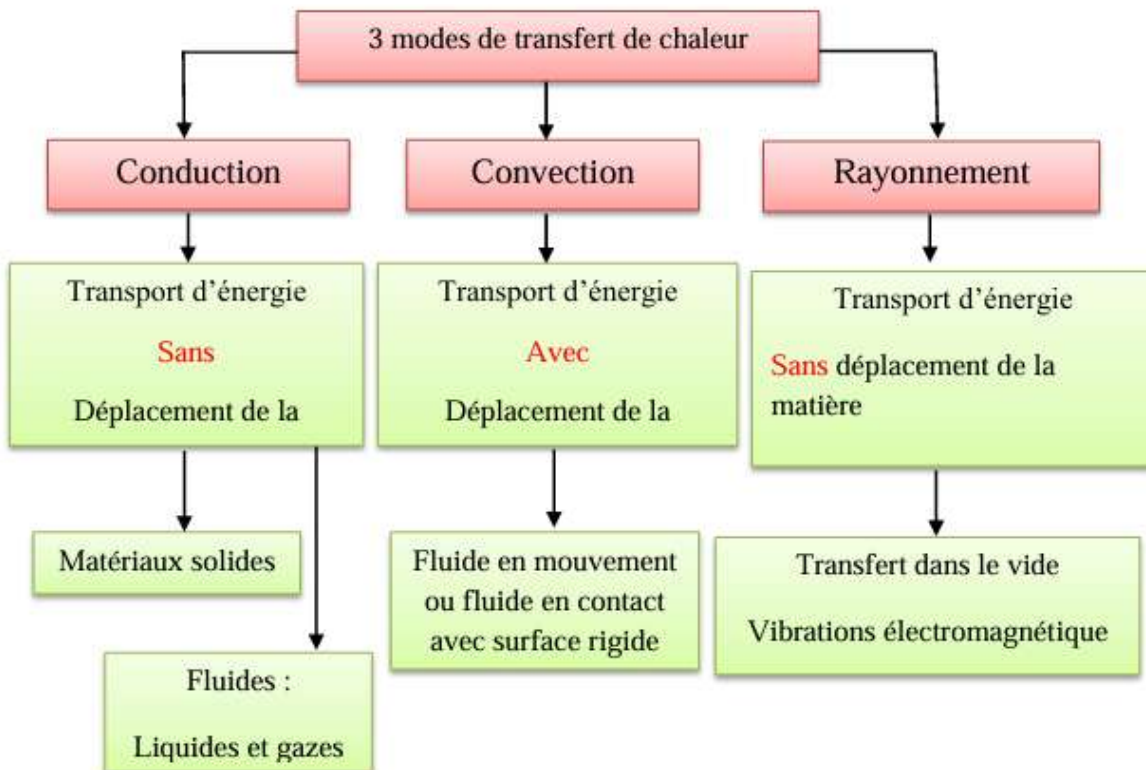


Figure 3. 1: Diagramme schématisque des modèles de transfert de chaleur

### **III.4 Refroidissement des panneaux solaires par circulation d'eau**

#### **II.4.1 Principe et Composants du Système**

Le refroidissement par eau repose sur le transfert thermique par convection forcée à travers un fluide caloporteur.

Deux types de refroidissement par eau sont utilisés :

1. **Refroidissement par circulation** : un fluide caloporteur circule dans un réseau de tuyauterie sous les panneaux, transférant la chaleur vers un dissipateur externe.
2. **Refroidissement par aspersion** : consiste à pulvériser de l'eau directement sur la surface des panneaux, favorisant ainsi le refroidissement par évaporation et conduction thermique [6]

#### **II.4.2 Performance Thermique**

Les performances électriques des panneaux photovoltaïques sont fortement influencées par la température de fonctionnement des cellules silicium, en raison des propriétés thermiques du silicium cristallin utilisé. La production d'énergie diminue avec l'augmentation de la température. Pour atténuer cet effet, un système de refroidissement par écoulement d'eau libre sur la surface du panneau a été développé.[7]

Les résultats ont montré qu'avec un débit de  $4,224 \text{ L/min/m}^2$ , la température du panneau diminuait jusqu'à  $20^\circ\text{C}$ , avec une augmentation de la production électrique de 12,8% et une amélioration du rendement de 8,31% à 9,62%. De plus, le refroidissement de la surface avant du panneau a permis de réduire les pertes par réflexion lumineuse grâce à l'indice de réfraction intermédiaire de l'eau (1,3) entre l'air (1) et le verre (1,5), tout en maintenant la propreté de la surface. [7]



Figure 3. 2: Une image illustrative de l'expérience montrant

### **III.5 Refroidissement des panneaux solaires par circulation d'air**

#### **II.5.1 Refroidissement Naturel**

Ce procédé s'appuie sur la convection naturelle pour dissiper la chaleur des panneaux vers l'air ambiant. Il est particulièrement efficace dans les environnements présentant des vents constants. Toutefois, son impact est limité dans des conditions de faible ventilation.

#### **II.5.2 Refroidissement Forcé**

Cette étude vise à analyser l'impact du nombre de ventilateurs sur la réduction de la température des panneaux et l'augmentation de leur production d'énergie.[8]

- La température du panneau a diminué de 22,22 % avec l'utilisation de quatre ventilateurs par rapport à un panneau non refroidi.
- Courant : Le courant de sortie est passé de 3,49 A (sans refroidissement) à 4,97 A (avec 4 ventilateurs).
- Puissance totale : La puissance de sortie a augmenté de 44,34 % par rapport au panneau non refroidi



Figure 3. 3: Développement d'un mécanisme de refroidissement par ventilateur à courant continu.

## III.6 Intégration des matériaux à changement de phase (MCP)

### II.6.1 Sélection des Matériaux

Les MCP sont des composés capables d'absorber et de libérer de la chaleur latente lors de leur transition de phase. Ils se divisent principalement en :

- **PCM organiques** (ex : cire de paraffine), caractérisés par leur stabilité chimique.
- **PCM inorganiques** (ex : sels hydratés), offrant une densité thermique plus élevée

Les matériaux à changement de phase MCP offrent une solution attrayante car ils ont une capacité calorifique plusieurs fois supérieure aux systèmes à base d'eau et d'air. De plus, la chaleur emmagasinée peut être utilisée pendant la nuit sans pertes de chaleur significatives. La chaleur stockée peut alors être utilisée pour conditionner le chauffage de l'air ou de l'eau, ce qui augmente l'efficacité globale du système et réduit son coût effectif.

### III.7 Mécanisme de Régulation Thermique

L'étude a également analysé l'impact du processus inverse de changement de phase du PCM, de l'état liquide à l'état solide, sur la température des panneaux solaires. Ce phénomène joue un rôle clé dans la gestion thermique et la performance globale des panneaux.

#### ➤ Effet sur la Température

Réduction de la température : Les résultats montrent que l'utilisation du PCM permet de réduire efficacement la température des panneaux solaires. En l'absence de vent, avec un rayonnement solaire de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température ambiante de  $7,3^\circ\text{C}$ , le PCM a permis de diminuer la température moyenne de la surface supérieure et inférieure des panneaux solaires de  $33,94^\circ\text{C}$  et  $36,51^\circ\text{C}$  respectivement sur une période de 300 minutes.[9]

#### ➤ Amélioration du Rendement

Augmentation du rendement : L'utilisation du PCM a conduit à une augmentation maximale du rendement de production d'énergie de 1,63 %, ainsi qu'à une augmentation de la puissance maximale générée de 1,35 W. Cette amélioration reflète l'effet du refroidissement efficace fourni par les matériaux à changement de phase.[9]

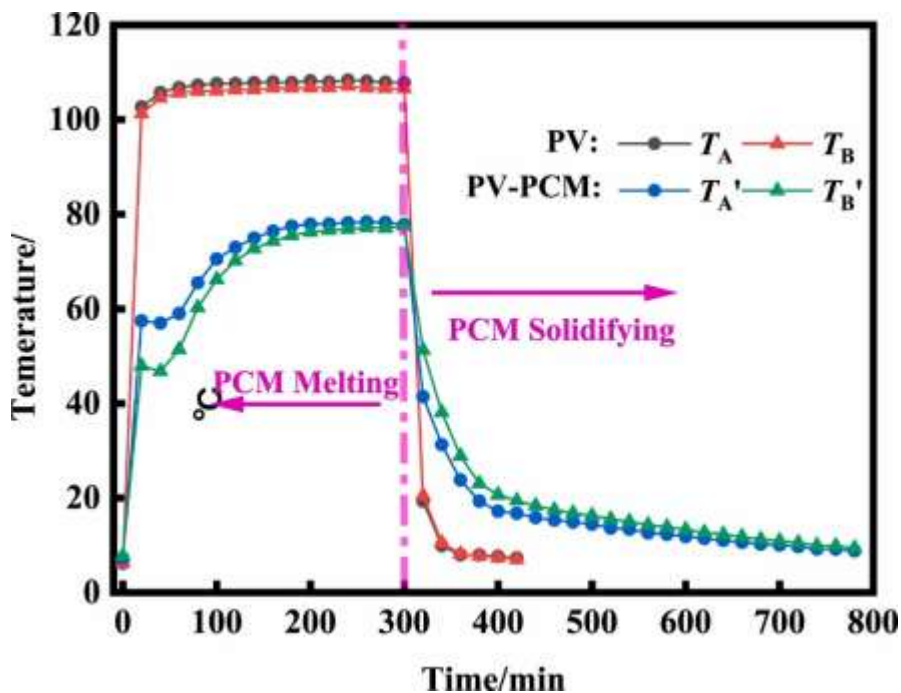


Figure 3. 4: Diagramme de comparaison des températures.

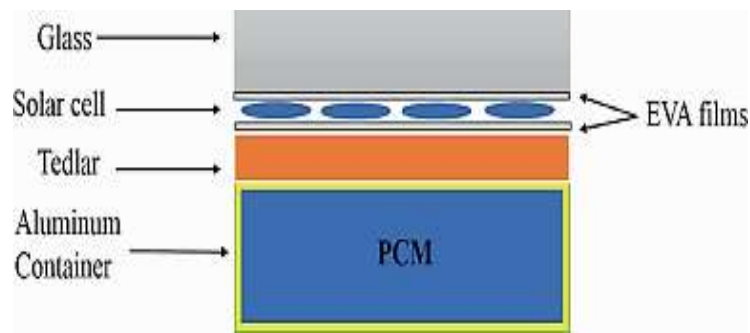


Figure 3. 5: Schéma montrant l'intégration du MCP avec le panneau solaire

### III.8 Refroidissement passif ailettes thermiques

#### II.8.1 Augmentation de la Surface d'Échange

Les ailettes thermiques sont conçues pour maximiser la dissipation de chaleur via la convection naturelle. Généralement fabriquées en aluminium ou en cuivre, elles facilitent l'évacuation thermique sans nécessiter de l'énergie supplémentaire.[10]

#### II.8.2 Amélioration de la performance des modules PV par un système de refroidissement passif à ailettes multiples (MLFHS) Application en climat chaud.

Une méthode de refroidissement passif pour les modules photovoltaïques en utilisant un dissipateur thermique à ailettes multiples à plusieurs niveaux (MLFHS), fixé à l'arrière du panneau à l'aide d'une résine époxy chargée en poudre métallique pour améliorer la conductivité thermique.[11]

Les ailettes sont conçues avec différentes hauteurs (entre 40 et 60 mm) et une forme en L inversé, afin d'augmenter la convection naturelle et de réduire les zones chaudes sur le module.

#### II.8.3 Résultats expérimentaux :

- Module testé : panneau solaire de 120 W.
- Réduction de la température de fonctionnement : de 64,2 °C à 56,1 °C (~8,45 °C en moins).
- Amélioration de la production énergétique jusqu'à 10,75 %.
- Coût estimé : environ 0,60 USD/W.
- Conditions de test : climat tropical (Malaisie), température ambiante entre 29 et 38 °C, irradiance > 600 W/m<sup>2</sup>.

L'efficacité diminue lorsque l'irradiance est inférieure à 500 W/m<sup>2</sup>.

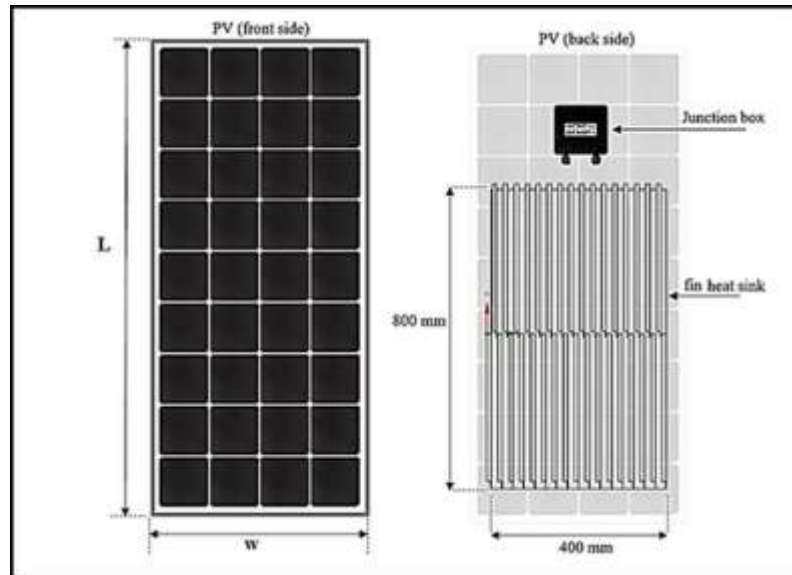


Figure 3. 6: Nouvelles ailettes multi-niveaux sont montées à l'arrière d'un module de 120 Wc.

Tableau 3. 2: Comparaison des stratégies de refroidissement

Méthode	Réduction thermique	Impact sur le rendement	Coût initial	Consommation énergétique	Adaptabilité environnementale
Refroidissement par eau	15-20 %	+5-10 %	Élevé	Modérée	Régions riches en eau
Refroidissement naturel par air	5-10 %	+2-5 %	Faible	Aucune	Régions venteuses
Refroidissement forcé par air	7-12 %	+3-7 %	Modéré	Moyenne à élevée	Régions chaudes avec accès à l'électricité
Refroidissement par PCM	10-15 %	+5-8 %	Élevé	Très faible	Régions à fortes variations thermiques
Ailettes thermiques	8-12 %	+3-6 %	Faible à modéré	Aucune	Régions sèches avec flux d'air constant

### **III.9 Recommandations et perspectives**

Le choix d'une méthode de refroidissement dépend fortement des conditions environnementales et des contraintes économiques. Les systèmes à base d'eau offrent des performances supérieures mais nécessitent une gestion efficace des ressources hydriques. Les solutions basées sur la convection d'air ou les ailettes thermiques sont plus adaptées aux environnements secs et aux installations nécessitant un entretien minimal. Les PCM constituent une alternative prometteuse, particulièrement pour les systèmes nécessitant une stabilité thermique sur de longues périodes.

### **CONCLUSION**

L'optimisation du refroidissement des panneaux solaires est un levier essentiel pour accroître leur rendement énergétique et prolonger leur durée de vie. Une approche hybride combinant plusieurs stratégies pourrait constituer une solution optimale selon les conditions d'exploitation spécifiques.

**Chapitre IV**  
**Equipements et procédure expérimentale**

## IV.1 Introduction

Ce chapitre vise à décrire la méthodologie suivie dans cette étude, qui repose sur une approche expérimentale comparative pour évaluer la performance des panneaux solaires photovoltaïques dans différentes conditions, en se concentrant sur l'impact de l'utilisation de miroirs réfléchissants pour augmenter le rayonnement solaire incident sur le panneau. Ce chapitre détaillera la description de l'équipement utilisé, le lieu et le moment des expériences, ainsi que les procédures de collecte et d'analyse des données.

## IV.2 Configuration du projet

Le modèle expérimental du projet a été conçu dans le but d'évaluer l'effet de l'intégration de miroirs réfléchissants et d'ailettes de refroidissement sur l'efficacité des panneaux solaires. Les expériences ont été réalisées dans la cour de l'université, un espace ouvert et large garantissant une exposition uniforme au rayonnement solaire, offrant ainsi un environnement approprié pour une comparaison précise entre les configurations.

## IV.3 Composants du système

Le projet comprend deux panneaux solaires de type polycristallin d'une puissance de 80 Watt chacun, fabriqués par la société LAGUA, de 85 cm × 65 cm de dimensions (Fig 4.1). Les caractéristiques des panneaux sont représentées sur le tableau 3.1

**Tableau 4. 1: Spécifications Techniques du Panneau Solaire**

Spécification	Valeur
Puissance Maximale Nominale ( $P_{max}$ )	80W
Tension en Circuit Ouvert ( $V_{oc}$ )	22.32V
Courant de Court-Circuit ( $I_{sc}$ )	4.80A

Tension au $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	18.0V
Courant au $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	4.44A
Température Nominale de Cellule (NOCT)	48±2°C
Tension Maximale du Système	1000VDC
Courant Maximal du Fusible Série	18A
Température de Fonctionnement	-40°C à +85°C
Technologie des Cellules	POLY



**Figure 4. 1: Représentation du panneau solaire utilisé**

### **IV.3.1 Miroirs réfléchissants**

Des miroirs en verre ont été installés de chaque côté du panneau solaire, avec une longueur équivalente à celle du panneau. Leurs inclinaisons sont ajustées manuellement au cours de la journée pour assurer une concentration maximale des rayons solaires sur la surface du panneau. Le support des miroirs a été conçu pour permettre un réglage facile en fonction de la position du soleil (Fig 4.2).



Figure 4. 2 : Représentation du panneau solaire sur le support mobile et les réflecteurs

#### IV.4 Orientation et positionnement

- ❖ Les deux panneaux ont été installés sur une structure spéciale permettant une fixation intégrée des panneaux et des miroirs.
- ❖ L'orientation a été dirigée vers le sud sur une inclinaison de  $45^\circ$ , considéré comme optimal pour la production d'énergie à l'emplacement géographique de l'université de Tlemcen durant les mois de printemps.

Tableau 4. 2: Spécifications Techniques du Panneau Solaire

<b>Date actuelle</b>	15 mai 2025
<b>Heure actuelle</b>	23:11
<b>Lever du soleil aujourd'hui</b>	06:03
<b>Coucher du soleil aujourd'hui</b>	20:00
<b>Fuseau horaire</b>	UTC+1
<b>Longueur du jour</b>	13h 57m
<b>Azimuth du soleil</b>	329.65°
<b>Altitude du soleil</b>	-11.06°

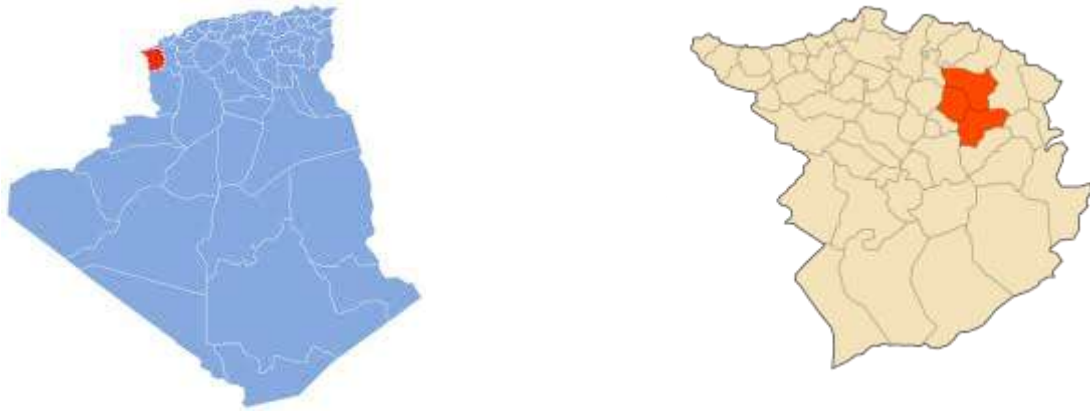


Figure 4. 3: Position géographique de Tlemcen

- ❖ Les panneaux ont été placés côte à côte au même endroit et sous les mêmes conditions environnementales pour assurer une comparaison précise.

#### IV.5 Appareils de mesure et de contrôle

Neuf capteurs de température sont placés à l'arrière du panneau, répartis du centre vers les bords pour mesurer la température avec précision sur toute la surface.

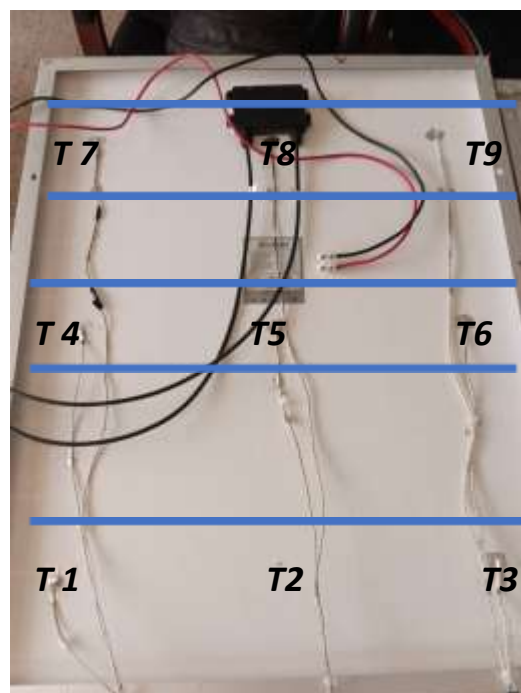


Figure 4. 4: Position des capteurs de température

Ces températures servent à la fois d'estimer la température moyenne du panneau et de

surveiller la convergence (une différence entre 2 capteurs sur une même ligne) des valeurs.

#### **IV.6 Assurance de l'Équivalence et de l'Étalonnage**

Pour garantir la précision et la fiabilité des résultats de la partie expérimentale, une attention particulière est portée à l'uniformisation des conditions expérimentales et à l'étalonnage des appareils de mesure. Avant le début des mesures, l'équivalence de tous les équipements utilisés pour la comparaison des performances (Fig. 4.6), notamment les appareils de mesure de tension et de courant, a été vérifiée.

À cette fin, une source d'alimentation en courant continu (DC) à sortie stable, telle que la Wanptek KPS1203D / KPS305D (Fig 4.5), a été utilisée comme référence d'étalonnage. Tous les appareils de mesure de tension et de courant (Voltmètre/Ampèremètre) ont été connectés successivement en série (mesure de courant) et en parallèle (mesure de tension) à cette source afin de comparer leurs lectures et de s'assurer de leur correspondance ou d'enregistrer toute légère différence pour une éventuelle correction ultérieure. Cette étape a été cruciale pour garantir que les différences observées dans la performance des panneaux sont attribuables exclusivement à l'effet des réflecteurs ou des systèmes de refroidissement, et non à des variations dans la précision des appareils de mesure.

De plus, pour s'assurer de la précision des lectures de température, plusieurs capteurs de température ont été employés (Fig 4.7). Pour l'étalonnage de ces capteurs, ils ont tous été placés dans les mêmes conditions thermiques et leurs lectures ont été comparées. Il a été vérifié que tous les capteurs affichaient des lectures identiques (ou dans une marge d'erreur acceptable) pour une même température, garantissant ainsi la fiabilité des données thermiques collectées et réduisant les erreurs méthodologiques.

- **Solarimètre :** (Amprobe Solar-100). C'est un instrument scientifique qui mesure la puissance du rayonnement solaire reçu en un point donné, il mesure la quantité de rayonnement solaire reçue par unité de surface pendant une période donnée (Fig 4.8), utilise l'effet photovoltaïque pour mesurer l'éclairement solaire. Il convertit le rayonnement solaire en une tension proportionnelle, qui est ensuite affichée en watts par mètre carré (W/m<sup>2</sup>).



Figure 4. 7: Appareil servant à l'étalonnage du courant



Figure 4. 6: Afficheur Voltmètre/Ampèremètre 10A-100V DC



Figure 4. 5 : capteur de température



Figure 4. 10: Module de mesure de température numérique avec affichage intégré solarimètre



Figure 4. 9: solarimètre



Figure 4. 8 : lamp 100W (charge)

- **Mesure de température** : Les thermocouples étalonnés sont reliés à un module de mesure de température. Il est sous forme d'un boîtier (Fig 4.10) fabriqué au laboratoire (ETAP de l'université de Tlemcen, pôle de Chétouane), il est constitué d'un sélecteur de position, d'un afficheur et d'un bouton on/off. Ce dispositif assure l'affichage de 11 températures. Il peut afficher plus et cela dépend du sélecteur disponible.
- **Mesure de la puissance électrique du panneau solaire**

Dans le cadre de notre projet, nous avons utilisé un dispositif fabriqué aussi au laboratoire (Fig 4.11). Ce système permet de mesurer la puissance produite par un panneau photovoltaïque de manière pratique. Il est composé de :

- **Un interrupteur marche/arrêt (ON/OFF)** pour le contrôle manuel du circuit.
- **Un afficheur numérique double** affichant simultanément la tension (en Volt) et le courant (en ampères) (de la Fig 4.6).
- **Un ventilateur** utilisé ici comme charge résistive, et non pour le refroidissement. Il permet de consommer l'énergie produite par le panneau.
- **Une charge variable** que l'on peut modifier pour simuler différents scénarios de fonctionnement.

Ce système permet de calculer la puissance électrique selon la formule :

$$P = V \times I$$



Figure 4. 11: Dispositif de mesure



Figure 4. 10: Contrôle de précision entre l'alimentation de laboratoire et le système de mesure

#### **IV.7 Structure de support réglable pour panneau solaire avec miroirs latéraux mobiles**

Dans le cadre de ce projet, une structure de support spécialement conçue a été utilisée afin d'assurer la stabilité et l'efficacité du système expérimental. Cette structure a pour rôle principal de maintenir le panneau solaire en position optimale tout en intégrant deux miroirs réfléchissants latéraux. Le support (Fig 4. 13) permet un réglage précis de l'angle d'inclinaison du panneau solaire, en fonction de la position du soleil et des besoins de l'expérimentation. Cela permet de maximiser l'absorption du rayonnement solaire tout au long de la journée.

Les miroirs latéraux sont montés sur des bras articulés, ce qui permet de modifier leur inclinaison manuellement afin de concentrer le rayonnement solaire vers la surface du panneau. Cette mobilité est essentielle pour adapter l'orientation des miroirs selon l'angle d'incidence du soleil, optimisant ainsi l'effet de concentration de la lumière.

La conception robuste et modulable de ce support garantit une grande stabilité du système, tout en offrant une flexibilité d'ajustement nécessaire pour les différentes phases de l'expérimentation.



**Figure 4. 12: Support ajustable pour panneau solaire et miroirs latéraux**

## **Chapitre V**

### **Résultats et discussions**

## **INTRODUCTION**

Dans cette étude, une attention particulière a été portée au choix des conditions climatiques. Nous avons soigneusement attendu une journée ensoleillée pour effectuer les mesures principales, tout en espérant également obtenir des données comparatives durant une journée nuageuse. Cette démarche visait à garantir des conditions contrastées, permettant une évaluation plus pertinente des performances du panneau solaire.

La première phase de l'expérimentation consistait à étudier le circuit ouvert (sans charge). Dans cette configuration, aucun courant n'est consommé par une charge externe, ce qui permet d'évaluer les performances intrinsèques du panneau sans pertes liées au fonctionnement.

Deux grandeurs ont été mesurées :

- La tension à vide ( $V_{oc}$ ), représentant la tension maximale générée par le panneau.
- Le courant mesuré sans charge, indiquant la réponse directe du panneau à l'intensité du rayonnement.
- La température moyenne de panneau.

Cette phase est essentielle car elle offre une comparaison claire et objective entre un panneau classique (qui sert de références) et un panneau équipé de réflecteurs sous forme de miroirs réfléchissants. Elle permet aussi de mettre en évidence l'impact de l'augmentation de l'irradiation solaire par réflexion sur les grandeurs électriques, sans interférence d'un circuit de consommation.

Dans un second temps, l'étude a été poursuivie en présence de charge résistive, simulant une situation réelle d'exploitation du panneau. Cette configuration a permis de mesurer la tension, le courant et la puissance délivrée, offrant une vision complète du rendement énergétique du système.

### **IV.8 Méthodologie de calcul de la température moyenne d'un panneau solaire**

Afin d'obtenir une estimation représentative et précise de la température moyenne d'un panneau solaire en fonctionnement, une approche basée sur une

division verticale du panneau en trois zones (inférieure, centrale et supérieure) a été adoptée. Dans chaque zone, trois relevés de température ont été effectués à des emplacements équidistants, de manière à capter au mieux la distribution thermique locale.

La moyenne arithmétique des trois températures a ensuite été calculée pour chaque zone, fournissant ainsi trois températures moyennes représentatives des zones inférieure, centrale et supérieure. Enfin, la moyenne globale de ces trois valeurs a été déterminée pour obtenir la température moyenne totale du panneau.

Cette méthode a été choisie dans le but de respecter le principe de la convection thermique, selon lequel la chaleur a tendance à se déplacer des zones inférieures vers les zones supérieures. Ce gradient thermique vertical, caractéristique du transfert de chaleur par convection, est ainsi mieux pris en compte, ce qui permet une meilleure représentation du comportement thermique global du panneau et renforce la fiabilité des résultats obtenus.

## **V.9 Résultats d'une journée ensoleillée : 15/05/2025**

### **V.9.1 Circuit sans charge**

Lors de la phase initiale de l'étude expérimentale, la mesure de la tension en circuit ouvert (sans charge, open circuit) a été choisie comme première étape. Cette méthode permet d'observer le comportement électrique fondamental du panneau solaire sans l'influence d'un quelconque dispositif de charge, ce qui facilite l'analyse des caractéristiques intrinsèques du module. Ce choix a été motivé par la volonté d'établir une base de référence claire et stable pour les expériences successives, en particulier celles portant sur l'impact des réflecteurs. Il s'agit donc d'une approche méthodologique visant à structurer le travail expérimental de manière progressive.

Tension en Circuit Ouvert ( $V_{oc}$ )	22.32V
Courant de Court-Circuit ( $I_{sc}$ )	4.80A

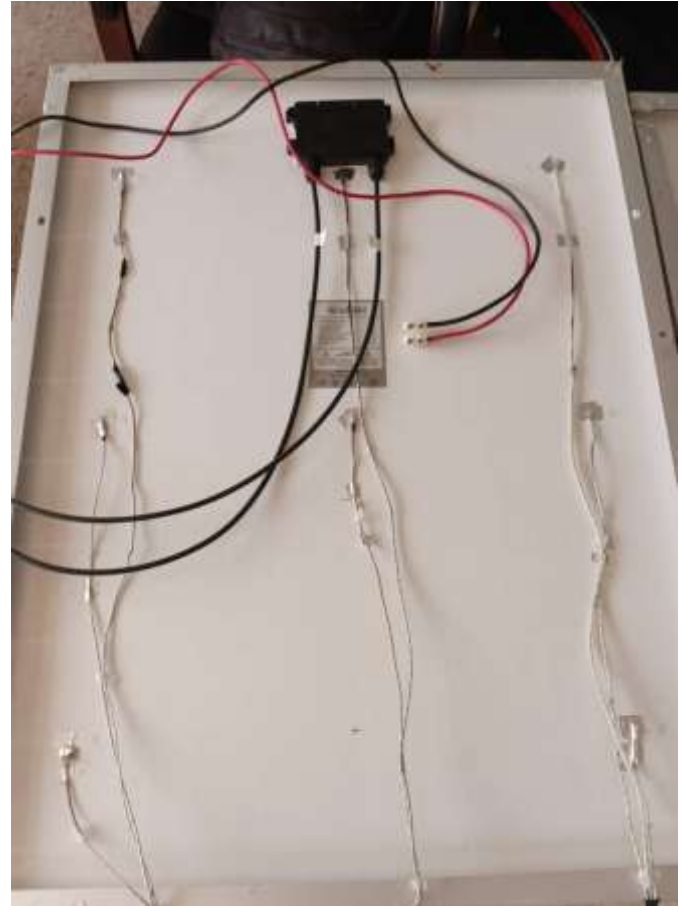
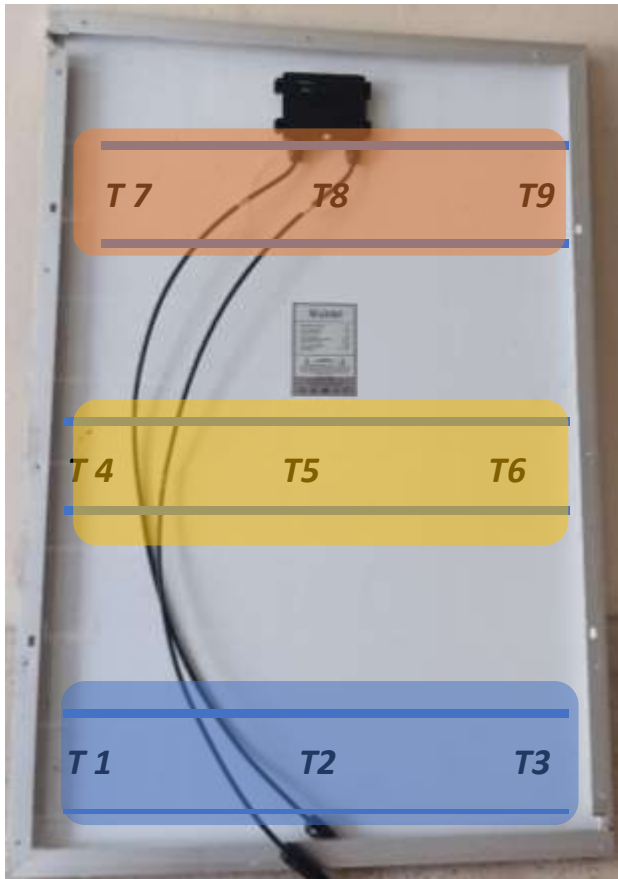
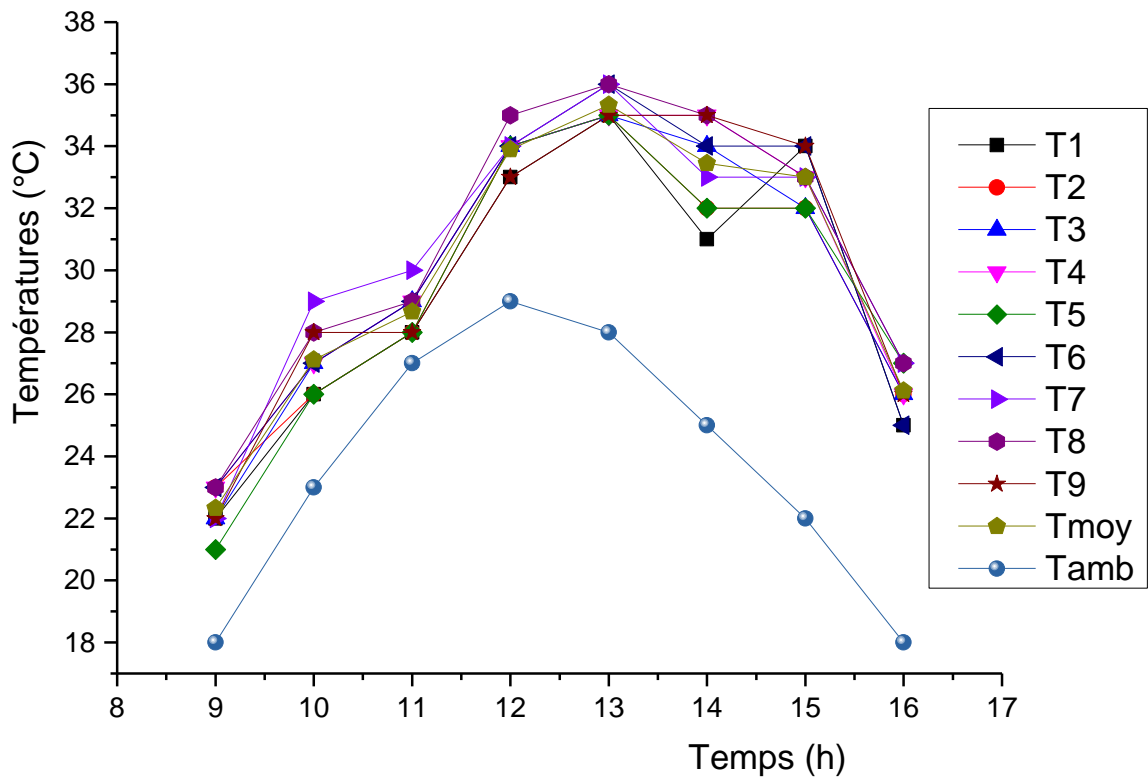


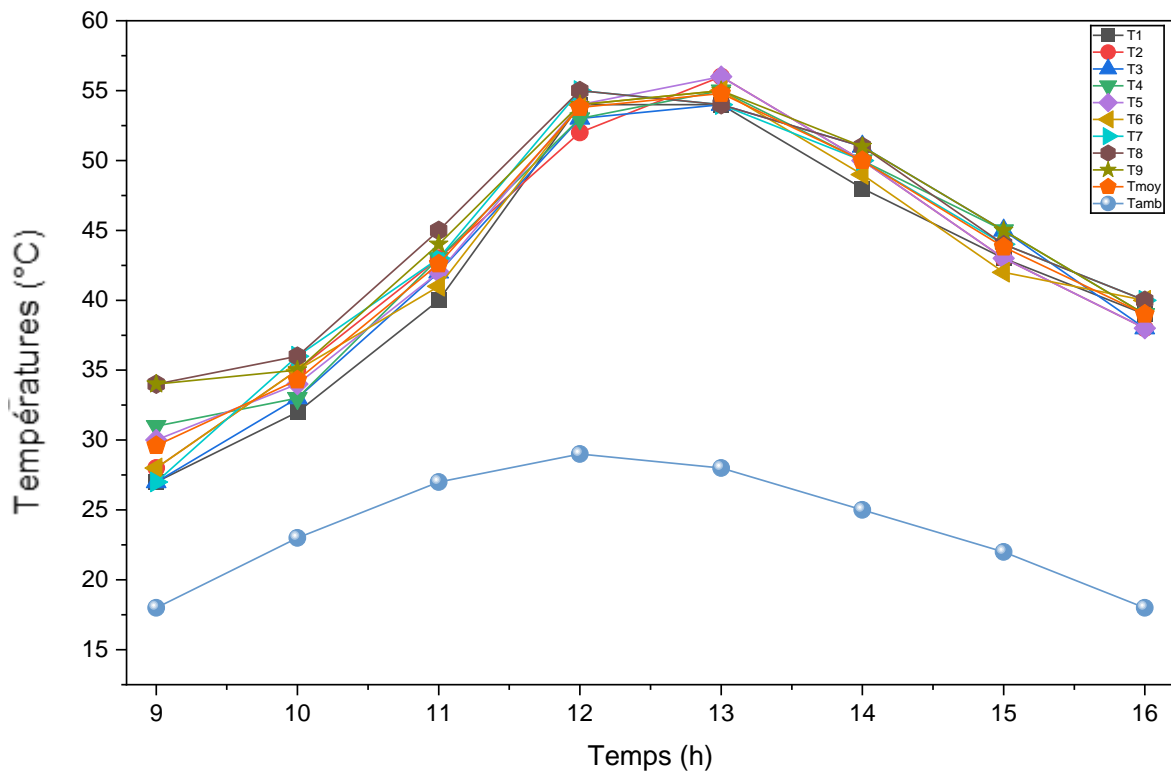
Figure 5. 1: Position des capteurs de température

**Tableau 5. 1: Relevé de températures de panneaux solaires avec/sans réflecteurs**

<b>Temp</b>	<b>Type</b>	<b>T<sub>1</sub></b>	<b>T<sub>2</sub></b>	<b>T<sub>3</sub></b>	<b>T<sub>4</sub></b>	<b>T<sub>5</sub></b>	<b>T<sub>6</sub></b>	<b>T<sub>7</sub></b>	<b>T<sub>8</sub></b>	<b>T<sub>9</sub></b>	<b>T<sub>m</sub></b>	<b>T<sub>amb</sub></b>
<b>09:00</b>	Sans	22	23	22	23	21	23	22	23	22	22,3	18
	Avec	27	28	27	31	30	28	27	34	34	29,6	18
<b>10:00</b>	Sans	26	26	27	27	26	27	29	28	28	27,1	23
	Avec	32	35	33	33	34	35	36	36	35	34,3	23
<b>11:00</b>	Sans	28	28	29	29	28	29	30	29	28	28,7	27
	Avec	40	43	42	43	42	41	43	45	44	42,6	27
<b>12:00</b>	Sans	33	34	34	34	34	34	34	35	33	33,9	29
	Avec	54	52	53	53	54	54	55	55	54	53,8	29
<b>13:00</b>	Sans	35	35	35	35	35	36	36	36	35	35,3	28
	Avec	54	56	54	55	56	55	54	54	55	54,8	28
<b>14:00</b>	Sans	31	32	34	35	32	34	33	35	35	33,4	25
	Avec	48	50	51	50	50	49	50	51	51	50,0	25
<b>15:00</b>	Sans	34	32	32	33	32	34	33	33	34	33,0	22
	Avec	43	43	45	45	43	42	44	44	45	43,8	22
<b>16:00</b>	Sans	25	26	26	26	27	25	27	27	26	26,1	18
	Avec	39	38	38	39	38	40	40	40	39	39	18



**Figure 5. 2: Evolution temporelles des (09) capteurs de température du panneau (sans reflecteur)**



**Figure 5. 3: Evolution temporelles des (09) capteurs de température du panneau (avec reflecteur)**

Les figures 5.2 et 5.3 présentent l'évolution temporelle des températures relevées par les neuf capteurs (T1 à T9) disposés sur la surface arrière du panneau solaire, ainsi que la température ambiante ( $T_{amb}$ ) et la température moyenne du panneau ( $T_{moy}$ ), respectivement dans les configurations sans et avec réflecteurs. L'analyse comparative de ces deux graphiques révèle des insights fondamentaux sur l'impact thermique des réflecteurs.

Une observation constante et cruciale, valable pour les deux configurations (Fig. 5.2 et 5.3), est que la courbe de la température moyenne ( $T_{moy}$ ) est systématiquement et rigoureusement encadrée entre les températures minimale et maximale enregistrées par les capteurs individuels (T1 à T9) à chaque instant. Cette caractéristique est directement conforme aux principes fondamentaux de la thermodynamique et des statistiques : la moyenne d'un ensemble de valeurs est intrinsèquement bornée par la plus petite et la plus grande de ces valeurs. La courbe de  $T_{moy}$  représente ainsi une synthèse fidèle de l'état thermique global du module, en agrégeant les variations locales inhérentes à la distribution de l'irradiation, aux hétérogénéités de dissipation thermique

La comparaison directe entre la figure 5.2 (sans réflecteurs) et la figure 5.3 (avec réflecteurs) met en évidence un effet thermique majeur et une élévation substantielle de la température du module due à l'ajout des réflecteurs.

**Augmentation Générale des Températures :** Dans la configuration avec réflecteurs (Fig. 5.3), l'ensemble des températures du panneau (individuelles et moyenne) est drastiquement plus élevé par rapport à la configuration sans réflecteurs (Fig. 5.2). Le pic de température moyenne sans réflecteur est observé aux alentours de  $29^{\circ}\text{C}$  vers 12h-13h, tandis qu'avec les réflecteurs, ce pic atteint environ  $55^{\circ}\text{C}$  à la même période. Cette augmentation de l'ordre de  $26^{\circ}\text{C}$  pour la température moyenne illustre clairement l'efficacité des réflecteurs à rediriger un flux solaire additionnel vers la surface active du module.

**Amplification du Différentiel Thermique :** L'écart entre la température du panneau ( $T_{moy}$ ) et la température ambiante ( $T_{amb}$ ) est considérablement amplifié en présence des réflecteurs. Alors que cet écart est modéré sans réflecteurs, il devient très

prononcé avec eux, soulignant l'intensification de l'énergie absorbée par le module et, par conséquent, l'augmentation du gradient thermique par rapport à l'environnement.

ces figures mettent en lumière un compromis énergétique fondamental : l'optimisation de l'irradiation par concentration s'accompagne d'un coût thermique non négligeable. Pour exploiter pleinement les bénéfices des réflecteurs sans dégrader excessivement le rendement global du système, la mise en œuvre de solutions de gestion thermique (ventilation forcée, matériaux à changement de phase, systèmes de refroidissement, etc.) devient impérative. La poursuite de l'étude devra donc intégrer une analyse détaillée de ce compromis et proposer des stratégies d'atténuation de l'échauffement.

**Tableau 5. 2: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs**

Temps	Sans réflecteurs				Avec réflecteurs				Amélioration	
	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	Courant (%)	Tension (%)
9h	804	23,33	3,33	22	1084	30,11	4,98	22,1	49,55%	0,45%
10h	844	27,11	4,71	22	1160	34,44	5,12	22,1	8,7%	0,45%
11h	920	29,12	4,78	22,1	1260	43,89	<b>5,24</b>	<b>22</b>	9,62%	0%
12h	1044	34,78	4,85	22,1	1320	<b>53,67</b>	<b>5,26</b>	<b>21,8</b>	8,45%	<b>-1,35 %</b> ↓ □
13h	1025	35,89	4,82	22,1	1290	<b>55,88</b>	<b>5,22</b>	<b>21,6</b>	8,29%	<b>-2,26 %</b> ↓ □
14h	1010	34,56	4,73	22	1170	50,22	5,06	21,8	6,97%	<b>-0,9 %</b> ↓ □
15h	998	33,33	4,03	21,9	1080	44,54	4,90	21,9	21,60%	0%
16h	861	26,78	3,86	21,5	1005	39,23	4,66	22	20,72%	2,33%

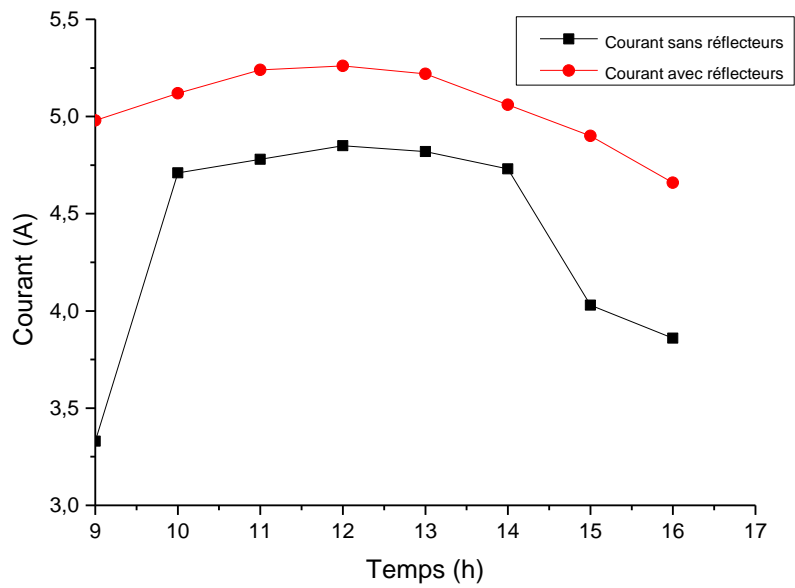
L'amélioration relative du courant a été calculée à l'aide de la formule suivante :

$$x\% = \frac{(I_{sc} \text{ avec} - I_{sc} \text{ sans})}{I_{sc} \text{ sans}} \times 100$$

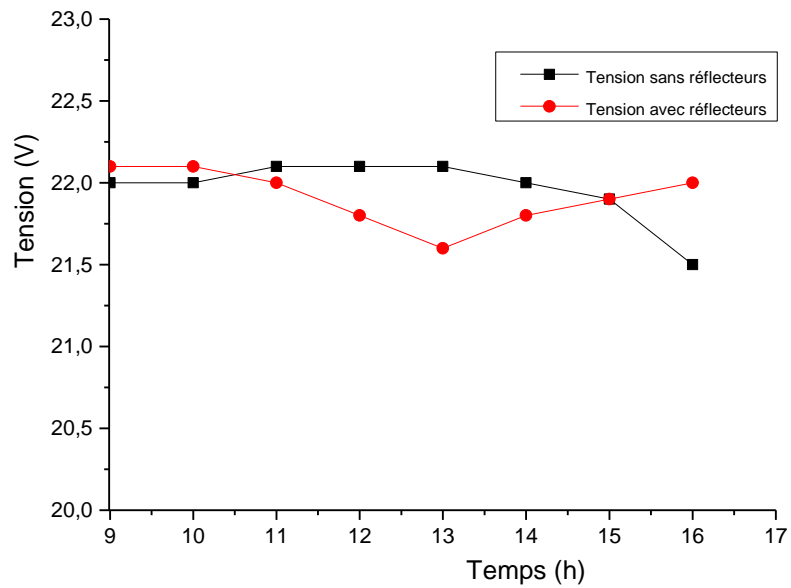
**Exemple de calcul** : soient les coordonnées à 9h :  $\left(\frac{4,98-3,33}{3,33}\right) \times 100 \approx 49,5\%$

**Moyenne globale d'amélioration du courant I<sub>sc</sub>** :  $\approx 16,73 \%$

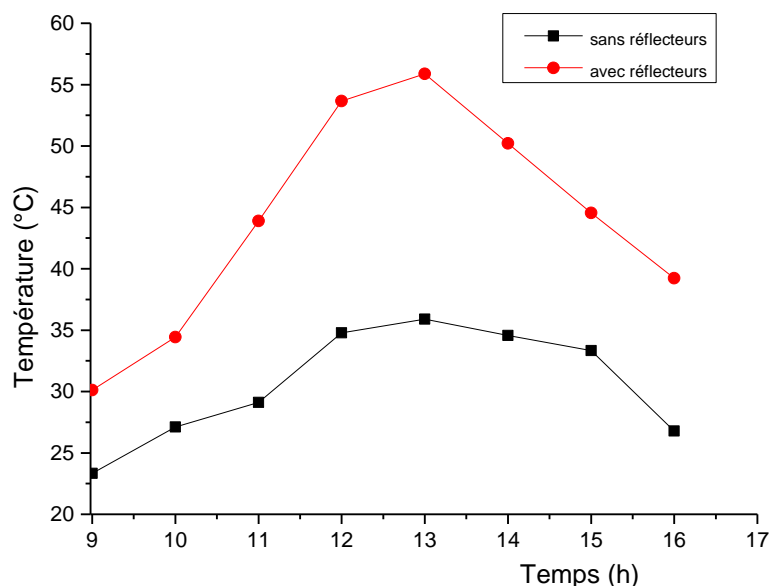
**Moyenne globale de variation de la tension V<sub>oc</sub>** : **-1,28%**



**Figure 5. 4: Evaluation des courants entre les deux panneaux solaires**



**Figure 5. 5: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires**



**Figure 5. 6: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires**

À travers l'analyse comparative des performances photovoltaïques du panneau solaire dans les deux configurations sans et avec réflecteurs, il ressort que l'ajout de réflecteurs a entraîné une amélioration significative du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) (Fig. 5.4). En effet, une augmentation moyenne de l'ordre de 16,73 % a été observée, avec un pic remarquable de 49,55 % à 9h, illustrant clairement l'effet de concentration des réflecteurs en début de journée. Cette amélioration est directement liée à l'intensification de l'irradiation incidente, rendue possible par la redirection des rayons solaires vers la surface active du module, augmentant ainsi la génération de porteurs de charges.

Néanmoins, cette stratégie d'optimisation par concentration solaire s'accompagne d'une élévation notable de la température du module (Fig. 5.6). La température maximale enregistrée avec réflecteurs atteint 55,88 °C à 13h, contre seulement 35,89 °C sans réflecteurs. Cette hausse thermique, bien qu'attendue, peut avoir des effets délétères sur certains paramètres électriques du module, notamment sur la tension.

En parallèle, l'analyse de la tension à vide ( $V_{oc}$ ) (Fig. 5.5) montre une légère diminution, avec une variation moyenne de -1,28 % entre 12h et 14h. Cette baisse peut s'expliquer par le comportement thermo-sensible des cellules photovoltaïques, dont la tension diminue généralement avec l'augmentation de la température de jonction.

Ces résultats mettent en évidence un compromis énergétique important : si l'usage de réflecteurs améliore considérablement le courant produit, donc potentiellement la puissance en sortie, il induit également un échauffement qui peut nuire à la tension et, par conséquent, au rendement global du système. L'optimisation de ce type de configuration doit donc intégrer des solutions de gestion thermique (ventilation, matériaux à changement de phase, etc.) afin de tirer pleinement parti du gain en irradiance sans en subir les effets thermiques négatifs.

## V.10 Circuit avec charge

### V.10.1 Une journée ensoleillée du 01/06/2025

Figure 5. 7: Relevé de températures de panneaux solaires avec/sans réflecteurs

Temp	Type	T <sub>1</sub>	T <sub>2</sub>	T <sub>3</sub>	T <sub>4</sub>	T <sub>5</sub>	T <sub>6</sub>	T <sub>7</sub>	T <sub>8</sub>	T <sub>9</sub>	T <sub>m</sub>
<b>09:00</b>	Sans	20	21	20	20	22	22	22	21	21	<b>21</b>
	Avec	24	25	25	26	25	26	25	26	25	<b>25,2</b>
<b>09:30</b>	Sans	20	20	21	21	22	22	22	22	21	<b>21,4</b>
	Avec	24	26	25	26	26	25	26	26	26	<b>25,5</b>
<b>10:00</b>	Sans	26	25	24	26	26	25	27	26	25	<b>25,5</b>
	Avec	32	32	30	33	30	30	32	31	31	<b>31,2</b>
<b>11:00</b>	Sans	26	26	27	26	27	27	28	29	27	<b>27</b>
	Avec	49	49	48	50	50	49	49	51	51	<b>49,5</b>
<b>11:30</b>	Sans	35	36	35	34	35	35	35	35	36	<b>35,1</b>
	Avec	56	55	56	55	57	56	57	56	57	<b>56,1</b>
<b>12:00</b>	Sans	37	36	36	36	37	36	35	35	37	<b>36,1</b>
	Avec	59	58	59	58	<b>61</b>	58	58	59	59	<b>58,5</b>
<b>12:30</b>	Sans	37	35	35	36	35	36	36	35	36	<b>35,6</b>
	Avec	58	58	57	58	59	58	57	58	59	<b>58</b>
<b>13:00</b>	Sans	35	35	35	35	35	36	36	36	35	<b>35</b>
	Avec	57	56	56	57	56	57	57	56	57	<b>55,6</b>
<b>14:00</b>	Sans	33	32	34	35	32	34	33	35	35	<b>33,6</b>
	Avec	49	50	51	50	50	49	50	51	51	<b>50,1</b>
<b>15:00</b>	Sans	31	32	32	33	32	34	33	33	34	<b>32,6</b>
	Avec	43	44	45	45	43	42	44	44	45	<b>43,8</b>
<b>16:00</b>	Sans	27	28	26	27	27	28	27	27	28	<b>27,2</b>
	Avec	39	40	38	39	38	40	38	40	39	<b>39</b>

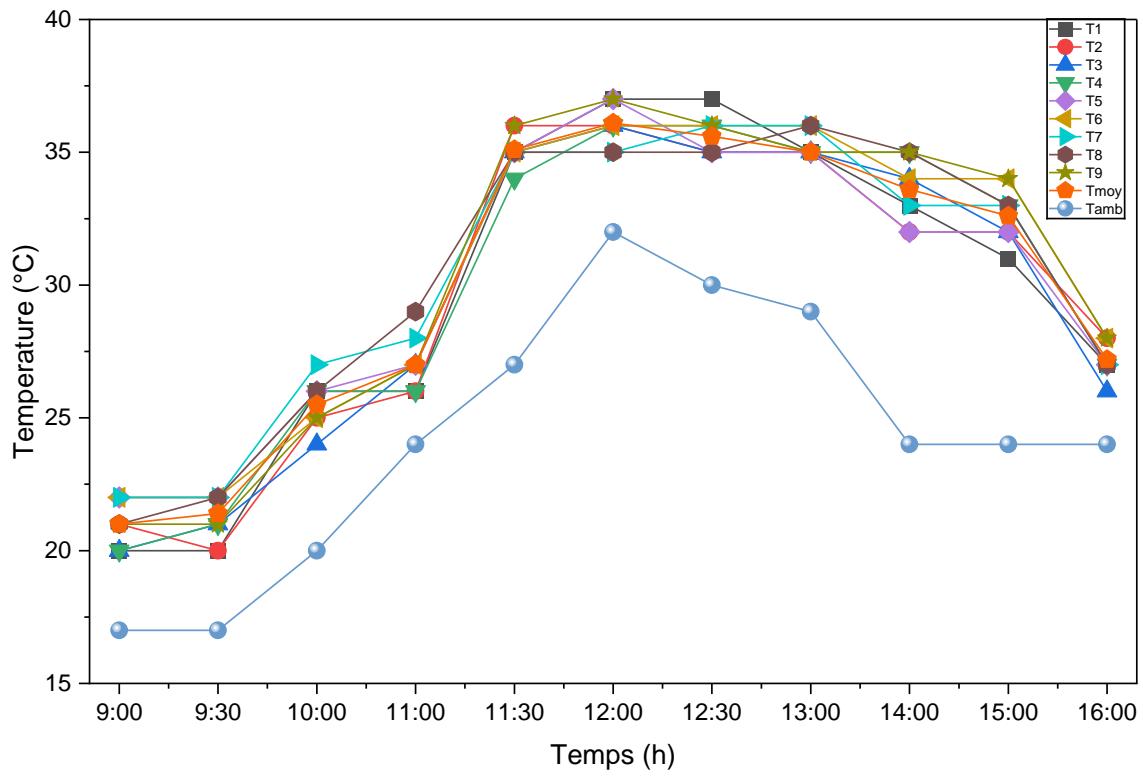


Figure 5. 8: Variations Horaires des Températures de panneaux sans réflecteur

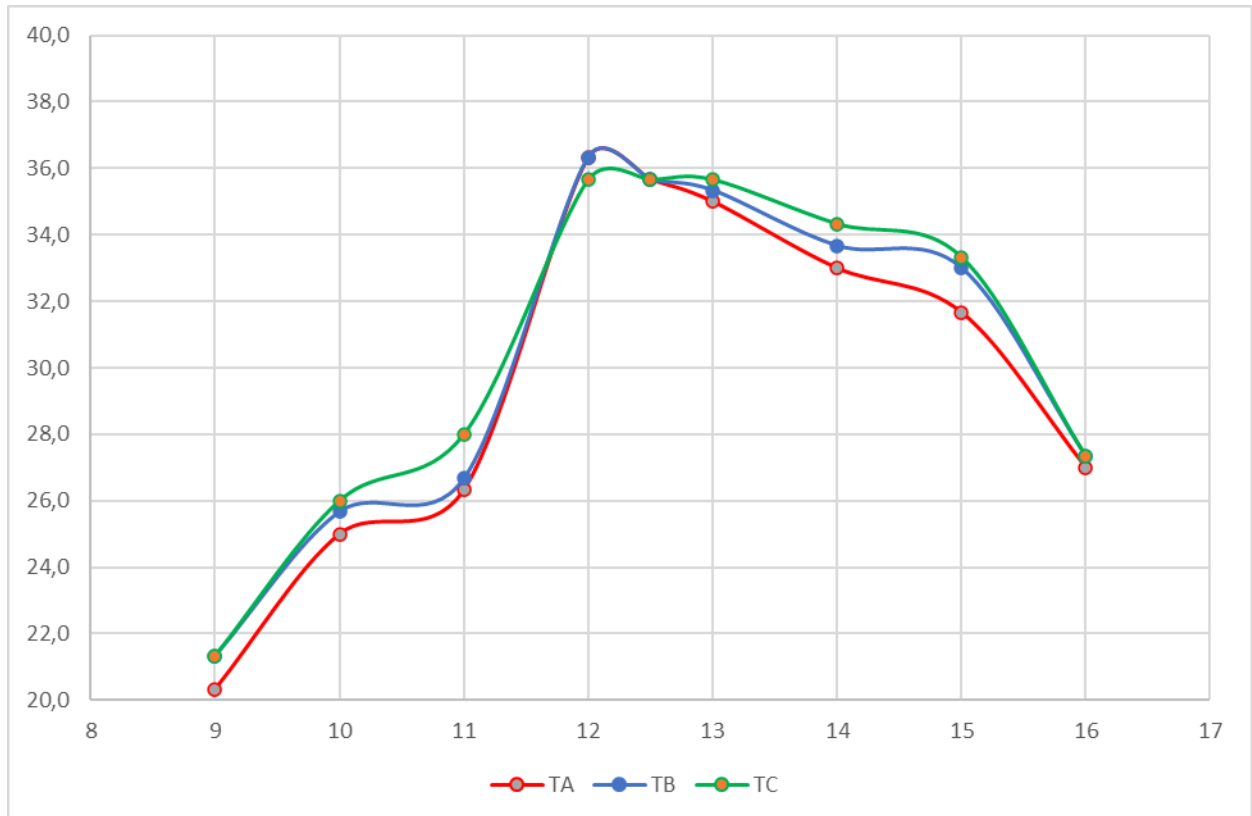


Figure 5. 9: Suivi des moyennes de température

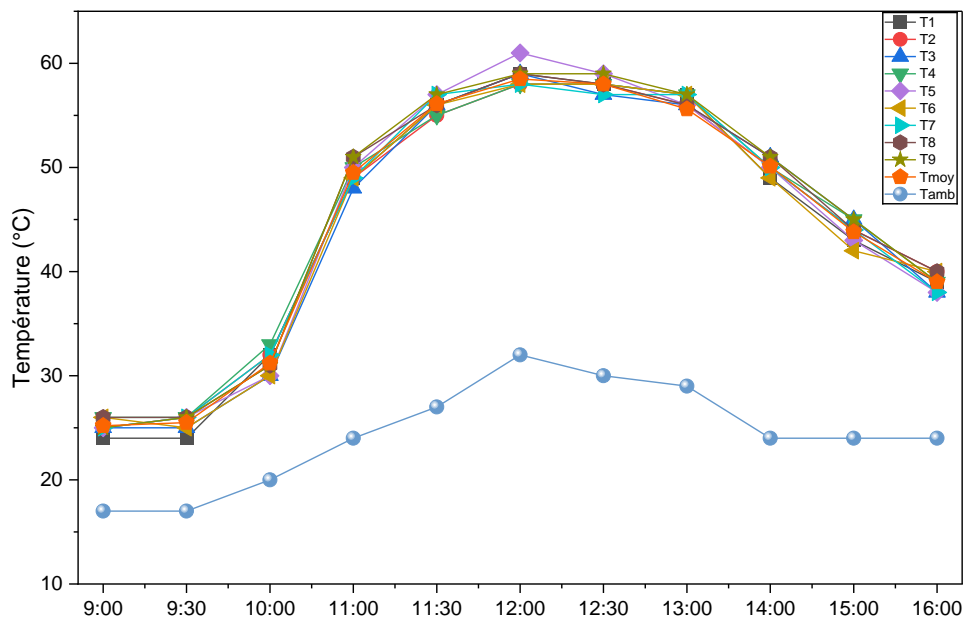


Figure 5. 10: Variations Horaires des Températures de panneaux avec réflecteur

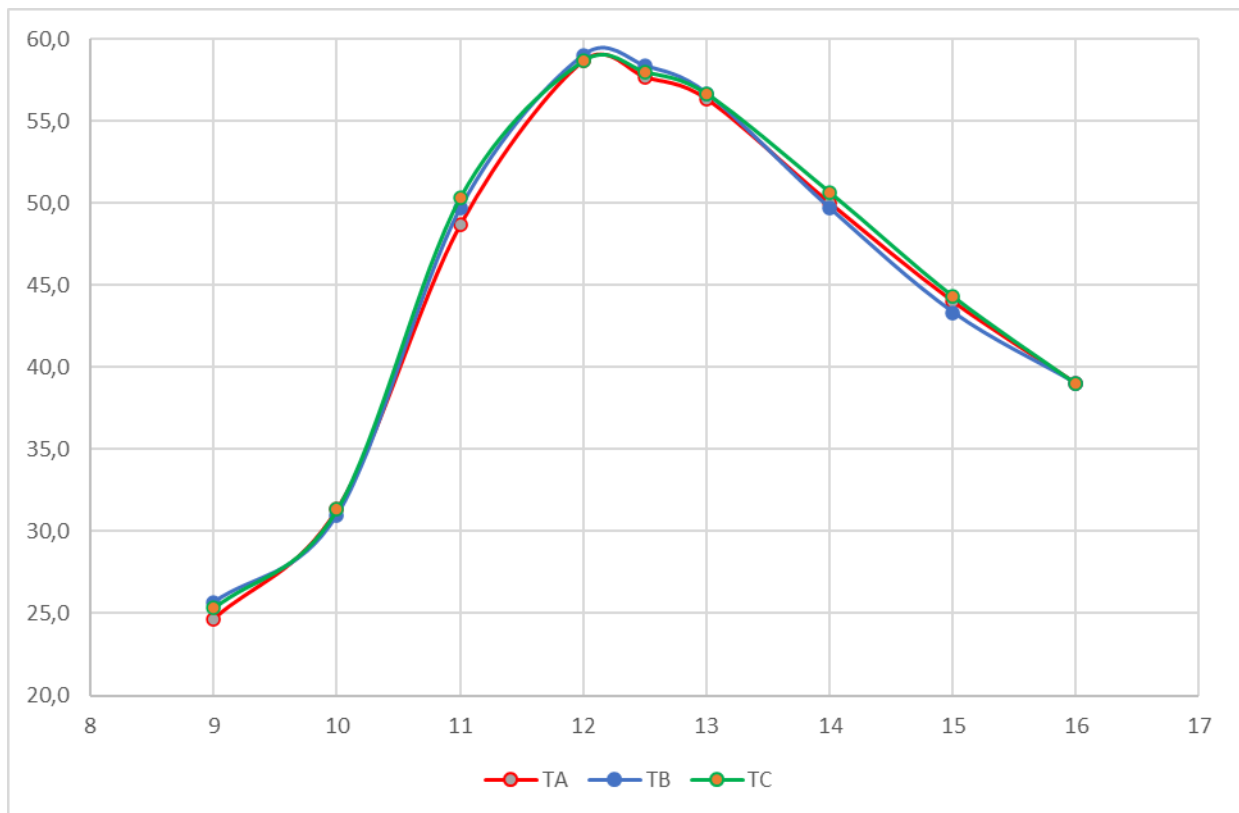
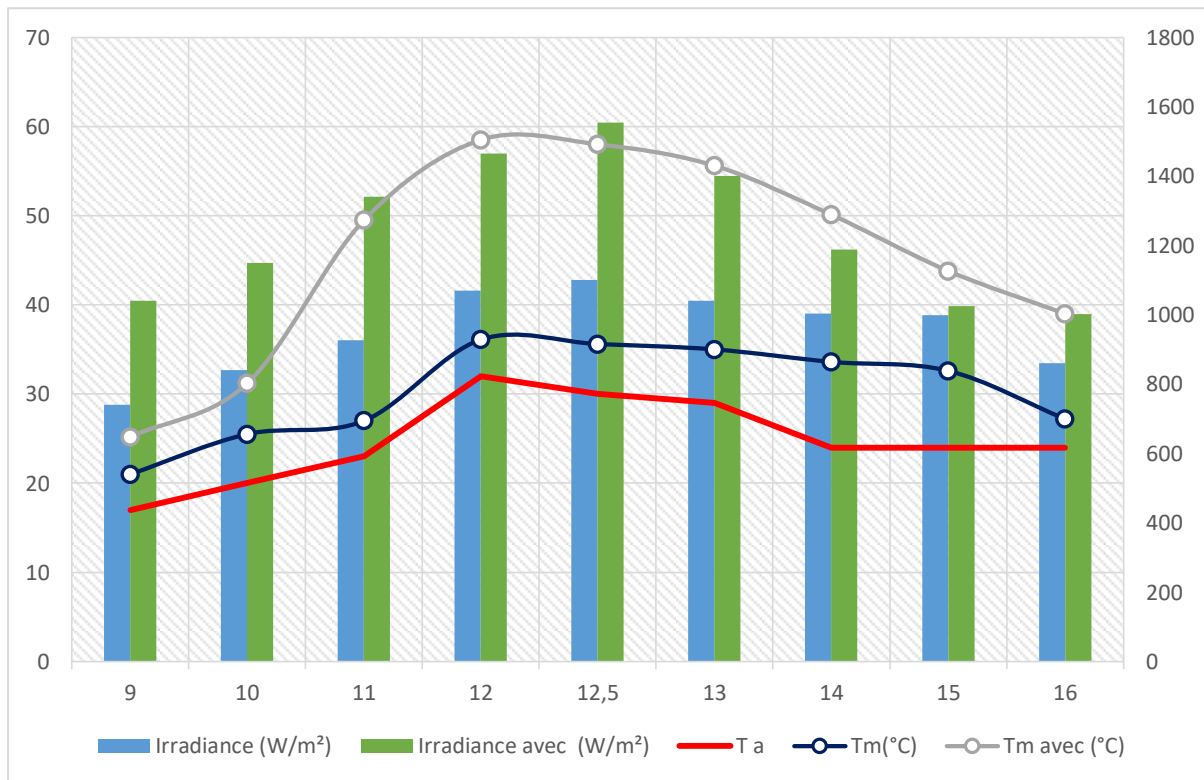


Figure 5. 10: Suivi des moyennes de température



**Figure 5. 11: Évolution Horaires de l'Irradiation (Avec et Sans Réflecteur) et des Températures (Ambiante et Moyennes des Panneaux)**

#### **V.10.1.1 Analyse de l'effet du rayonnement et de la convection sur la température des panneaux solaires : étude expérimentale et recommandations de mesure**

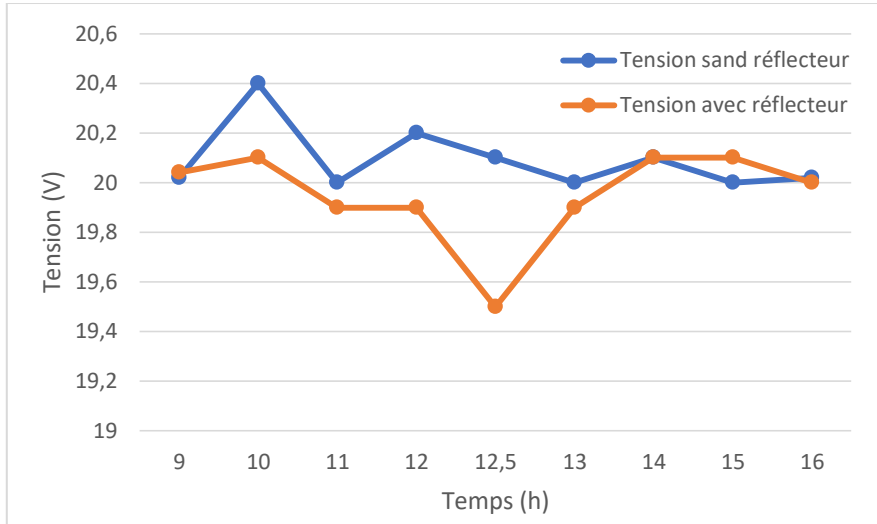
L'analyse des données thermiques montre une certaine homogénéité entre la température ambiante et celle du panneau solaire, avec une corrélation évidente entre l'élévation de l'irradiation et l'augmentation des températures mesurées. Toutefois, l'étude de la température moyenne du panneau révèle également l'influence du phénomène de convection thermique, même si elle semble minime à première vue.

En effet, des écarts de température ont été constatés entre la partie supérieure et inférieure du panneau, atteignant parfois une différence d'un degré Celsius, difficilement explicable sans faire appel à la convection naturelle. À cela s'ajoute l'effet potentiel du vent localisé, qui peut accentuer ou atténuer ces écarts. Ainsi, pour une confirmation rigoureuse des résultats expérimentaux et une meilleure caractérisation thermique du panneau, il est recommandé de disposer plusieurs capteurs de température répartis uniformément sur toute la surface du module. Cette

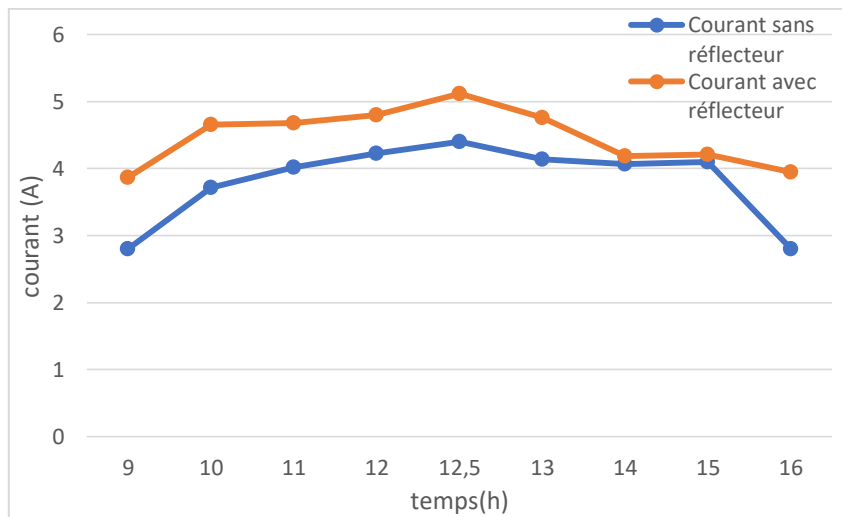
approche permettrait une analyse plus fine et plus précise du comportement thermique du système .

**Tableau 5. 3: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs**

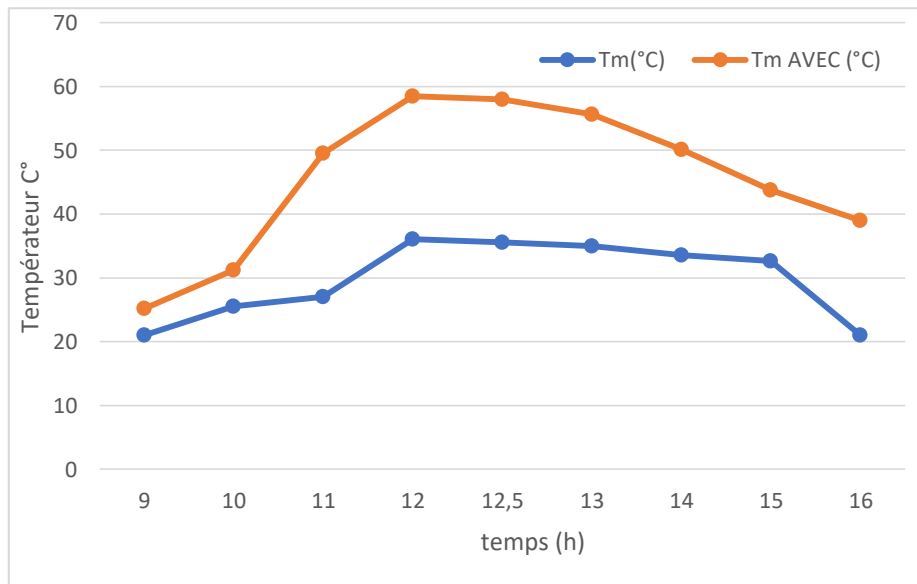
Temps	Sans réflecteurs				Avec réflecteurs				Amélioration	
	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I(A)	V(V)	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I(A)	V(V)	Courant (%)	Tension (%)
<b>9h</b>	740	21	2,8	20,02	1040	25,2	3,87	20,04	38,21%	0,09%
<b>10h</b>	840	25,5	3,72	20,4	1150	31,2	4,66	20,1	25,27%	-1,47%
<b>11h</b>	926	27	4,02	20	1340	49,5	<b>4,68</b>	<b>19,9</b>	14,7%	-0,5%
<b>12h</b>	1070	<b>36,1</b>	<b>4,23</b>	<b>20,2</b>	1465	<b>58,5</b>	<b>4,8</b>	<b>19,9</b>	3,67%	<b>-1,49%</b>
<b>12h30</b>	1100	35,6	<b>4,4</b>	<b>20,1</b>	1554	<b>58</b>	<b>5,12</b>	<b>19,5</b>	9,4%	<b>-2,98%</b>
<b>13h</b>	1040	35	4,14	20	1400	<b>55,6</b>	<b>4,76</b>	<b>19,9</b>	4,16%	-0,5%
<b>14h</b>	1003	33,6	4,07	20,1	1188	<b>50,1</b>	<b>4,19</b>	20,1	-0,71%	0%
<b>15h</b>	998	32 ,6	4,1	20	1025	43,8	4,21	20,1	0,72%	0,5%
<b>16h</b>	740	21	2,8	20,02	1002	39	3,95	20	3,95%	0%



**Figure 5. 12: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires**



**Figure 5. 13: Evaluation des courants entre les deux panneaux solaires**



**Figure 5. 14: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires**

L'ajout de réflecteurs entraîne une augmentation significative du courant généré (Fig. 5.13), particulièrement en début de journée. Par exemple, à 9h, le courant passe de 2,8 A à 3,87 A, soit une amélioration de 38,21 %. Cette hausse est directement corrélée à l'augmentation de l'irradiation (de 740 W/m<sup>2</sup> à 1040 W/m<sup>2</sup>), démontrant l'efficacité des réflecteurs pour concentrer les rayons solaires sur la surface du panneau. Cependant, l'amélioration diminue en milieu de journée (par exemple, 3,67 % à 12h), probablement en raison de la saturation des cellules et de l'élévation de la température.

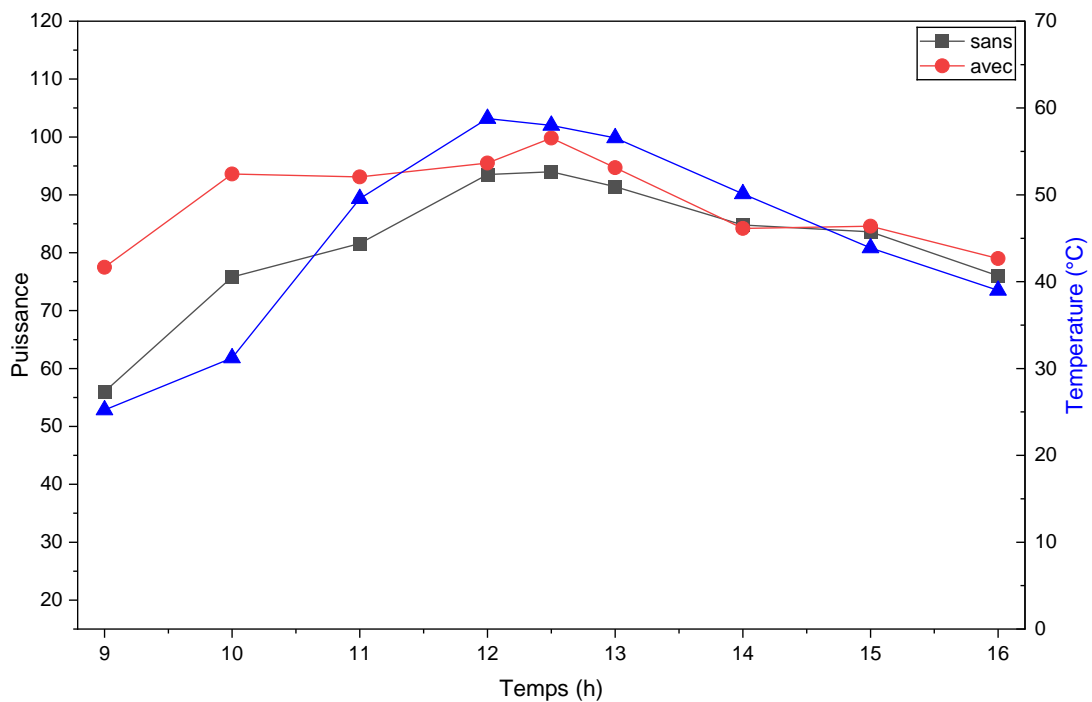
La tension reste relativement stable, avec des variations mineures entre les deux configurations (Fig. 5.12). Les réflecteurs induisent une légère baisse de la tension dans certains cas (par exemple, -2,98 % à 12h30), attribuable à l'augmentation de la température des cellules, qui affecte négativement la tension de sortie. Ce phénomène s'explique par les propriétés des semi-conducteurs : la tension d'une cellule photovoltaïque diminue typiquement de 0,3 % à 0,5 % par °C en raison de l'augmentation des recombinaisons électron-trou et de la réduction de la bande interdite (*bandgap*). Bien que le courant puisse légèrement augmenter sous forte irradiation, la puissance globale du système est souvent compromise, car la perte en tension dépasse le gain marginal en courant. Ce comportement thermo-sensible, bien

documenté dans la littérature, confirme la nécessité de contrôler la température pour préserver l'efficacité du panneau.

La température moyenne des panneaux équipés de réflecteurs est systématiquement plus élevée que celle des panneaux sans réflecteurs (Fig. 5.14). À 12h, par exemple, la température atteint 58,6 °C avec réflecteurs contre 36,1 °C sans réflecteurs. Cette hausse thermique, bien qu'attendue, souligne la nécessité de mettre en place des stratégies de refroidissement pour éviter une dégradation des performances à long terme.

**Tableau 5. 4: Amélioration de la puissance**

<b>P (W) avec</b>	<b>P (W) sans</b>	<b>Amélioration (%)</b>
56	77.5	38.4
75.8	93.6	23.4
81.6	93.1	14.1
93.5	95.5	2.1
94	99.8	6.1
91.4	94.7	3.6
84.8	84.2	-0.7
83.6	84.6	1.2
76	79	3.9



**Figure 5. 15: Impact de la température sur le Puissance électrique**

L'expérimentation menée le 1er juin 2025, dans des conditions de journée ensoleillée et avec un circuit en charge, a permis de quantifier l'impact de l'utilisation de réflecteurs sur les performances d'un panneau solaire. Les résultats démontrent que les réflecteurs augmentent de manière significative l'apport énergétique, ce qui se traduit par une hausse de l'irradiation et de la température de fonctionnement du panneau. À midi (12h00), la température du module avec réflecteurs a atteint un pic de 58,5°C, contre 36,1°C pour le module sans réflecteurs, alors que la température ambiante était de 32°C.

Cette concentration d'énergie a eu des effets directs sur les paramètres électriques :

- **Le courant (I) :** Une amélioration notable du courant a été observée, avec un gain moyen de 11,04 % sur l'ensemble de la journée. L'amélioration a atteint jusqu'à 38,21 % en début de matinée (9h).
- **La tension (V) :** L'échauffement plus important du panneau a provoqué une légère dégradation de la tension, avec une variation moyenne de -0,70 %. Cette baisse a été plus marquée aux heures les plus chaudes, atteignant -2,98 % à 12h30.

- **La puissance (P) :** Malgré la légère baisse de tension, le gain substantiel en courant a entraîné une amélioration globale de la puissance électrique produite. L'amélioration de la puissance a été particulièrement significative, avec des pics comme celui de 38,4 % à 9h.

En conclusion, l'ajout de réflecteurs s'avère être une stratégie très efficace pour augmenter le rendement énergétique d'un panneau photovoltaïque lors d'une journée ensoleillée. L'augmentation considérable du courant généré compense largement la faible diminution de la tension due à l'élévation de la température, résultant en une production de puissance globale nettement supérieure.

## V.10.2 Une journée partiellement nuageuse du 11/06/2025

Tableau 5. 5: Relevés de température de panneaux solaires avec/sans réflecteur

Temp	Type	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	TM
<b>09:30</b>	<b>Sans</b>	20	21	20	21	21	21	21	23	20	<b>21</b>
	<b>Avec</b>	24	26	25	26	26	25	27	26	26	<b>26</b>
<b>10:00</b>	<b>Sans</b>	20	20	21	21	20	21	22	23	21	<b>21</b>
	<b>Avec</b>	22	22	23	24	22	22	25	23	24	<b>23</b>
<b>11:00</b>	<b>Sans</b>	22	22	21	22	22	23	23	23	22	<b>22</b>
	<b>Avec</b>	25	25	24	26	24	25	25	26	26	<b>25</b>
<b>11:30</b>	<b>Sans</b>	26	27	28	27	28	28	28	28	29	<b>28</b>
	<b>Avec</b>	32	32	33	33	32	34	33	34	34	<b>33</b>
<b>12:00</b>	<b>Sans</b>	31	31	32	32	32	33	32	32	34	<b>32</b>
	<b>Avec</b>	35	37	36	38	37	39	39	38	39	<b>38</b>
<b>12:30</b>	<b>Sans</b>	34	34	33	34	34	34	34	34	35	<b>34</b>
	<b>Avec</b>	40	40	41	41	40	41	41	42	42	<b>41</b>
<b>13:00</b>	<b>Sans</b>	35	34	34	35	34	36	36	36	36	<b>35</b>
	<b>Avec</b>	40	42	41	42	42	43	43	44	44	<b>42</b>
<b>14:00</b>	<b>Sans</b>	31	32	31	32	32	33	33	32	31	<b>32</b>
	<b>Avec</b>	40	40	41	41	40	41	41	42	42	<b>41</b>
<b>15:00</b>	<b>Sans</b>	29	27	27	28	28	27	28	30	29	<b>28</b>
	<b>Avec</b>	29	30	31	31	31	32	32	34	32	<b>31</b>
<b>16:00</b>	<b>Sans</b>	23	23	24	24	25	24	26	24	25	<b>24</b>
	<b>Avec</b>	28	29	30	30	31	29	30	32	29	<b>30</b>

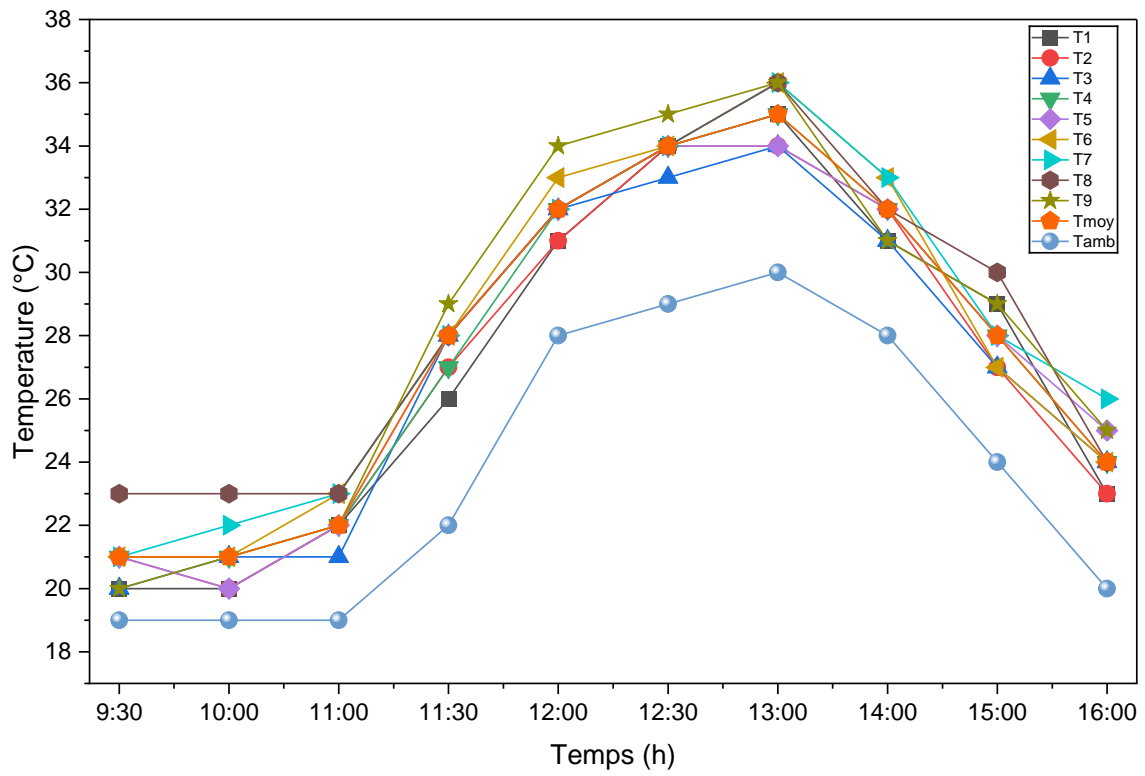


Figure 5. 16: Variations Horaires des Températures de panneaux sans réflecteur

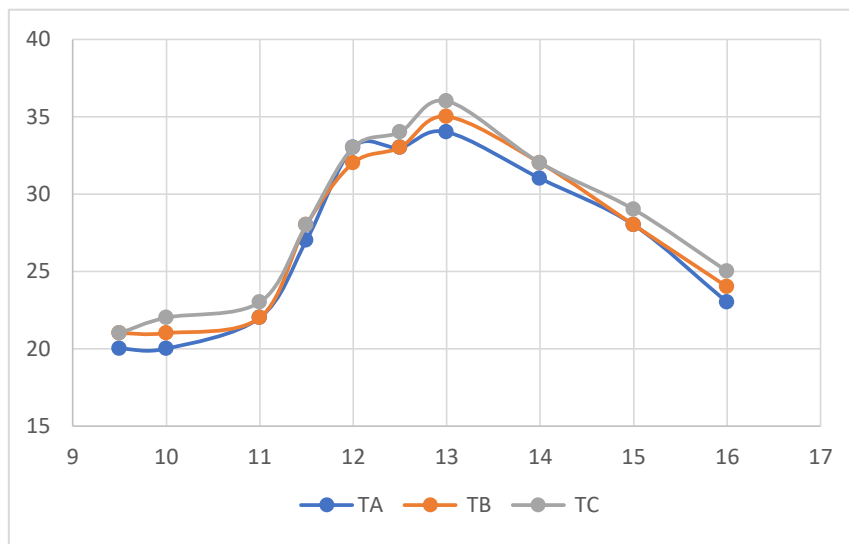


Figure 5. 17: Suivi des moyennes de température

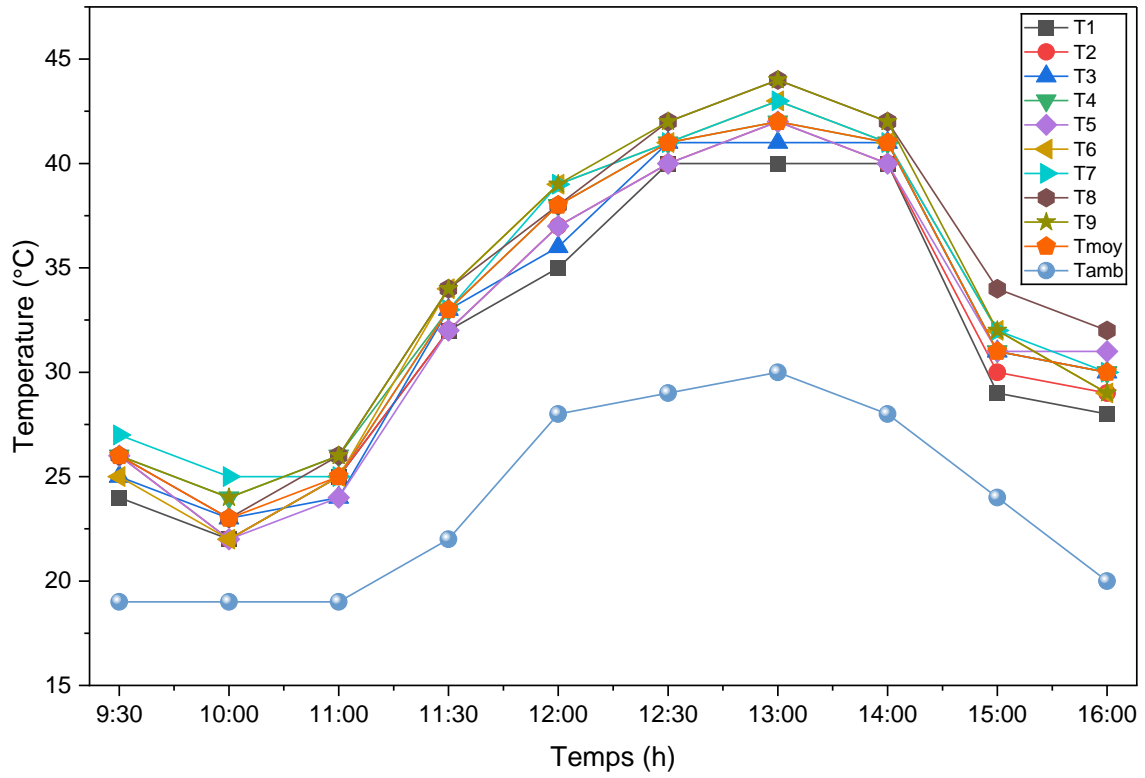


Figure 5. 18: Variations Horaires des Températures de panneaux avec réflecteur

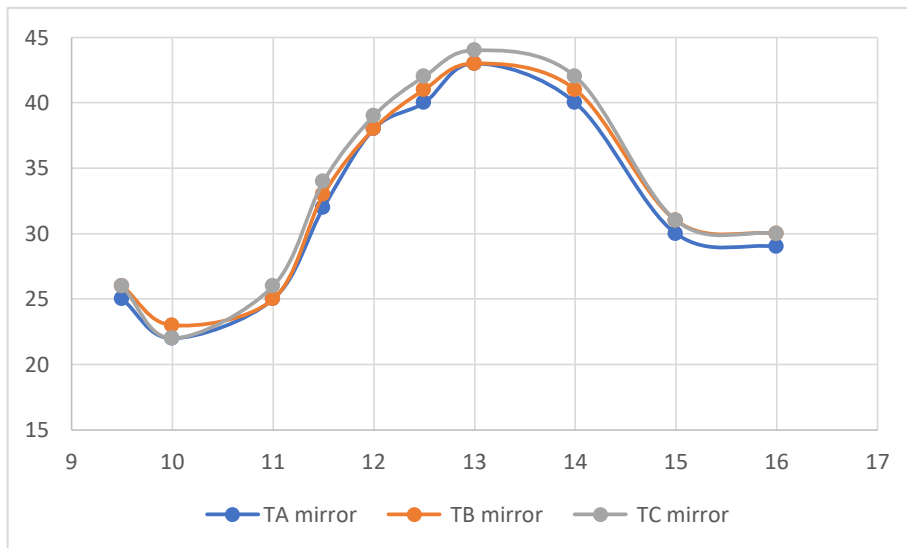
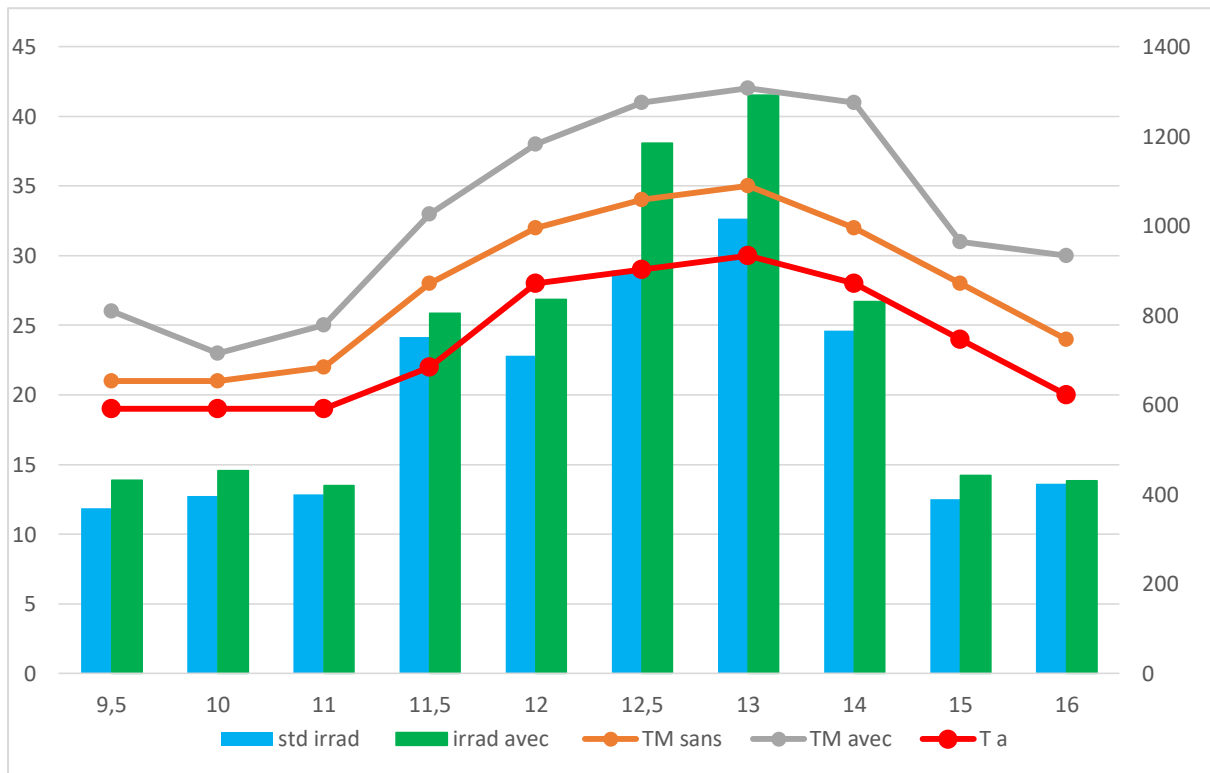


Figure 5. 19: Suivi des moyennes de température



**Figure 5. 20: Évolution Horaires de l'Irradiation (Avec et Sans Réflecteur) et des Températures (Ambiante et Moyennes des Panneaux)**

#### **V.10.2.1 Analyse de l'effet du rayonnement et de la convection sur la température des panneaux solaires**

Lors de la répétition de l'expérience dans des conditions nuageuses et instables, des valeurs thermiques comparables à celles du jour ensoleillé ont été observées. Toutefois, les températures enregistrées étaient globalement plus faibles, ce qui a facilité l'analyse des écarts thermiques. Cette baisse de température ambiante a permis une meilleure distinction des effets thermiques, en particulier ceux liés à la convection et à l'influence des réflecteurs.

**Tableau 5. 6: Performances du capteur photovoltaïque sans et avec réflecteurs**

Temps	Sans réflecteurs				Avec réflecteurs				Amélioration	
	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Irradiation (W/m <sup>2</sup> )	T <sub>m</sub> (°C)	I (A)	V (V)	Courant (%)	Tension (%)
10:00	396	21	1.5	4.0	432	23	1.9	5.4	26,7	35,0
11:00	401	22	1.4	4.0	420.2	25,1	1.9	5.3	35,7	32,5
11:30	751	28	2.4	14.0	805.5	33	2.5	15.0	4,2	7,1
12:00	710,9	32	2.4	14.0	835.5	37,6	2.6	14.7	8,3	5,0
12:30	967	34	3.6	18.3	1278.3	40,9	3.9	18.5	8,3	1,1
13:00	1016,5	35	3.4	16.7	1292.4	40,2	3.9	18.0	14,7	7,8
14:00	748,2	32	2.5	14.1	816.5	40,7	2.5	14.6	0,0	3,5
15:00	389,9	28	1.5	4.3	443	31	1.8	5.3	20,0	23,3
16:00	423,8	24	1.4	4.1	430	29,8	1.8	5.3	28,6	29,3

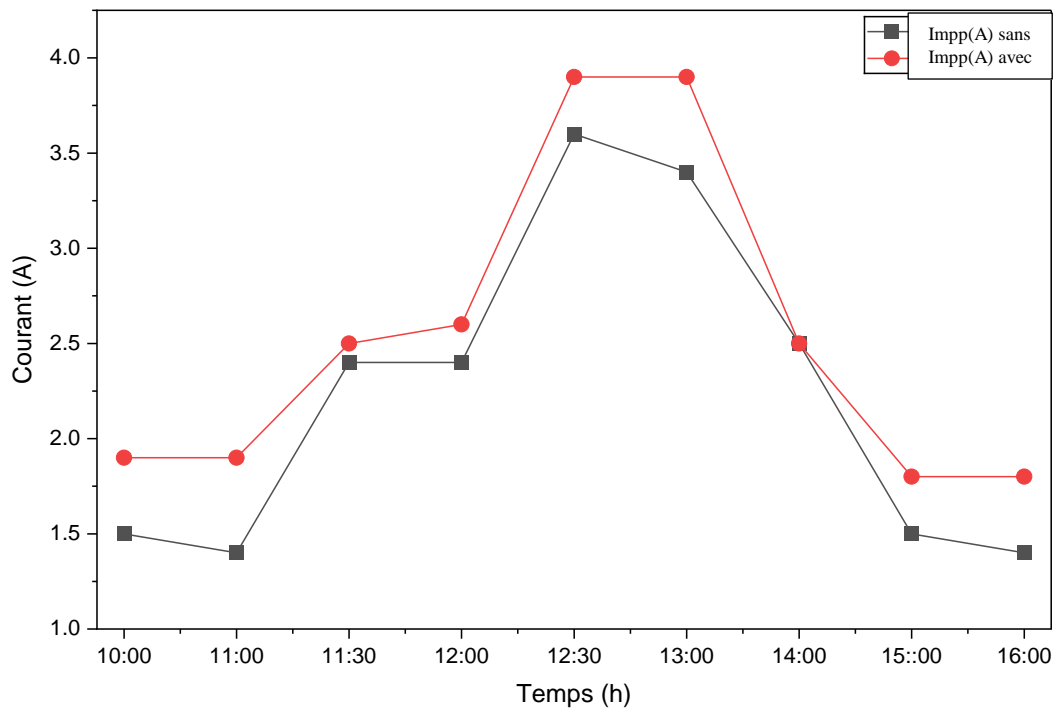


Figure 5. 21: Evaluation des courant entre les deux panneaux solaires

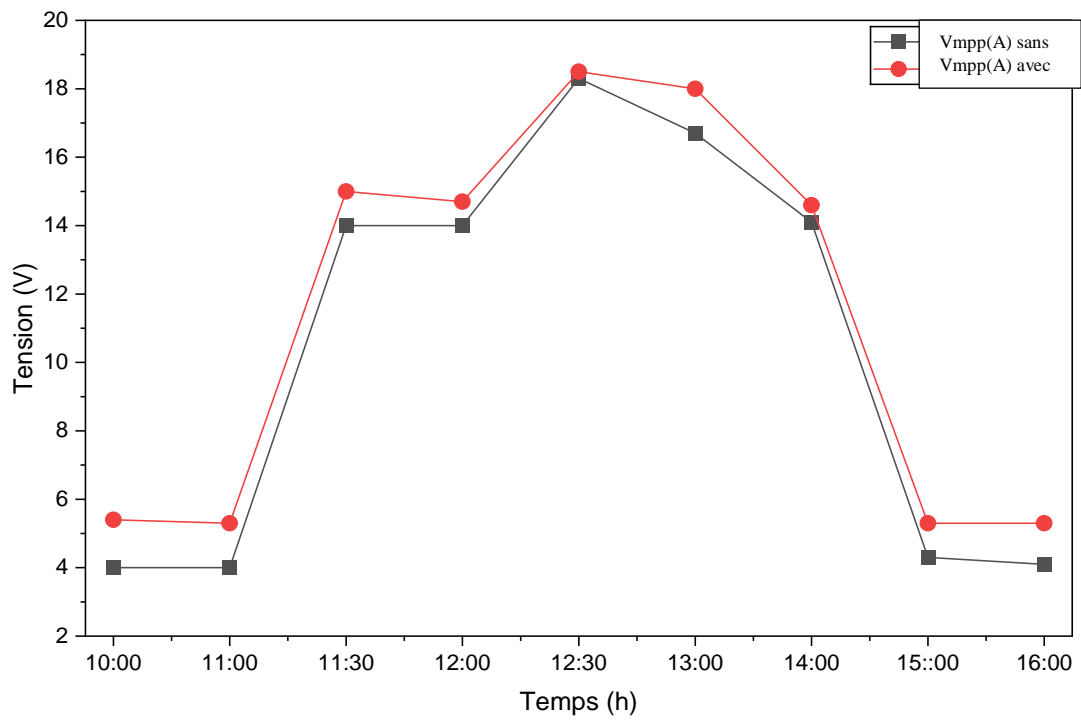
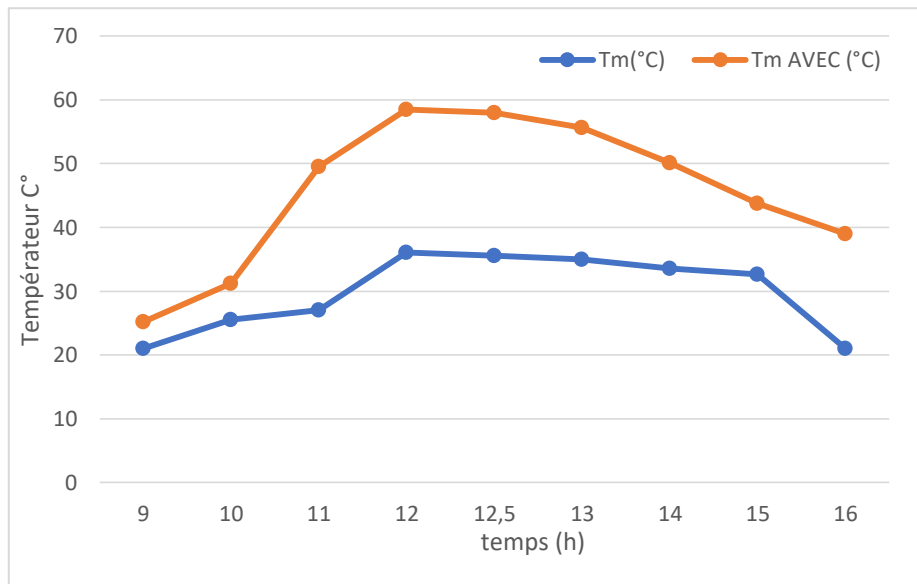


Figure 5. 22: Evaluation des tensions entre les deux panneaux solaires



**Figure 5. 23: Evaluation des températures moyennes des deux panneaux solaires**

L'ajout de réflecteurs a permis une augmentation significative du courant généré (Fig. 5.21)., avec des gains allant jusqu'à 35,7 % à 11h et 28,6 % à 16h. Ces améliorations sont particulièrement notables en début et en fin de journée, où l'irradiation naturelle est plus faible. Par exemple, à 10h, le courant passe de 1,5 Å à 1,9 Å, soit une augmentation de 26,7 %, grâce à une irradiation accrue (de 396 W/m<sup>2</sup> à 432 W/m<sup>2</sup>). Cependant, en milieu de journée (par exemple, 12h30), l'amélioration est moins marquée (8,3 %), probablement en raison de la saturation des cellules et de l'effet des nuages intermittents.

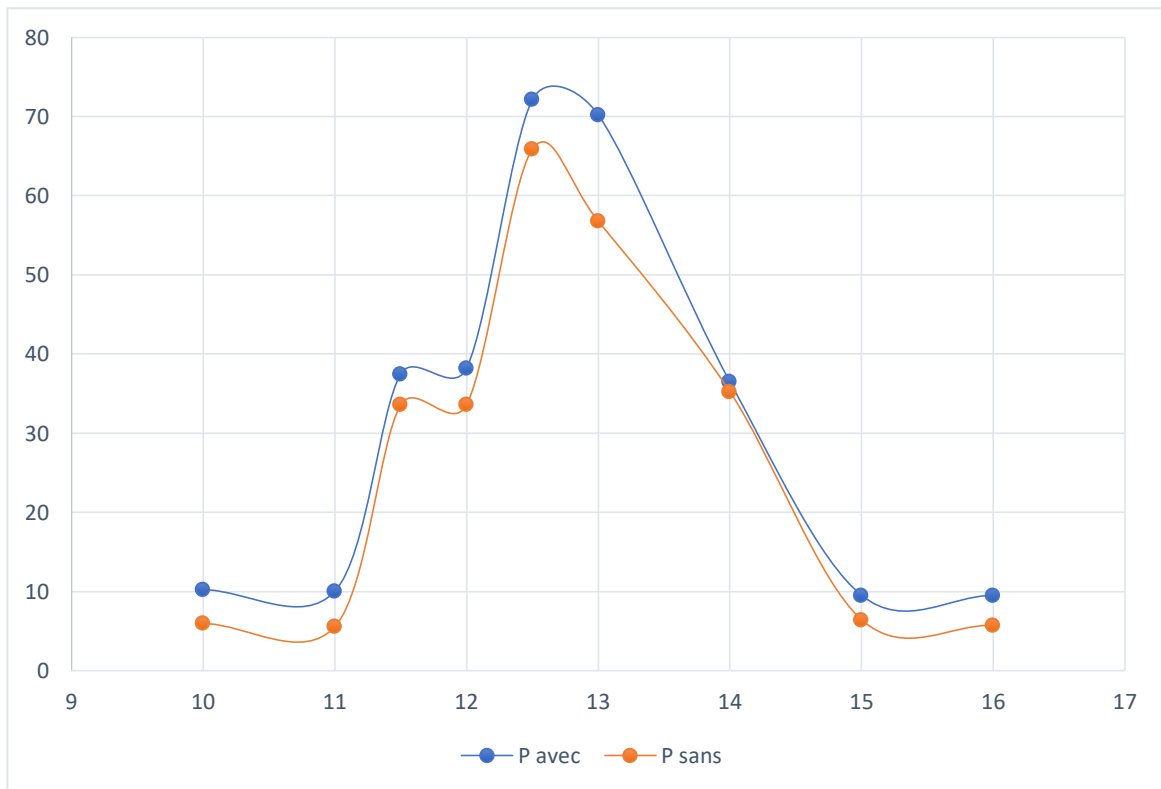
La tension montre une tendance à l'amélioration avec les réflecteurs (Fig. 5.22), contrairement aux observations sous un ciel dégagé. Par exemple, à 10h, la tension passe de 4,0 V à 5,4 V (+35,0 %), et à 11h, de 4,0 V à 5,3 V (+32,5 %). Cette augmentation pourrait s'expliquer par une combinaison de l'effet des réflecteurs et des conditions nuageuses, qui modèrent la température des cellules. Néanmoins, en milieu de journée (par exemple, 12h30), la tension n'augmente que de 1,1 %, reflétant peut-être un équilibre entre l'irradiation accrue et l'élévation thermique.

Comme attendu, les réflecteurs entraînent une hausse de la température des panneaux (Fig. 5.23). À 12h30, la température atteint 40,9 °C avec réflecteurs contre 34 °C sans réflecteurs. Bien que cette augmentation soit moins prononcée que sous un

ciel dégagé (comme dans l'exemple précédent), elle confirme que les réflecteurs amplifient l'échauffement des cellules, même sous un ensoleillement intermittent.

**Tableau 5. 7: Amélioration de puissance**

<b>P (W) avec</b>	<b>P (W) sans</b>	<b>Amélioration (%)</b>
10.26	6	71.0
10.07	5.6	79.8
37.5	33.6	11.6
38.22	33.6	13.8
72.15	65.88	9.5
70.2	56.78	23.6
36.5	35.25	3.5
9.54	6.45	47.9
9.54	5.74	66.2



**Figure 5. 24: L'impact des miroirs sur la puissance**

L'analyse des données collectées le 11 juin 2026, dans des conditions de ciel partiellement couvert, démontre de manière concluante l'efficacité des réflecteurs pour améliorer les performances des panneaux solaires. Malgré une irradiance solaire instable, caractéristique d'une journée nuageuse et humide, les résultats obtenus sont significatifs.

L'impact le plus direct a été observé sur la température des panneaux. Tout au long de la journée, les panneaux équipés de réflecteurs ont affiché des températures de fonctionnement systématiquement plus élevées que ceux sans réflecteurs. Par exemple, à 13h00, la température moyenne du panneau avec réflecteurs atteignait 42°C, contre 35°C pour le panneau sans réflecteurs.

Cette augmentation de la captation d'énergie s'est traduite par une amélioration notable des performances électriques :

- **Le courant (I)** : L'intensité du courant généré a été considérablement augmentée par l'utilisation de miroirs, avec des gains allant jusqu'à 35,7 %.
- **La tension (V)** : La tension a également connu une hausse constante, avec une variation positive pouvant atteindre 35 % à 10h00.

- **La puissance (P)** : En conséquence, la puissance de sortie a été substantiellement améliorée. L'amélioration de la puissance a été remarquable, oscillant entre 3,5 % et un pic de 79,8 %. À 12h30, la puissance est passée de 65,88 W sans miroirs à 72,15 W avec miroirs.

Il est essentiel de souligner que ces améliorations ont été obtenues dans des conditions météorologiques sous-optimales, avec une température ambiante variant de normale à fraîche (entre 19°C et 30°C). Les données montrent que même avec une irradiance fluctuante, la concentration du rayonnement solaire par les réflecteurs a permis de compenser le manque de soleil direct.

En somme, cette expérience confirme que l'ajout de réflecteurs est une stratégie viable et très efficace pour augmenter le rendement des panneaux photovoltaïques, y compris et surtout lors des journées où les conditions d'ensoleillement ne sont pas idéales.

## RESUME GLOBAL DES ESSAIS

Une série de mesures expérimentales a été menée afin de comparer les performances d'un panneau solaire avec et sans l'utilisation de miroirs réfléchissants. Les paramètres suivants ont été analysés :

- Le courant en charge ( $I_{mpp}$ )
- La tension en charge ( $V_{mpp}$ )
- Le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )
- La tension à vide ( $V_{oc}$ )
- Ainsi que l'effet de la température ambiante et de l'irradiation solaire

### V.11 Résultats des mesures en charge ( $I_{mpp}$ & $V_{mpp}$ ) journée ensoleillée

- **Courant( $I_{mpp}$ ) :**

Une amélioration significative a été observée avec l'ajout des réflecteurs, avec une augmentation moyenne de **11,04 %**.

Le gain le plus important a été enregistré à **9h**, atteignant **38,21 %**, ce qui souligne l'efficacité des miroirs en début de journée.

- **Tension( $V_{mpp}$ ) :**

Une **légère diminution** moyenne de **-0,69 %** a été constatée.

Cette baisse est principalement attribuée à l'échauffement accru des cellules dû à la concentration du rayonnement solaire.

### V.12 Résultats des mesures sans charge ( $I_{sc}$ & $V_{oc}$ )

- **Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) :**

L'amélioration a été encore plus marquée, avec une augmentation moyenne de  $\approx$  **13,41 %**. Le gain le plus notable a été enregistré à 9h, atteignant **49,55 %**, ce qui reflète l'efficacité des miroirs à capter davantage de lumière solaire à basse altitude.

- **Tension à vide ( $V_{oc}$ ) :**

Les variations de tension sont restées faibles, avec une **augmentation moyenne d'environ 0,8 %**. Certaines valeurs ont cependant montré une légère baisse en milieu de journée, en lien avec la montée en température.

### V.13 Observations thermiques et environnementales

Une **hausse notable de la température** a été enregistrée lors de l'utilisation des réflecteurs, atteignant jusqu'à **58,5 °C** à midi, contre **36,1 °C** sans réflecteurs. Cette

élévation thermique a un impact direct sur la tension générée par les modules, malgré l'amélioration du courant.

## **ANALYSE COMPARATIVE DE PERFORMANCE DES PANNEAUX SOLAIRES AVEC ET SANS REFLECTEURS**

### **Dimensions du Panneau Solaire**

- **Longueur:** 85 cm = 0.85 mètre
- **Largeur:** 65 cm = 0.65 mètre
- **Superficie du panneau:** 0.85 m×0.65 m=0.5525 m<sup>2</sup>

### **Calculs de Puissance et de Rendement**

La puissance électrique est calculée par la formule :

$$P=V \times I$$

(P est la puissance en Watts, V est la tension en Volts, et I est le courant en Ampères).

Le rendement (efficacité) est calculé par la formule:

$$\eta = P / G \times A$$

Rendement = (Puissance électrique produite/ (Irradiance×Surface du panneau))×100.

### **V.14 Panneau Solaire sans Réflecteurs**

#### **Données de la "Table 12 : Performance sans réflecteurs"**

- **À 9h00:**
  - Irradiance: 740 W/m<sup>2</sup>
  - Courant (I): 2.8 A
  - Tension (V): 20.02 V

**Puissance produite (P):** 2.8 A×20.02 V=**56.056 W**

**Rendement:** (56.056 W/(740 W/m<sup>2</sup>×0.5525 m<sup>2</sup>))×100 = **13.7%**

#### **À 12h30 (Pic d'Irradiance):**

- Irradiance: 1100 W/m<sup>2</sup>
- Courant (I): 4.68 A
- Tension (V): 20.1 V

**Puissance produite (P):** 4.68A×20.1 V=**94 W**

**Rendement:** (94 W/(1100 W/m<sup>2</sup>×0.5525 m<sup>2</sup>))×100 = **15.5%**

## V.15 Panneau Solaire avec Réflecteurs

Augmentation de l'intensité lumineuse (%)

$$((I_{\text{avec}} - I_{\text{sans}}) / I_{\text{sans}}) \times 100\%$$

-  $I_{\text{avec}}$  est l'intensité lumineuse avec réflexion.

-  $I_{\text{sans}}$  est l'intensité lumineuse sans réflexion.

**Données de la "Table 13 : Performance avec réflecteurs"**

- **À 9h00:**

$$((1040 - 740) / 740) \times 100 = 40\%$$

- Irradiance: 1040 W/m<sup>2</sup>
- Courant (I): 3.87 A
- Tension (V): 20.04 V

**Puissance produite (P):** 3.87 A × 20.04 V = **77.55 W**

**Rendement:** (77.55 W / (1040 W/m<sup>2</sup> × 0.5525 m<sup>2</sup>)) × 100 = **13.5%**

**À 12h30 (Pic d'Irradiance):**

$$((1554 - 1100) / 1100) \times 100 = 41.3\%$$

- Irradiance: 1554 W/m<sup>2</sup>
- Courant (I): 5.12 A
- Tension (V): 19.5 V

**Puissance produite (P):** 5.12 A × 19.5 V = **99.84 W**

**Rendement:** (99.84 W / (1554 W/m<sup>2</sup> × 0.5525 m<sup>2</sup>)) × 100 = **11.62%**

## CONCLUSION GENERALE

Au terme de cette étude, nous avons pu démontrer de manière claire que l'ajout de miroirs réfléchissants latéraux permet une amélioration significative du courant produit par les panneaux photovoltaïques, et ce grâce à une augmentation de l'irradiance reçue. Cette concentration lumineuse, bien que bénéfique pour la génération de charges, s'accompagne toutefois d'une élévation notable de la température du panneau, ce qui engendre une légère diminution de la tension à vide (Voc) et peut impacter négativement le rendement global du système.

L'analyse comparée entre une journée ensoleillée et une journée partiellement nuageuse a montré que, bien que les niveaux d'irradiation et de température varient, les tendances générales restent cohérentes : l'effet des réflecteurs est visible dans les deux cas, mais l'impact thermique est moins prononcé lors des journées plus fraîches, ce qui rend ces conditions idéales pour l'étude. Le support utilisé dans notre système joue également un rôle central. Grâce à sa structure ajustable, il permet de fixer précisément l'angle d'inclinaison du panneau et d'orienter les miroirs de manière optimale, assurant ainsi une expérimentation rigoureuse et reproductible. Cette conception modulaire et fonctionnelle répond à des besoins pédagogiques et expérimentaux tout en restant simple et adaptable à différentes configurations.

cette approche expérimentale confirme l'intérêt des réflecteurs pour améliorer la production photovoltaïque, tout en soulignant la nécessité d'une gestion thermique efficace pour éviter les effets contre-productifs dus à la surchauffe. Ce projet ouvre ainsi la voie à des solutions hybrides et accessibles pour optimiser les systèmes solaires dans des environnements variés

## **REFERENCES :**

- [1] M. M. Odungat, S. P. Simon, K. Ark Kumar, K. Sundareswaran, P. Srinivasarao Nayak, and N. P. Padhy, “Estimation of system efficiency and utilisation factor of a mirror integrated solar PV system,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 14, no. 10, pp. 1677–1687, Jul. 2020, doi: 10.1049/iet-rpg.2019.0804.
- [2] M. Y. Rachedi, D. Bechki, and H. Bouguettaia, “Photovoltaic module augmented by commercial reflectors in Southern Algeria: Comparison between different reflective materials,” *Acta IMEKO*, vol. 12, no. 4, Dec. 2023, doi: 10.21014/ACTAIMEKO.V12I4.1608.
- [3] A. A. Abdullah, F. S. Atallah, S. Algburi, and O. K. Ahmed, “Impact of a reflective mirrors on photovoltaic/trombe wall performance: Experimental assessment,” *Results in Engineering*, vol. 16, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100706.
- [4] Dr MANSOURI FAROUK, “Généralités-sur-les-rayonnements,” 2022.
- [5] M. E. BAUER., “RECHERCHES SUR LE RAYONNEMENT.,” PARIS, 1912. [Online]. Available: <http://books.google.com>
- [6] A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, “Evaluation of the electrical performance of a photovoltaic thermal system using nano-enhanced paraffin and nanofluids,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 21, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.csite.2020.100678.
- [7] مردودها وطاقتها الكهربائية المتولدة لماء در اسة تأثير تبريد الألواح الكهروضوئية با، “علي حمودي على،” 2014.
- [8] A. R. Amelia *et al.*, “Cooling on Photovoltaic Panel Using Forced Air Convection Induced by DC Fan,” *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 6, no. 2, p. 526, Apr. 2016, doi: 10.11591/ijece.v6i2.9118.
- [9] Z. Xu, Q. Kong, H. Qu, and C. Wang, “Cooling characteristics of solar photovoltaic panels based on phase change materials,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 41, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2022.102667.
- [10] M. T. A. A. A. O. E. A. 2 B. M. Khaled<sup>1</sup>, “AUEJ\_Volume 17\_Issue 65\_Pages 1276-1289,” *Journal of Al-Azhar*, Aug. 2022.

[11] “Multi-level fin heat sinks for solar module cooling – pv magazine International.” Accessed: Jun. 13, 2025. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2022/02/01/multi-level-fin-heat-sinks-for-solar-module-cooling/>

## Business Model Canvas

# BMC

- N° de projet : 35

Faculté/Institut :technologie

Département : génie mécanique

Nom du projet : Développement d'un système de panneaux photovoltaïques avec miroirs ajustables et suivi dynamique

Encadrant 1 : M Yousfi Sidi Med

Encadrant 2 : MGuellil Hocine

Co-encadrant 1 : M<sup>elle</sup> Missoum Khawla

Etudiants : - ACHACHI Mohamed  
- BOUFIR Mohammed

Année universitaire : 2024/2025

---

## **1. Proposition de valeur**

### **Quels problèmes résolvons-nous pour nos clients ?**

- Minimisation de la surface nécessaire pour les installations de panneaux solaires.
- Réduction des coûts d'installation en diminuant le nombre de panneaux requis.
- Réponse au problème d'espace limité pour les installations solaires chez les particuliers et les entreprises.

### **Quels besoins de nos clients satisfont nos produits ou services ?**

- Maximisation de la production solaire sur une petite surface.
- Solution énergétique solaire rentable.
- Facilitation de l'adoption de l'énergie solaire pour ceux disposant de peu d'espace.
- Source d'énergie plus écologique, réduction des coûts électriques pour l'État, contribution à un réseau net-zéro.

### **En quoi notre offre est-elle différente de celle de nos concurrents ?**

- Notre projet utilise des réflecteurs/miroirs ajustables pour maximiser la radiation lumineuse, ce qui constitue un avantage clé par rapport aux installations standards.
- Accent mis sur l'optimisation des performances, réduisant ainsi la surface et le nombre de panneaux nécessaires.

### **Quelle est notre proposition unique de valeur ?**

- "Libérez la puissance solaire maximale avec un minimum d'espace et de coût grâce à notre technologie innovante de réflecteurs ajustables, rendant l'énergie durable accessible à chaque foyer et entreprise tout en contribuant à un réseau électrique net-zéro."

---

## **2. Segments de clients**

### **Quels sont nos clients principaux ?**

- Particuliers et entreprises disposant de petites surfaces d'installation.
- Petites habitations et agriculteurs hors réseau électrique.

### **Quels sont les différents segments de clients que nous visons ?**

- Utilisateurs résidentiels : propriétaires avec peu d'espace disponible (toit ou jardin).

- Agriculteurs : en particulier ceux situés en zones isolées.
- Petites entreprises : avec un espace commercial limité.
- Secteur public/gouvernement : à long terme, pour réduire les coûts nationaux en électricité.

#### **Quels sont les besoins spécifiques de chaque segment ?**

- Résidentiel/agriculteurs : énergie fiable et économique sur petite surface.
- Petites entreprises : réduction des coûts d'exploitation, durabilité énergétique.
- Gouvernement : réduction de la dépendance aux énergies conventionnelles, gains écologiques et économiques.

#### **Comment pouvons-nous regrouper nos clients ?**

- Par surface d'installation disponible (maisons, fermes, entreprises).
- Par statut de connexion au réseau (hors-réseau vs. connecté).
- Par niveau de besoin énergétique.

---

### **3. Relation avec les clients**

#### **Quel type de relation chaque segment de clients attend-il ?**

- Petites habitations/agriculteurs : conseils personnalisés, explication claire des bénéfices, installation fiable, assistance post-installation.
- Entreprises/gouvernement : propositions professionnelles, analyses détaillées du retour sur investissement, assistance technique de qualité, solutions évolutives.

#### **Comment entretenons-nous actuellement la relation client ?**

- (En tant que start-up, à développer) Discussions et démonstrations directes.
- Recommandations par bouche-à-oreille suite aux premières installations réussies.

#### **Comment améliorer ou personnaliser nos interactions ?**

- Offrir des plans d'installation adaptés aux conditions de chaque site.
- Fournir un point de contact unique pour le support client.
- Mettre en place un service après-vente solide incluant maintenance et suivi des performances.

---

### **4. Canaux de distribution**

#### **Quels canaux nos clients préfèrent-ils ?**

- Ventes directes et consultations sur demande.
- Engagement communautaire local, surtout en zones rurales.
- Présence en ligne (site web, réseaux sociaux).
- Recommandations clients.

#### **Quels canaux sont les plus efficaces par segment ?**

- Petites habitations/agriculteurs : contact direct, foires agricoles, réunions communautaires.
- Entreprises/gouvernement : salons professionnels, force de vente B2B, appels d'offres publics.

#### **Comment intégrer différents canaux ?**

- Transition fluide de la demande en ligne à l'évaluation sur site.
  - Utilisation de témoignages clients dans tous les canaux.
  - Documents explicatifs clairs (numérique et papier).
- 

### **5. Partenaires clés**

#### **Qui sont nos partenaires clés ?**

- Fournisseurs de miroirs/réflecteurs.
- Fournisseurs de pièces mécaniques pour les mécanismes ajustables.
- Fabricants de panneaux solaires.
- Techniciens locaux en installation solaire (associés potentiels).

#### **Quels partenariats sont utiles pour optimiser coûts et valeur ?**

- Partenariat avec des techniciens : réduction des salaires initiaux et gain d'expérience terrain.
- Approvisionnement stratégique avec les fournisseurs pour assurer qualité et coût.
- Collaboration potentielle avec des centres de recherche (ex. Université de Tlemcen).

#### **Comment aligner nos intérêts avec ceux des partenaires ?**

- Offrir des parts dans l'entreprise aux techniciens.
  - Accords d'approvisionnement à long terme.
  - Marketing conjoint et partage des succès.
-

## **6. Activités clés**

### **Quelles actions principales devons-nous entreprendre ?**

- R&D sur réflecteurs standards et mécanismes mobiles simples.
- Fabrication/assemblage du système d'ajustement.
- Installation sur demande des systèmes solaires boostés.
- Marketing, acquisition de clients.
- Support client et maintenance.

### **Quelles opérations sont essentielles ?**

- Conception produit adaptée.
- Gestion de la chaîne d'approvisionnement.
- Contrôle qualité et tests.
- Gestion de projet pour chaque installation.
- Gestion financière et levée de fonds initiale.

### **Quelles activités créent le plus de valeur ?**

- Conception d'un système efficace de réflecteurs ajustables.
  - Solutions personnalisées selon le site.
  - Garantie de fiabilité et durabilité du système.
- 

## **7. Ressources clés**

### **Quels sont nos actifs essentiels ?**

- Matériels : Espace d'atelier, outils de base, véhicules pour transport.
- Immatériels : Conception propriétaire des réflecteurs, propriété intellectuelle.
- Humains : Ingénieurs mécaniciens, spécialistes en énergie renouvelable, techniciens expérimentés.

### **Quels outils, technologies, partenariats sont nécessaires ?**

- Logiciels de CAO.
- Équipements de test pour radiation solaire et production.
- Partenariats avec techniciens locaux.
- Financement initial (3 million DZD).

### **Quels avantages offrent nos ressources ?**

- Expertise technique en énergie renouvelable et mécanique.
  - Technologie de base innovante et adaptable.
  - Installations personnalisées à la demande.
- 

## **8. Charges et coûts**

### **Quels sont les coûts fixes et variables ?**

- Fixes : Loyer de l'atelier, salaires (si non remplacés par parts), frais administratifs.
- Variables : Coût des matériaux (réflecteurs, pièces mécaniques), main d'œuvre, transport, marketing.

### **Quels coûts sont les plus importants ?**

- Investissement initial (1 million DZD).
- Coût des matériaux principaux.
- Rémunération des techniciens (au départ).

### **Comment réduire les coûts ?**

- Offrir des parts aux techniciens au lieu de salaires élevés.
  - Standardiser les composants.
  - Optimiser la conception.
  - Exécution efficace sur demande.
- 

## **9. Revenus**

### **Quels produits/services les clients sont-ils prêts à payer ?**

- Installation complète du système d'amélioration des panneaux solaires.
- Unité de réflecteurs/mécanisme ajustable personnalisée.
- Services d'installation.

### **Quels sont les moyens de générer des revenus ?**

- Ventes directes des systèmes améliorés.
- Frais de service (installation, maintenance éventuelle).

### **Quel est notre modèle de tarification ?**

- Tarification basée sur la taille de l'installation (plus d'énergie = coût plus élevé).
- Moins cher qu'une installation solaire standard pour la même puissance.

- Tarification basée sur la valeur : économies et gain d'espace.

**Partenaires clés  
Key Partnerships**

Fournisseurs de miroirs/réflecteurs et pièces mécaniques. Fabricants de panneaux solaires. Techniciens locaux en énergie solaire (partenaires potentiels). Centres de recherche ( Université de Tlemcen).

**Activités clés  
Key Activities**

R&D sur les systèmes de réflecteurs ajustables. Fabrication et assemblage des mécanismes d'ajustement.

Installation personnalisée des systèmes solaires. Marketing et acquisition de clients. Support client et maintenance.

**Proposition de valeur  
Value Proposition**

Maximise la production d'énergie solaire sur de petites surfaces. Réduit les coûts d'installation en minimisant le nombre de panneaux nécessaires. Solution écologique contribuant à un réseau électrique net-zéro. Technologie unique de réflecteurs ajustables pour une performance supérieure.

**Relation clients**

**Consumer Relationship**

Particuliers/Agriculteurs : Conseils personnalisés, installation fiable, suivi post-installation.

Entreprises: Propositions professionnelles, analyse du ROI, assistance technique.

Maintenance : Service après-vente solide et suivi des performances

**Segment client**

**Customer Segment**

**Résidentiel** : Propriétaires avec un espace limité (toit/jardin).

**Agricole** : Agriculteurs en zones hors-réseau.

**Commercial** : Petites entreprises avec des contraintes d'espace.

**Secteur Public** : Initiatives gouvernementales pour des économies d'énergie et de coûts.

**Ressources clés**

**Physiques** : Atelier, outils, véhicules de transport.

**Immatérielles** : Conception brevetée des réflecteurs, propriété intellectuelle. **Humaines** : Ingénieurs mécaniciens, spécialistes en énergies renouvelables, techniciens.

**Financières** : Capital initial de 3 millions DZD (équipement, main-d'œuvre, marketing).

**Canaux de distribution**

**Ventes Directes**

: Consultations et installations sur site.

**Engagement**

**Communautaire** : Foires locales, réunions rurales. **En**

**Ligne** : Site web, réseaux sociaux, témoignages clients.

**Professionnel** : Salons professionnels, ventes B2B, appels d'offres publics.

**Coûts**

**Coûts Fixes** : Loyer de l'atelier, salaires, frais administratifs.

**Coûts Variables** : Matériaux (réflecteurs, pièces mécaniques), main-d'œuvre, transport, marketing.

**Réduction des Coûts** : Standardisation des composants, offre d'actions aux techniciens

**Revenus (Revenue)**

**Ventes** : Systèmes solaires personnalisés avec réflecteurs ajustables.

**Services** : Frais d'installation et de maintenance.

**Modèle de Tarification** : Basé sur la taille de l'installation et la production d'énergie ; moins cher que les installations solaires standards pour une puissance équivalente.

### **المخلص:**

تناول هذا البحث دراسة تأثير المرايا العاكسة على الألواح الشمسية، ويهدف إلى تحديد ما إذا كان استخدام العواكس يحسن من كفاءة أنظمة الطاقة الكهروضوئية. تُستخدم هذه المرايا لزيادة كمية الإشعاع الشمسي الذي تستقبله الألواح، مما قد يؤدي إلى زيادة في الطاقة المنتجة. في الوقت نفسه، يهتم هذا البحث بمشكلة ارتفاع درجة حرارة الألواح الشمسية الناتجة عن التركيز الزائد للإشعاع، وهي ظاهرة معروفة تؤثر سلباً على كفاءة التحويل الكهربائي. نقوم بتحليل هذه الظاهرة من خلال مقارنة أداء لوح شمسي مع وبدون عواكس، في ظروف متماثلة، لمعرفة ما إذا كان التأثير الحراري يحدّ من الفائدة المنتظرة من استخدام العواكس. تعتمد هذه الدراسة على منهج تجريبي للوصول إلى نتائج دقيقة حول تحسين أداء الألواح الشمسية في ظروف إشعاع متفاوتة.

**الكلمات المفتاحية:** الخلايا الكهروضوئية، الإشعاع الشمسي، الحرارة، العاكس، الطاقة الشمسية.

### **Abstract**

This research focuses on the effect of reflective mirrors on solar panels, aiming to determine whether their use enhances the efficiency of photovoltaic systems. These mirrors are designed to increase the amount of solar radiation received by the panel's surface, potentially boosting energy production.

At the same time, the study addresses the issue of solar panel overheating, caused by the increased concentration of radiation a well-known phenomenon that negatively affects electrical conversion efficiency. The research analyzes this by comparing the performance of a solar panel with and without reflectors under similar conditions, to assess whether the thermal effect limits the anticipated benefit.

This study follows both an experimental approach to provide accurate results on optimizing solar panel performance under varying irradiance conditions.

**Keywords:** Photovoltaic, solar radiation, temperature, reflectors, solar energy.

### **Résumé**

Ce travail de recherche étudie l'effet des miroirs réfléchissants sur les panneaux solaires, avec pour objectif principal de déterminer si leur utilisation améliore l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Ces miroirs sont conçus pour augmenter la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface du panneau, ce qui peut entraîner une augmentation de la production d'énergie.

En parallèle, la recherche se penche sur le problème de la surchauffe des modules solaires, causée par la concentration accrue du rayonnement, un phénomène bien connu qui réduit le rendement de conversion électrique. L'étude analyse cette problématique en comparant les performances d'un panneau solaire avec et sans réflecteurs, dans des conditions similaires, afin d'évaluer si l'effet thermique limite les bénéfices attendus.

Cette étude adopte une approche expérimentale afin de produire des résultats précis concernant l'optimisation des performances des panneaux solaires dans des conditions d'irradiance variable.

**Mots-clés :** Photovoltaïque, rayonnement solaire, température, réflecteurs, énergie solaire.