الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BENYAHIA JIJEL
Faculté des sciences et de la technologie
Département de Génie mécanique

N° :……/2025

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE : Sciences et Technologies

FILIERE: Génie Mécanique

SPECIALITE : Energétique

Thème

Etude numérique de l'influence de l'échauffement par effet Joule sur les performances d'un capteur solaire hybride PVT à air

Présenté Par : Lemzeri Mohamed Iheb **Encadré Par : Dr : N. Aderghal**

Bernou Abdelilah

Date de soutenance : ……/……./…...

Jury de Soutenance

Président : Pro : A. Laouir	**Univ MSB Jijel**
Encadreur : Dr : N. Aderghal	**Univ MSB Jijel**
Examinateur : Dr: T.E. Boukelia	**Univ MSB Jijel**

Promotion : 2024 /2025

REMERCIEMENTS

Nous remercions avant tout Allah, Le Tout-Puissant, de nous avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce projet de fin d'études, et pour nous avoir permis de surmonter les différentes difficultés rencontrées.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Mme ADERGHAL Nadia, pour sa disponibilité, ses conseils et ses encouragements tout au long de ce travail.

Nos remerciements s'adressent également à Mr. LAOUIR Ahmed et Mr. BOUKELIA Taqiy Eddine, pour avoir accepté examiner ce travail et de faire partie du jury. Nous tenons à remercier aussi l'ensemble des enseignants du Département de Génie Mécanique.

Enfin, nous tenons à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

A tous, un grand merci.

DEDICACES

Louange à ALLAH, le Très-Haut, le Clément et le Miséricordieux, pour Ses bienfaits inestimables, Sa guidance et Sa protection tout au long de la réalisation de ce modeste travail.

Je dédie cette œuvre à mes parents chers, piliers de ma vie, qui m'ont offert amour, soutien et encouragement depuis mon enfance. Leur présence constante, leurs sacrifices et leurs prières ont été la source essentielle de ma force et de ma persévérance. Qu'Allah leur accorde longue vie, santé et bonheur.

À ma mère bien-aimée, dont l'affection et l'abnégation m'ont porté dans les moments les plus exigeants de mon parcours. À mon père, dont les conseils et la sagesse ont toujours illuminé ma route.

Je dédie également ce travail à l'ensemble de ma famille, sans exception, pour leur soutien moral et leur confiance.

Enfin, j'adresse une dédicace particulière à « mon collaborateur Abdelilah », avec qui j'ai partagé l'effort, les échanges et la motivation nécessaire pour mener à bien cette étude.

Mohamed Iheb

DEDICACES

Je suis profondément reconnaissant envers ALLAH, le Tout-Puissant, Clément et Miséricordieux, de m'avoir guidé dans la réalisation de cette œuvre modeste. Je tiens également à remercier chaleureusement mes parents, qui m'ont soutenu et accompagné pour atteindre ce niveau d'éducation.

Je dédie ce modeste travail à ma très chère mère, qui m'a soutenu durant les instants les plus difficiles de ce long processus éducatif.

Mes parents bien-aimés, qui sont l'origine constante de mon bonheur, m'ont insufflé la détermination, l'espoir, le courage et la patience nécessaires pour progresser. Puisse Dieu leur assurer toujours une bonne santé.

Je consacre cela à toute ma famille sans distinction

À mon collaborateur « Mohamed Iheb » avec qui j'ai réalisé ce travail.

Abdelilah

Sommaire

Liste des figures i
Liste des tableaux iii
Liste des symboles iv

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires

I.1.Introduction 3
I.2. Energie solaire 3
I.3. Capteurs solaires 4
I.3.1. Capteur solaire thermique 4
I.3.2. Capteur solaire photovoltaïque 5
I.4. Panneau solaire hybride photovoltaïque thermique 7
I.4.1. Définition 7
I.4.2. Différents types des capteurs hybrides PV/T 8
I.4.3. Avantages et inconvénients d'un capteur HPV/T 10
I.4.3.1. Avantages 10
I.4.3.2. Inconvénients 10
I.4.4. Paramètres influents sur le fonctionnement du capteur solaire 10
I.5. Echauffement thermique dans une cellule photovoltaïque 11
I.5.1. Thermalisation (pertes par excès d'énergie) 11
I.5.2. Chaleur transmise par l'irradiation non convertie 11
I.5.3. Effet Joule 11
I.6. Effet Joule dans les panneaux solaires hybride PV/T 12
I.6.1 Définition 12
I.6.2. Expression de l'effet de Joule 12

I.6.3. Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....12
I.6.4 Impact sur les performances du HPV/T 14
I.7. Recherche bibliographique.....14
I.8. Conclusion.....17

Chapitre II : Modélisation du capteur solaire sous COMSOL

II.1 Introduction 18
II.2. Présentation Générale de COMSOL 18
II.2.1. Etapes à suivre pour la simulation.....19
II.2.2. Simulation numérique du modèle 19
II.3. Calcul des performances du capteur HPV/T 25
II.3.1. Rendement thermique.....25
II.3.2. Rendement électrique.....25
II.3.3 Rendement thermique équivalent au rendement électrique.....26
II.3.4 Rendement global du capteur HPV/T 26
II.4 Calcul d'erreur 26
II.5 Conclusion 27

Chapitre III : Résultats et discussions

III.1. Introduction.....28
III.2. Validation.....28
III.3. Résultats numériques obtenus par Comsol 29
III.3.1. Capteur solaire HPVT (avec effet joule).....29
III.3.2. Capteur solaire HPVT (sans effet joule).....38
III.4 Conclusion 40
Conclusion générale.....41
Références bibliographies.....43
Résumé……

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Application technique d'énergie solaire.....3

Figure I.2. Capteur solaire thermique.....4

Figure I.3. Composants principaux d'un capteur thermique.....5

Figure I.4. Capteurs solaires photovoltaïques.....6

Figure I.5. Composition d'un module photovoltaïque.....7

Figure I.6. Panneau hybride photovoltaïque thermique PV/T.....8

Figure I.7. Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire.....13

Figure I.8. Vue en coupe transversale d'un capteur à air hybride PV/T (a) en verre-Tedlar, (b) en verre-verre.....15

Figure I.9. Configuration expérimentale intérieure.....16

Figure I.10. Capteur PVT utilisé.....16

Figure I.11. Structure de la cellule photovoltaïque étudiée.....17

Chapitre II

Figure II.1. Représentation des différents transferts thermiques dans un capteur Hybride PV/T.....20

Figure II.2. Maillage du modèle.....23

Figure II.3. Convergence du solveur.....24

Chapitre III

Figure III.1. Variation de la température de la cellule en fonction du temps.....28

Figure III.2. Variation de la température de l'air à la sortie de canal en fonction du temps.....29

Figure III.3. Variation de la température de la cellule et de la température ambiante en fonction du temps.....30

Figure III.4. Courbes de variation de la température de la surface de la cellule en fonction de la longueur du panneau pendant la journée.....30

Figure III.5. Variation de la température à travers les différentes couches du panneau solaire en fonction du temps : a)-au centre de la cellule ; b)- au centre du canal d'air 31
Figure III.6. Variation de la température de l'air à la sortie de canal et de la température ambiante en fonction du temps 32
Figure III.7. Variation de la température de l'air de sortie en fonction de la hauteur du canal 33
Figure III.8. Évolution de la Puissance utile et du rayonnement solaire Incident au cours de la journée 33
Figure III.9. Influence de la température de cellule sur le rendement électrique du panneau solaire 34
Figure III.10. Variation de la puissance électrique en fonction du temps 35
Figure III.11. Variation de la température de l'air et du rendement thermique en fonction du temps 35
Figure III.12. Composantes du rendement d'un panneau solaire hybride en Fonction du temps 36
Figure III.13. Position de la température maximale à la surface de la cellule 37
Figure III.14. Variation de la température de la cellule et le rendement électrique en fonction de la vitesse du vent 37
Figure III.15. Évolution de la puissance thermique d'un panneau solaire en fonction du temps avec et sans effet Joule 38
Figure III.16. Evolution du rendement thermique d'un panneau solaire avec et sans Effet Joule 39
Figure III.17. Évolution du rendement global d'un panneau solaire hybride avec et sans Effet Joule 39
Figure III.18. Influence du rayonnement solaire sur la température de l'air à la sortie du canal avec et sans effet Joule 40

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1. Les types des capteurs hybrides PV/T 9

Chapitre II

Tableau II.1. Les dimensions du capteur solaire 21

Tableau II.2. Les caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés 21

Tableau II.3. Choix du maillage 23

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
Cp	Capacité thermique massique	J/(Kg·K)
q	Rayonnement solaire	W/m²
Q	Source de chaleur interne	W/m³
Qu	Flux	W
Cf	Facteur de conversion (énergie thermique en électricité)	Sans unité
Tc	Température de la cellule	°C
Tref	Température de référence	°C
T	Température (générale)	°C
Tas	Température de sortie de l'air	°C
Tae	Température d'entrée de l'air	°C
v	Vitesse du fluide (air)	m/s
p	Pression	Pa
h	Coefficient d'échange thermique convectif	W/(m²·K)
e	Épaisseur d'une couche	m
b	Largeur du panneau	m
L	Longueur du panneau	m
qm	Débit massique d'air	Kg/s
Xi	Température numérique (calcul erreur)	°C
Yi	Température expérimentale (calcul erreur)	°C
μ	Viscosité dynamique	Pa·s
ρ	Masse volumique	Kg/m³
λ	Conductivité thermique	W/(m·K)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann	W/(m²·K⁴)
ε	Émissivité	Sans unité
α	Coefficient d'absorption	Sans unité
τ	Coefficient de transmission	Sans unité
η_{the}	Rendement thermique	%
$\eta_{él}$	Rendement électrique	%
$\eta_{él,the}$	Rendement thermique équivalent du rendement électrique	%
η_{g}	Rendement global	%
$\eta_{réf}$	Rendement électrique de référence	%
βv	Facteur de remplissage.	Sans unité



Introduction Générale

Introduction générale

L'énergie représente un paramètre essentiel du développement humain et de l'évolution technologique. Dans un contexte de croissance continue de la demande mondiale, les besoins énergétiques occupent une place stratégique dans l'amélioration des conditions de vie et le maintien des activités industrielles. Historiquement, cette demande a été principalement satisfaite par des ressources fossiles telles que le charbon, le pétrole ou le gaz naturel. Toutefois, la dépendance persistante à ces sources non renouvelables soulève de sérieuses préoccupations, tant en raison de leur caractère fini que de leur contribution significative aux émissions de gaz à effet de serre, principale cause du changement climatique. Ces enjeux nécessitent une transition vers des systèmes énergétiques plus durables et respectent l'environnement.

Parmi les alternatives envisagées pour assurer la transition énergétique, les sources d'énergie renouvelable se distinguent par leur caractère durable et leur faible impact environnemental. Elles incluent notamment l'énergie éolienne, hydraulique, géothermique, la biomasse, et surtout l'énergie solaire reconnue par son abondance, de sa disponibilité et de son potentiel à long terme pour satisfaire les besoins énergétiques mondiaux de manière durable.

L'énergie solaire peut être exploitée selon deux modalités principales : le solaire photovoltaïque, qui permet la conversion directe du rayonnement solaire en électricité à l'aide des cellules photovoltaïques, et le solaire thermique, qui exploite la chaleur du soleil à des fins de chauffage ou de ventilation. Une stratégie technologique innovante consiste à combiner ces deux mécanismes dans un même dispositif, connu sous le nom de capteur hybride photovoltaïque-thermique (PV/T ou HPVT). Ce système intégré permet une production simultanée d'électricité et de chaleur tout en optimisant l'espace utilisé et en améliorant le rendement global.

La performance des systèmes hybrides PV/T ne dépend pas uniquement de la conception du capteur ou de l'irradiation solaire, mais aussi de phénomènes physiques internes tels que l'effet Joule. Ce dernier, lié à la dissipation de chaleur lors du passage du courant dans les matériaux conducteurs, peut engendrer des pertes thermiques significatives. Sa maîtrise est donc essentielle pour optimiser les performances thermique et électrique du système.

Dans ce contexte, la modélisation numérique présente un outil essentiel pour simuler et analyser le fonctionnement des systèmes solaires hybrides. Le logiciel COMSOL Multiphysiques, basé sur la méthode des éléments finis, permet de coupler des phénomènes complexes en prenant en compte les différentes liaisons tels que : thermiques, électriques et autres de manière détaillée.

L'objectif de ce travail est la modélisation numérique avec COMSOL d'un capteur solaire hybride : photovoltaïque-thermique à air en vue :

- D'étudier le comportement thermique du capteur.
- D'évaluer l'impact des différents paramètres particulièrement ceux liés à l'effet Joule sur les performances globales du capteur.

Le travail est réparti sur trois chapitres :

• **Au premier chapitre,** on présente des généralités sur l'énergie solaire, les principes des capteurs thermiques, photovoltaïques et hybrides PV/T, ainsi que l'échauffement par effet Joule. Le chapitre se conclut par une revue bibliographique des travaux antérieurs relatifs à ces thématiques.

• **Le deuxième chapitre,** est consacré à la modélisation numérique sous COMSOL du capteur hybride : formulation des équations utilisées, définition des propriétés des matériaux, géométrie et dimensions, conditions aux limites, maillage et calcul des performances thermique et électrique.

• **Au troisième chapitre,** on commence par la comparaison des résultats obtenus des températures avec celles de la littérature afin de valider le modèle développé sous COMSOL. Ensuite, on présente et discute les résultats trouvés des deux cas : avec et sans effet Joule.

• Le travail se termine par une conclusion générale où dans laquelle les principaux résultats obtenus sont rappelés.



Chapitre I

Généralités sur

les capteurs solaires

I.1. Introduction

Dans de ce chapitre, nous définirons l'énergie solaire et les capteurs thermiques et photovoltaïques, ainsi que les divers éléments qui composent ces systèmes, y compris les capteurs hybrides PV/T et citer les différents types d'échauffement de la cellule solaire. Nous présenterons par la suite certains travaux développés dans le même cadre.

I.2. Energie solaire

L'énergie solaire est une forme d'énergie qui dépend du soleil. Cette énergie rend possible la production d'électricité à l'aide des panneaux solaires photovoltaïques ou pour la production de chaleur via des capteurs solaires thermiques, en exploitant l'irradiation du soleil captée par des dispositifs spécifiques et la convertir en énergie utilisable.

- Le solaire photovoltaïque : il convertit le rayonnement solaire en électricité, par l'intermédiaire de panneaux solaires photovoltaïques (cellules photovoltaïques).

- Le solaire thermique : il consiste à convertir le rayonnement solaire en chaleur. L'application la plus courante repose sur la production d'eau chaude sanitaire ou de chauffage, à l'aide de capteurs solaires thermiques (panneaux solaires thermiques). Ces dispositifs captent l'énergie solaire et la transmettent à un fluide caloporteur circulant dans un réseau, permettant ainsi de couvrir tout ou partie des besoins thermiques d'un bâtiment par exemple.

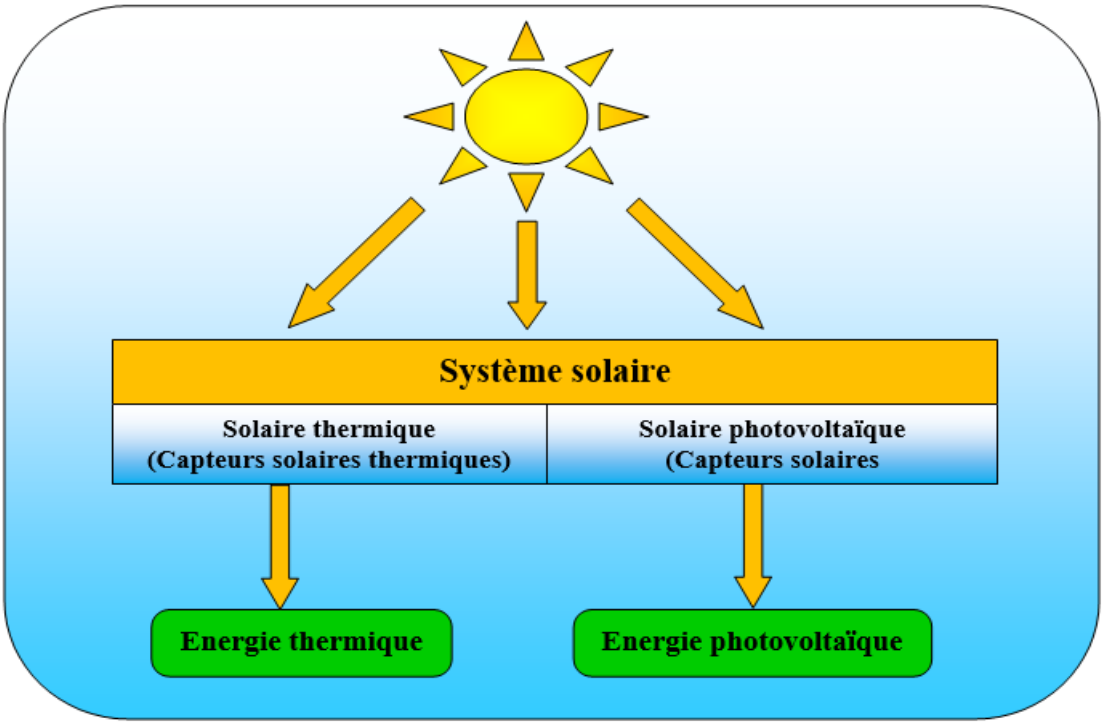


Figure I.1. *Application technique d'énergie solaire* ***[1]***

I.3. Capteurs solaires

En distingue deux types des capteurs solaires :

I.3.1. Capteur solaire thermique

a. Définition

Le capteur solaire thermique est un équipement conçu pour capter le rayonnement solaire et le convertir en chaleur utile à l'aide d'un fluide de transport de chaleur (par exemple : air, eau). Il est principalement employé pour chauffer l'eau sanitaire ou comme complément au chauffage domestique ou d'un bâtiment.



Figure I.2. *Capteur solaire thermique* ***[2]***

b. Principaux composants

Le capteur solaire thermique est constitué de quatre composants principaux, présentés comme suit **[3]**:

- **Couverture**

  Elle est transparente, généralement en verre, elle sert pour minimiser les pertes par convection et par rayonnement, et même pour favoriser l'effet de serre.

- **Absorbeur**

  L'absorbeur est l'élément qui capte l'énergie solaire, et la transmet au fluide caloporteur. La principale caractéristique de l'absorbeur, est qu'il doit avoir une forte absorption solaire, et une faible émission thermique. Il est construit en matériau ayant un coefficient de conductivité élevée comme le cuivre, l'acier inox ou l'aluminium.

❖ **Isolant**

Le but de l'isolant, est de recouvrir le système pour éviter, et minimiser les pertes. Les matériaux utilisés sont polystyrène, mousse de polyuréthane.

❖ **Fluide caloporteur**

Il circule dans un canal ou dans des tubes, afin de recueillir l'énergie solaire. Parmi les fluides utilises dans les capteurs, on peut citer l'air ou l'eau**.**



Figure I.3. *Composants principaux d'un capteur thermique* ***[4]***

I.3.2. Capteurs solaire photovoltaïque

a. Définition

Un module photovoltaïque est un dispositif qui produit de l'électricité en courant continu lorsqu'il est exposé à la lumière solaire.



Figure I.4. *Capteurs solaires photovoltaïques* ***[5]***

a. Différents composants d'un panneau PV

Les composants d'un panneau PV sont :

a. Verre

C'est un verre trempé qui assure le phénomène de transmission.

b. EVA (Éthylène-Vinyle-Acétate)

C'est une résine transparente largement utilisée dans les modules photovoltaïques. Elle se caractérise par sa forte capacité adhésive, sa bonne transmission optique dans le domaine du visible, ainsi qu'une excellente résistivité électrique. Elle assure une bonne liaison entre les différentes couches du panneau tout en protégeant les composants internes contre l'humidité, les chocs mécaniques et les variations de température.

c. Cellules photovoltaïques

Est un composant électronique qui est exposé à la lumière (photons), produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque qui est à l'origine du phénomène. **[6]**

❖ **Tedlar**

Il est utilisé en arrière du module, il est constitué d'un polymère fluore.

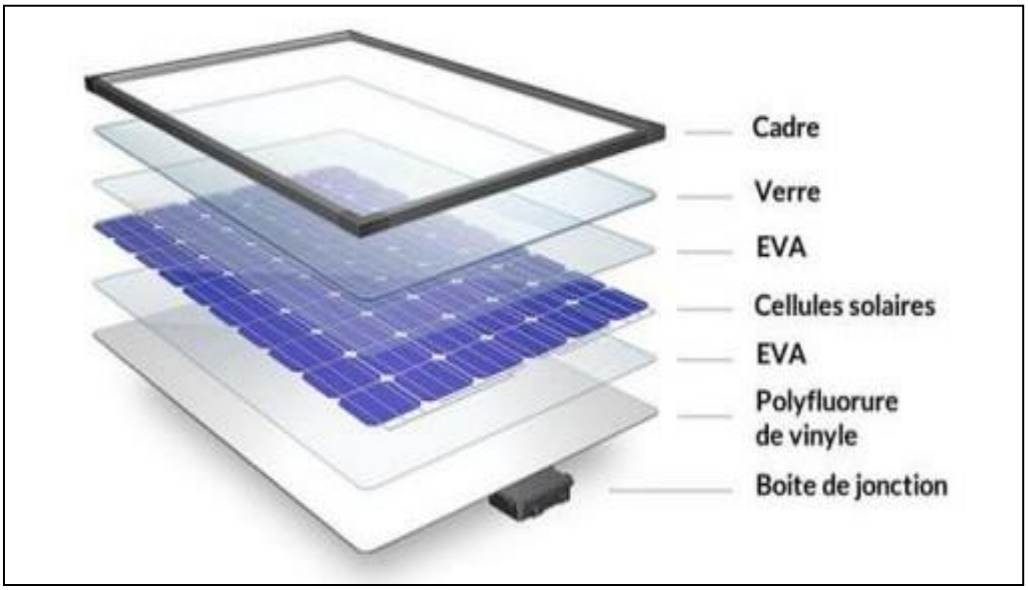


Figure I.5. *Composition d'un module photovoltaïque* ***[7]***

I.4. Panneau solaire hybride photovoltaïque thermique

I.4.1. Définition

Un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique (PV/T) est un dispositif conçu pour convertir simultanément l'énergie solaire en électricité et en chaleur. Le principe repose sur la superposition des fonctions photovoltaïque et thermique au sein d'un même composant. Ainsi, les cellules photovoltaïques assurent la production d'électricité tout en jouant le rôle d'absorbeur thermique, captant une partie du rayonnement solaire sous forme de chaleur. Cette chaleur qui est capable d'élever la température des cellules et de dégrader leur rendement, est évacuée par un fluide caloporteur (air ou eau) circulant à la face arrière du module. Ce système de refroidissement permet de maintenir un rendement électrique plus stable et de récupérer l'énergie thermique pour des usages domestiques et industriels.

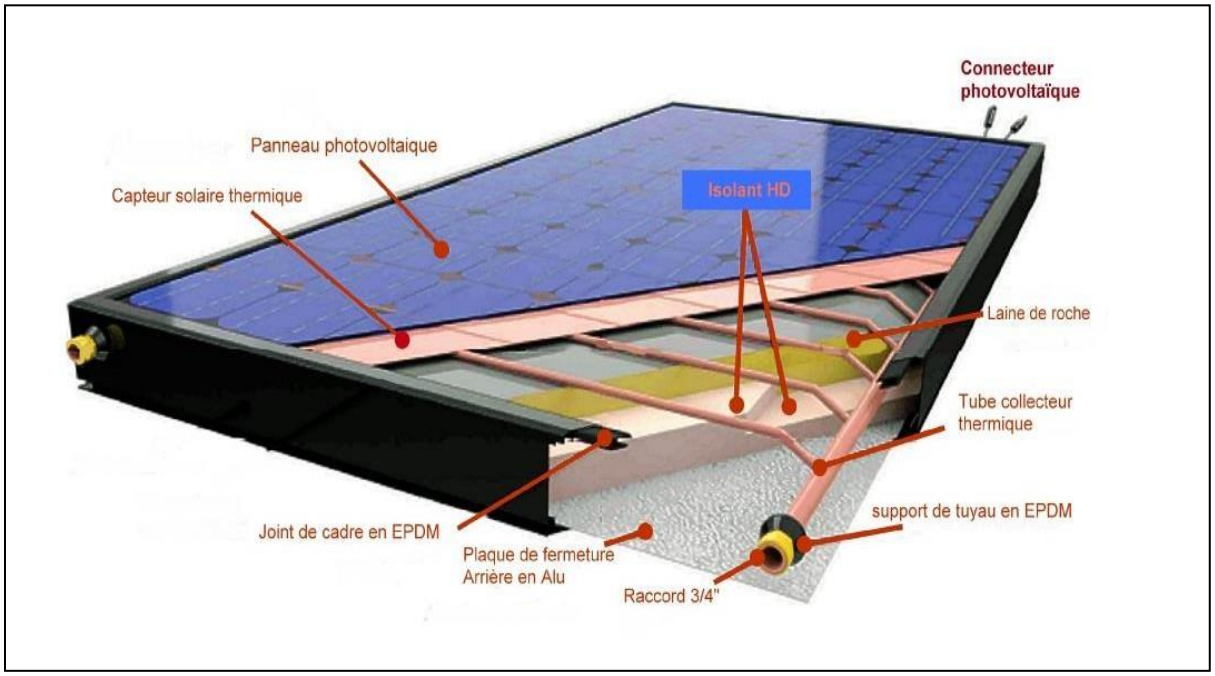


Figure I.6. *Panneau hybride photovoltaïque thermique PV/T* ***[8]***

I.4.2. Différents types des capteurs hybrides PV/T

Les capteurs solaires hybrides (PV/T) sont classifiés en catégories principales selon le type de fluide caloporteur utilisé pour le refroidissement et le transfert de chaleur.

- **Les capteurs solaires hybrides PV/T à air**

  Les capteurs solaires hybrides PV/T à air sont des dispositifs qui convertissent simultanément l'énergie solaire en électricité et en chaleur, cette dernière étant récupérée par l'air qui circule dans un canal situé derrière le module photovoltaïque, servant ainsi de fluide caloporteur.

- **Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau**

  Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau sont conçus pour une production énergétique duale (électricité et chaleur), utilisant l'**eau** comme fluide caloporteur pour refroidir la cellule photovoltaïque et évacuer la chaleur thermique récupérée via un réseau de tubes fixé à l'arrière du module.

- **Les capteurs solaires hybrides PV/T à concentration**

  Les capteurs solaires hybrides PV/T à concentration utilisent des éléments optiques (comme des miroirs ou des lentilles) pour focaliser une grande quantité de rayonnement solaire sur une petite surface de cellules PV/T, permettant une production électrique et thermique optimisée.

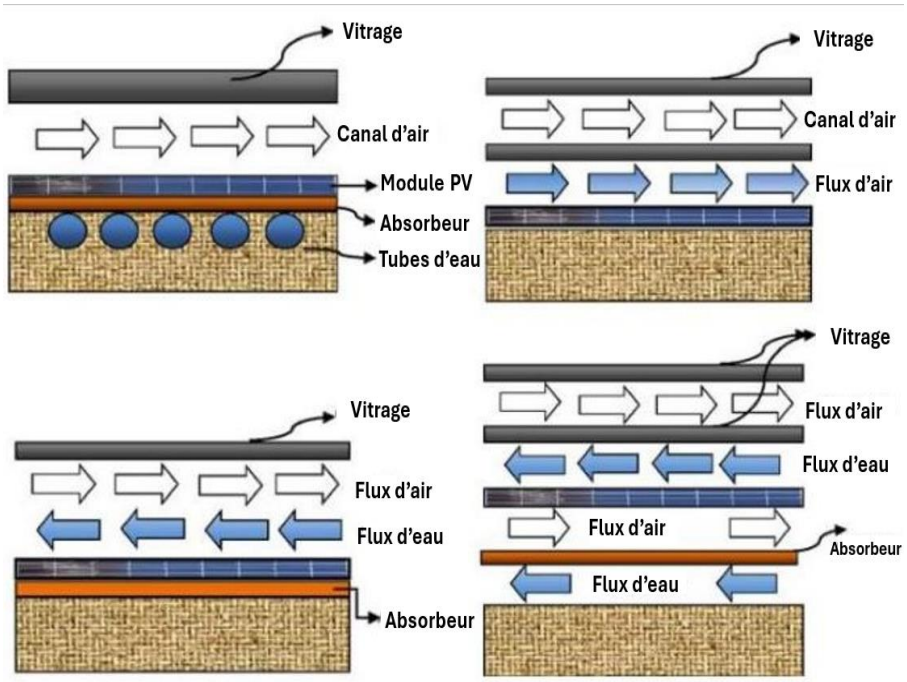
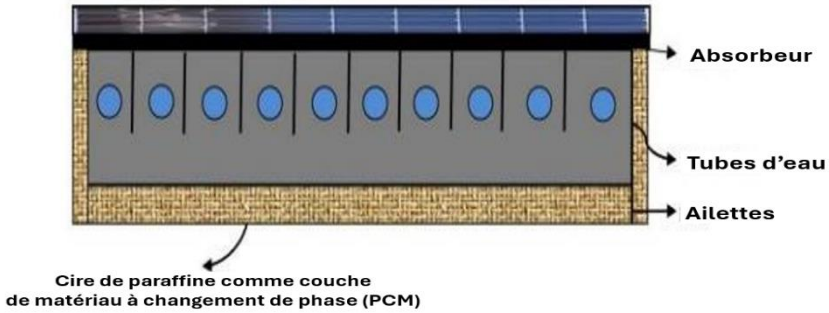
Type	Conception
Les capteurs solaires hybrides PVT à air	
Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau	
Les capteurs solaires hybrides PV/T à concentration	

Tableau I.1. *Les types des capteurs hybrides PV/T* ***[9]***

I.4.3. Avantages et inconvénients d'un capteur HPVT

L'intégration des deux fonctions de production d'électricité (cellules photovoltaïques) et de chaleur (capteur thermique) dans un seul et même dispositif est ce qui caractérise le capteur solaire hybride (PV/T).

Cette combinaison vise à atteindre une exploitation optimale de l'énergie solaire à partir d'une seule surface d'installation, ce qui augmente l'efficacité globale du système.

Cependant, cette conception conjointe génère des défis d'ingénierie et opérationnels uniques.

Il est donc essentiel d'évaluer les bénéfices doubles de ce type de système par rapport aux contraintes techniques et financières qu'impose cette interaction complexe entre les composants thermiques et électriques.

I.4.3.1. Avantages

- ✓ Augmentation du rendement du capteur photovoltaïque en stabilisant la température du panneau.
- ✓ Production de l'électricité et de la chaleur par une même surface.
- ✓ L'exploitation n'émet pas de pollution.
- ✓ Système silencieux, pas de mouvement.
- ✓ L'énergie solaire est gratuite et inépuisable.

I.4.3.2. Inconvénients

- ✓ La stabilisation de la température du système engendre, une production solaire thermique non optimale.
- ✓ L'énergie solaire est intermittente, car elle dépend de l'ensoleillement et de l'alternance jour/nuit **[10].**

I.4.4. Paramètres influents sur le fonctionnement du capteur solaire

Il existe deux types essentiels des paramètres qui influent sur le fonctionnement du capteur solaire :

a. Paramètres externes

- Paramètre d'ensoleillement.
- Position du soleil et durée d insolations.
- Température d'extérieur.
- Vitesse du vent sur le capteur.

b. Paramètres internes

- **Paramètres de position**
  - L'inclinaison.
  - L'orientation.
  - La superficie.
- **Dimensions des différentes parties**
  - Epaisseur.
  - Longueur.
  - Largeur.

I.5. Echauffement thermique dans une cellule photovoltaïque

L'échauffement d'une cellule photovoltaïque correspond à l'élévation de sa température sous l'effet de différents mécanismes internes et externes, principalement liés à la conversion incomplète de l'énergie solaire en électricité.

Dans la cellule photovoltaïque, seule une partie (environ 12 à 20 %) de l'énergie solaire incidente est convertie en électricité. Le reste est perdu principalement sous forme de chaleur. Ces pertes thermiques se répartissent selon plusieurs mécanismes.

On cite les principaux mécanismes suivants :

I.5.1. Thermalisation (pertes par excès d'énergie)

La thermalisation dans une cellule photovoltaïque est un phénomène qui se produit lorsque l'énergie d'un photon est supérieure à la bande interdite (gap) du matériau semi-conducteur de la cellule, ce qui entraîne une dissipation de l'excès d'énergie sous forme de chaleur.

I.5.2. Chaleur transmise par l'irradiation non convertie

De 75 à 85 % de l'énergie solaire absorbée est transformée en chaleur stockée dans la cellule.

I.5.3. Effet Joule

La circulation du courant électrique à travers les résistances internes du module entraîne une dissipation thermique.

I.6. Effet Joule dans les panneaux solaires hybride PV/T

I.6.1 Définition

Le chauffage par effet Joule est un phénomène thermique qui se produit lorsqu'un courant électrique traverse un matériau résistif, générant de la chaleur.

Dans un panneau solaire hybride photovoltaïque/thermique (PV/T), ce phénomène désigne la dissipation thermique résultant du passage du courant électrique à travers les matériaux conducteurs de la cellule photovoltaïque. Cette chaleur générée de manière interne s'ajoute au réchauffement dû à l'irradiation solaire absorbée.

Dans un système PV/T, une partie de cette chaleur est récupérée thermiquement grâce au refroidissement par un fluide caloporteur (air ou eau). Cependant, une production excessive de chaleur par effet Joule peut entraîner une élévation significative de la température des cellules, ce qui conduit à une diminution du rendement électrique, une dégradation accélérée des matériaux et une réduction de la durée de vie du module.

I.6.2. Expression de l'effet de Joule

L'effet Joule est exprimé par la formule :

$$P=R.I^2 \qquad (I.1)$$

Où :

- **P** : puissance thermique dissipée (W).
- **R** : résistance électrique (Ω).
- **I** : courant électrique (A).

I.6.3. Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

C'est un circuit qui représente le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque. Il se compose généralement d'un générateur de courant, une diode, et des résistances.

Le générateur de courant représente la production de courant due à la lumière, la diode simule le comportement de la jonction p-n de la cellule, et les résistances représentent les pertes internes.

La figure suivante représente les principaux éléments du modèle électrique équivalent d'une cellule solaire.

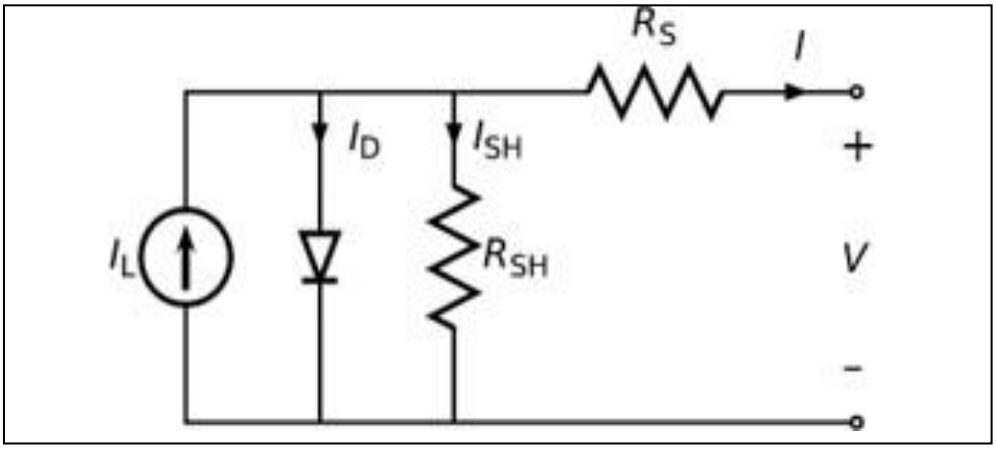


Figure I. 7. *Circuit électrique équivalent d'une cellule solaire* **[11]**

Avec :

Rs : Résistance série

Elle représente les résistances internes à la cellule, comme la résistance du matériau semi-conducteur et des contacts électriques.

Rsh : Résistance shunt

Elle représente les courants de fuite qui peuvent se produire dans la cellule, souvent dus à des défauts dans le matériau ou des imperfections de fabrication.

Dans un module photovoltaïque, la dissipation de la chaleur par effet Joule se manifeste au niveau :

- Des contacts métalliques,
- Des résistances internes des couches dopées (Si).
- Des fils de connexion entre cellules/modules.
- Des défauts d'encapsulation.

I.6.4 Impact sur les performances du PVT

L'effet Joule s souvent considéré comme secondaire en fonctionnement optimal malgré qu'il présente un impact direct sur les performances du capteur solaire. Il :

- Réduit le rendement électrique à travers l'augmentation de la température de la cellule,
- Accélère le vieillissement des matériaux,
- Entraîne des pannes localisées irréversibles (points chauds),

I.7. Recherche bibliographique

L'effet Joule, résultant de la dissipation thermique due au passage du courant électrique à travers les résistances internes des modules photovoltaïques, constitue un phénomène souvent sous-estimé dans l'analyse des performances thermiques et électriques des systèmes solaires. Plusieurs travaux de recherches ont mis en évidence son influence en fonctionnement avec différentes conditions. Parmi ces recherches, on peut mentionner :

Dans le cadre de l'optimisation des systèmes solaires hybrides, **Joshi et al [12]** ont étudié les performances d'un capteur solaire photovoltaïque-thermique (PV/T) à air en comparant deux configurations : verre–Tedlar, et verre–verre. À l'aide d'un modèle thermique unidimensionnel en régime stationnaire, les auteurs ont évalué les rendements thermique, électrique et global du système, puis validé leurs résultats par un montage expérimental réalisé en Inde à New Delhi. Les résultats montrent que le rendement thermique est supérieur dans la configuration verre–verre, atteignant 18,3 %, contre environ 16,5 % pour le module verre–Tedlar.

Le rendement global (électrique + thermique) atteint jusqu'à 47,4 %, avec une bonne corrélation entre données simulées et mesurées. L'étude montre aussi l'impact de la vitesse de l'air, qui améliore le transfert thermique jusqu'à une valeur seuil (~3 m/s). Ces résultats montrent l'intérêt des capteurs PVT à air, notamment dans des applications nécessitant un double usage énergétique : production électrique et chauffage d'air ou de locaux.

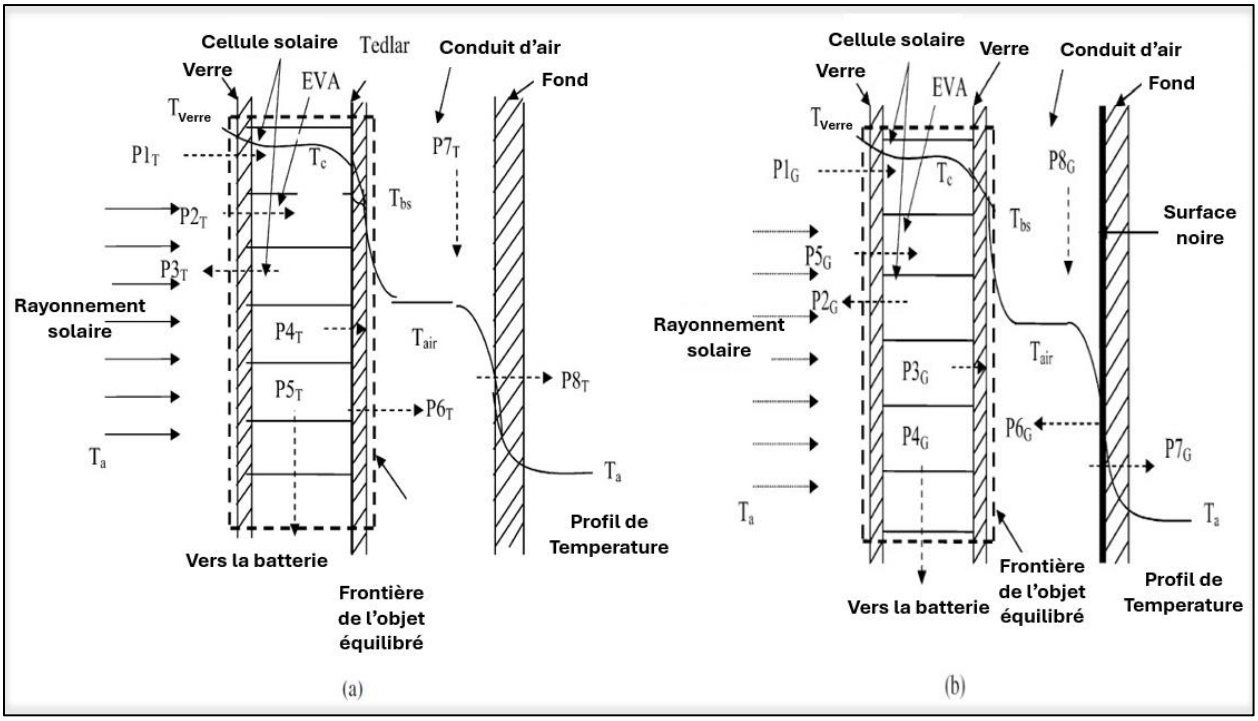


Figure I.8. *Vue en coupe transversale d'un capteur à air hybride PV/T (a) en verre-Tedlar, (b) en verre-verre* **[12]**.

Yandri et al [13] ont effectué une étude expérimentale pour estimer la chaleur générée par effet Joule dans un module photovoltaique. Pour ce faire, ils ont comparé le fonctionnement d'un module avec et sans génération d'électricité afin d'étudier son influence sur les performances du module. L'étude a été réalisée à l'intérieure avec un simulateur solaire. Ils ont trouvé que l'influence de la génération de chaleur par effet Joule est non négligeable et provoque une élévation de la température de la cellule photovoltaique. La figure suivante représente le montage utilisé.

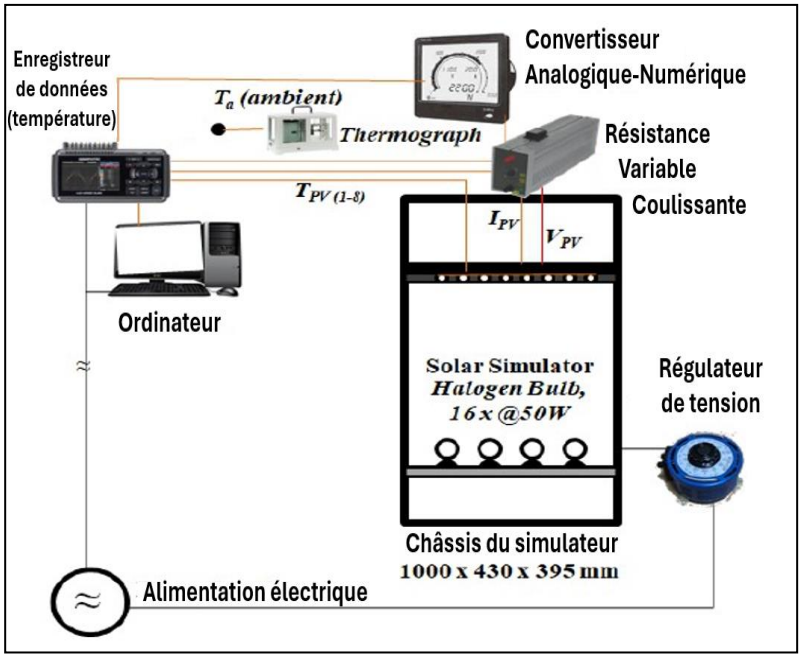


Figure I.9. *Configuration expérimentale intérieure* **[13].**

Yandri. E [14] a évalué l'effet du chauffage par effet Joule sur les performances thermiques d'un capteur solaire hybride photovoltaïque/thermique (PVT) à eau. L'étude compare deux modes :

- Mode PVT : production simultanée d'électricité et de chaleur.
- Mode T : production thermique seule (pas de génération électrique).

Des expériences ont été menées sur un système PVT installé en extérieur, avec un rayonnement solaire élevé (entre 950 et 1000 W/m²). Les principaux résultats expérimentaux qui ont été trouvés montrent que l'évolution du rendement thermique en mode PVT semble être sensiblement influencée par l'effet de chauffage interne (effet Joule), qui se produit pendant le fonctionnement. L'effet Joule peut améliorer le rendement thermique du mode PVT jusqu'à 13 %.

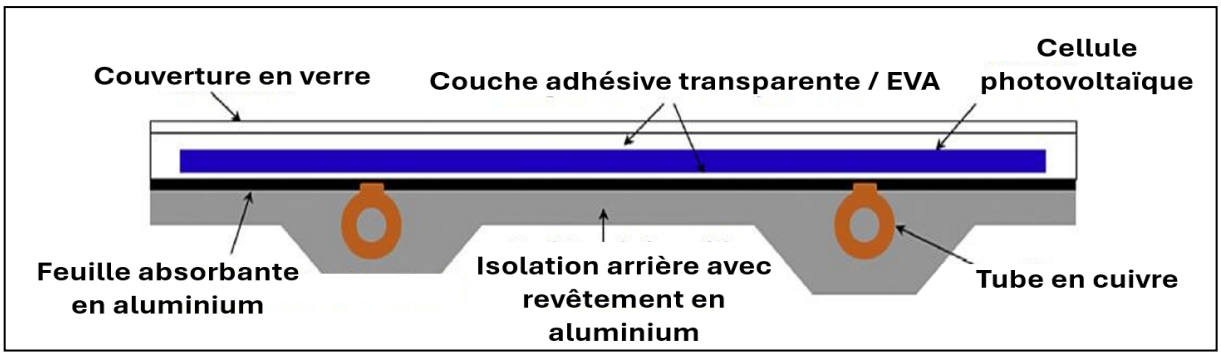


Figure I.10. *Capteur PVT utilisé* **[14].**

Morchid et al [15] ont proposé un modèle simplifié afin d'évaluer les pertes résistives au sein d'un module photovoltaïque, en s'appuyant sur une approximation des résistances interne série et parallèle.

Ce modèle permet d'analyser l'impact thermique de la chaleur générée localement par effet Joule dans les cellules solaires. Les résultats montrent que cet effet reste limité dans des conditions spécifiques.

Dans des conditions d'exploitation réelles, les modules photovoltaïques sont soumis à des variations fréquentes de l'irradiance, susceptibles d'engendrer des effets thermiques plus sévères dus à des courants élevés ou à des surtensions.

Ces phénomènes peuvent provoquer des surchauffes localisées, susceptibles d'endommager les cellules photovoltaïques de manière irréversible.

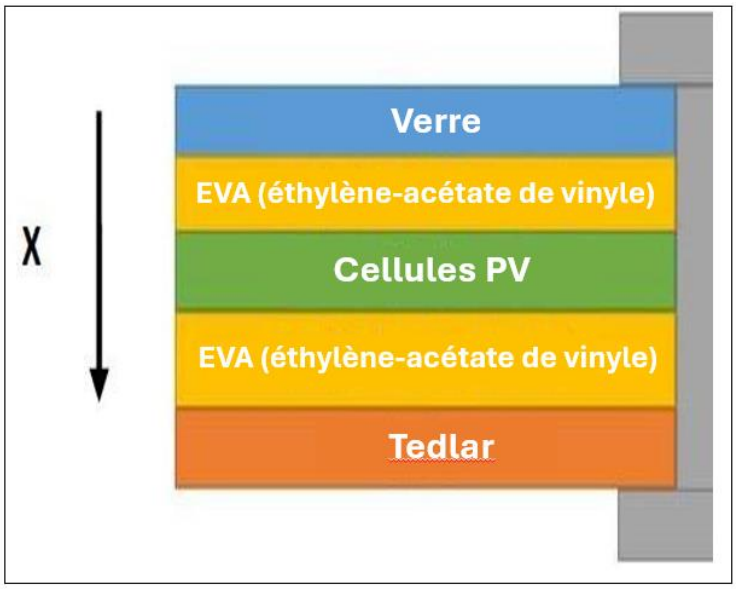


Figure I.11. *Structure de la cellule photovoltaïque étudiée* **[15].**

I.8. Conclusion

Les panneaux hybrides photovoltaïques-thermiques (PV/T) représentent une avancée majeure dans l'optimisation des systèmes solaires, combinant la production simultanée d'électricité et de chaleur. Une étude bibliographique a été menée dans ce sens afin de mettre en évidence l'intérêt de suivre et d'analyser l'effet Joule dans ces systèmes, en récupérant cette chaleur interne générée qui offre une solution innovante pour améliorer leurs performances thermiques et globales des capteurs solaires.



Chapitre II
Modélisation du capteur solaire sous COMSOL

II.1. Introduction

Dans notre travail, le but de l'utilisation du logiciel COMSOL est d'étudier numériquement un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique qui utilise comme fluide caloporteur l'air et montrer l'influence de la génération de chaleur par effet Joule au niveau de la cellule sur les performances du capteur. Pour ce faire, on a utilisé les données obtenues par une étude expérimentale menue par Joshi et al **[12]** sur un panneau solaire hybride à air.

Les données utilisées sont : la température ambiante, la vitesse d'écoulement de l'air à l'intérieur du canal, le rayonnement solaire et la température de la cellule pendant une journée du mois de Mai en Inde. L'introduction de ces paramètres nous ont permis de simuler le phénomène numériquement afin de valider le modèle développé et de bien suivre par la suite la variation des différentes températures ainsi que d'étudier les performances du capteur solaire avec et sans effet Joule.

II.2. Présentation Générale de COMSOL

COMSOL Multiphysiques est un logiciel de simulation numérique qui est basé sur la méthode des éléments finis. Il est développé pour résoudre des problèmes de physique couplée dans des différents domaines de l'ingénierie et de la recherche scientifique. Il est capable de modéliser, analyser et visualiser des phénomènes physiques complexes dans des environnements multidisciplinaires.

Le logiciel intègre plusieurs phénomènes physiques dans un même modèle. Sa capacité de coupler ces différents phénomènes est particulièrement adaptée à l'étude des systèmes où les phénomènes sont interconnectés.

Puisque le fonctionnement d'un capteur solaire hybride (photovoltaïque/thermique) repose sur le couplage de plusieurs phénomènes physiques notamment le transfert de chaleur et l'écoulement de fluide, l'utilisation du logiciel COMSOL Multiphysiques s'avère particulièrement appropriée dans le cadre de cette étude. En effet, COMSOL permet une modélisation multiphysique intégrée, capable de reproduire avec précision les interactions thermiques et fluidiques caractéristiques de ce type de système.

II.2.1. Etapes à suivre pour la simulation

En utilisant le logiciel COMSOL, on a commencé par la première étape qui consiste à définir les dimensions géométriques du capteur et sélectionner le mode physique correspondant aux phénomènes étudiés ainsi que choisir le régime d'étude. Les points suivants montrent les différentes étapes de processus de modélisation numérique :

- Regrouper les propriétés des matériaux et les dimensions dans un tableau des paramètres constants.
- Définir la géométrie.
- Introduire les caractéristiques des matériaux et les conditions aux limites.
- Maillage de la géométrie.
- Choix du solveur.
- Résolution du problème et affichage des résultats.

II.2.2. Simulation numérique du modèle

Le fonctionnement d'un capteur solaire hybride de type PVT (Photovoltaïque/Thermique) implique un couplage entre le transfert de chaleur à travers les matériaux solides et dans le fluide caloporteur. Le module : Transfert de chaleur : couplage fluide-thermique de COMSOL a été choisi pour représenter avec fidélité ce comportement multiphysique.

L'étude a été menée en régime stationnaire 2D, ce qui permet d'analyser et de déterminer des grandeurs essentielles telles que la distribution de température dans les différentes couches, le profil thermique du fluide, ainsi que les rendements thermique et électrique du capteur pendant une journée en Inde au mois de Mai.

a- Les hypothèses

Les hypothèses adoptées pour la modélisation sont :

- ✓ Chaque milieu est supposé continu, homogène et isotrope.
- ✓ Les propriétés thermo physiques des matériaux sont constantes et ne dépendent pas de la température.
- ✓ Le coefficient d'absorption et le coefficient de transmission des différentes couches sont pris en considération.
- ✓ La vitesse du vent est supposée constante et égale à 1m/s.
- ✓ La température ambiante est supposée constante sur tous les côtés du modèle.
- ✓ L'étude est menée en régime stationnaire 2D (Bidimensionnel).
- ✓ Le régime d'écoulement de l'air à l'intérieur du canal est turbulent.
- ✓ Les frontières latérales du capteur solaire sont parfaitement isolées.

b- Géométrie étudiée

La **Figure II.1** représente la géométrie de notre modèle développé sous COMSOL ; C'est un capteur solaire hybride composer des différentes couches tel que : le verre, EVA, Silicium, EVA, Tedlar, canal d'air et un isolant.

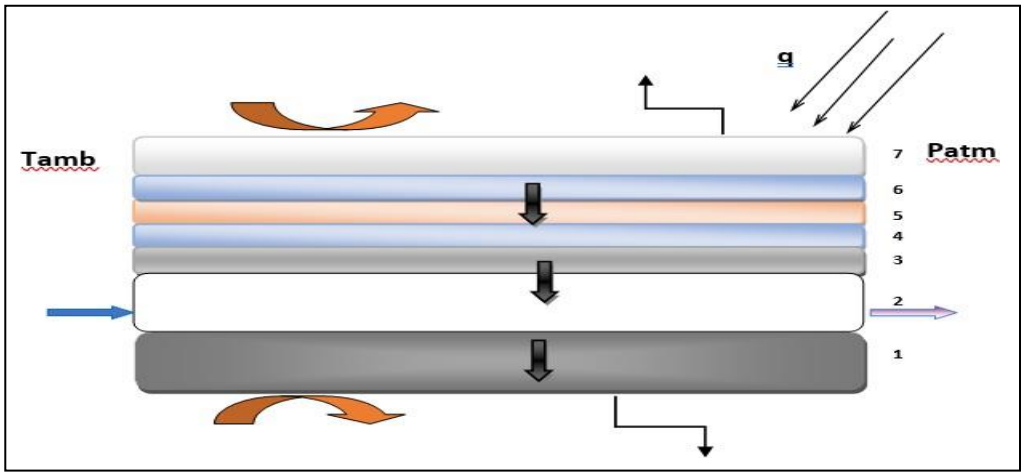


Figure II.1. *Représentation des différents transferts thermiques dans un capteur Hybride PV/T*

Transfert de chaleur par conduction.

Transfert de chaleur par convection.

Transfert de chaleur par rayonnement.

Entrée d'air.

Sortie d'air.

Rayonnement solaire.

1- Isolant
2- Canal d'air
3- Tedlar
4- EVA
5- Silicium
6- EVA
7- Verre

c- Dimensions du capteur solaire

Paramètres de capteur solaire PV	Dimension [m]
Epaisseur de l'isolation	**0.05**
Hauteur du canal d'air	**0.05**
Epaisseur de tedlar	**0.0005**
Epaisseur de la cellule	**0.0003**

Epaisseur EVA (deux couches)	**0.0005x2**
Epaisseur du verre	**0.003**
Hauteur du panneau	**0.1048**
Longueur du panneau	**1.2**
Largeur du panneau	**0.45**

Tableau II.1. *Les dimensions du capteur solaire* ***[16-17]***

d- Caractéristiques thermo-physiques des matériaux utilisés :

Les caractéristiques thermo-physiques et optiques des matériaux utilisés pour la conception de notre modèle sont présentées dans le tableau suivant, pour une température d'environ 25 °C :

Paramètres	Isolant	Air	Tedlar	Cellule	EVA	Verre
ρ [Kg/m³]	24	1.204	1200	2330	950	2450
Cp [J/Kg.k]	919	1005.6	1250	677	2090	500
λ [W/m.k]	0.035	0.025	0.15	130	0.311	2
α	-	-	0.128	0.9	0.08	0.04
τ	-	-	0,95	0.02	0.9	0,92
ε	0.9	-	-	-	-	0.85

Tableau II.2. *Les caractéristiques thermo-physiques et optiques des matériaux utilisés* ***[16-18]***

e- Equations physiques et conditions aux limites

La conception du modèle numérique utilise des équations mathématiques gouvernant le comportement de notre système en régime stationnaire. Le logiciel résout numériquement les équations de :

- Conservation de la masse.
- Conservation de quantité de mouvement.
- Equation de l'énergie.

Elles sont présentées par les équations suivantes : **[19]**

➢ **Équation de la conservation de la masse**

$$\nabla.\left(\rho\vec{V}\right) = 0 \qquad \textbf{(II.1)}$$

- **Équation de quantité de mouvement**

$$\vec{V}.\nabla(\rho\vec{V}) = -\nabla P + \nabla.(\mu\nabla\vec{V}) \quad \textbf{(II.2)}$$

- **Équation d'énergie**

$$\vec{V}.\nabla(\rho CpT) = \nabla.(k\nabla T) + Q \quad \textbf{(II.3)}$$

V : la vitesse d'écoulement **(m/s)**

P: la pression **(Pa)**

Q : source interne **(W/m^3)**

C'est la chaleur générée dans chaque couche de la cellule**.** Son expression est : **[17-19]**

$$Q = \frac{(1-\eta_{él})\times q \times \alpha}{e} \quad \textbf{(II.4)}$$

e : épaisseur de la couche (m)**.**

q : rayonnement solaire (W/ m^2)

$\boldsymbol{\alpha}$ **:** coefficient d'absorption de chaque couche.

$\boldsymbol{\eta_{el}}$ **:** rendement électrique pour la couche de silicium**,** il est nul pour les autres couches.

f. Conditions aux limites :

Les conditions aux limites utilisées dans le modèle numérique sont les suivants :

- **Face latérale gauche**

T = Température ambiante.

Vitesse de l'air est imposée à l'entrée du canal d'air.

- **Face latérale droite**

Sortie d'air : pression atmosphérique = 1atm.

- **Face supérieure et inférieure : Convection et rayonnement**

$$(\lambda \times \nabla T) = h \times (T_{amb} - T) + \varepsilon \times \sigma \times (T_{amb}{}^4 - T^4) \quad \textbf{(II.5)}$$

$\boldsymbol{\sigma}$: Constante de Stefan-Boltzman.

Dans cette étude, les différents modes de transfert de chaleur sont présents. Le coefficient d'échange thermique par convection est calculé par **[21] :**

$$h = 5.67 + 3.86 \times Vv \qquad \textbf{(II.6)}$$

Avec :

***Vv*:** vitesse de vent (m/s).

h : coefficient d'échange thermique par convection.

g. Maillage de la géométrie et étude de convergence

La figure suivante représente le maillage utilisé dans ce travail. Il a été raffiné au niveau de la cellule.

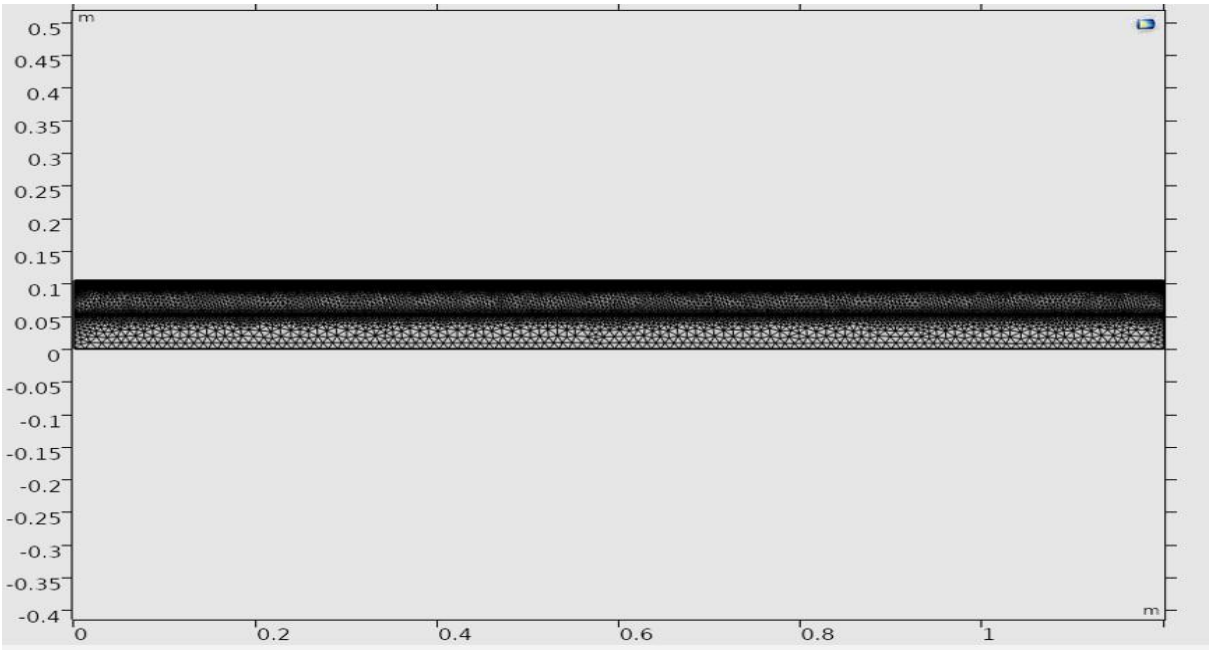


Figure II.2. *Maillage du modèle*

Le tableau suivant montre l'effet du choix de maillage sur la stabilité des résultats :

Nombre des éléments utilisés	Température de la cellule [°C]	Temps de calcul
55652	55.804	4min 17sec
63618	56.457	4min 42sec
72803	57.072	5min 21sec

Tableau II.3*. Choix du maillage*

Les caractéristiques du PC utilisé pour les simulations numériques sont :

Système

Fabricant :	Hewlett-Packard Company
Modèle :	HP Pro 3500 Series
Évaluation :	4,7 Indice de performance Windows
Processeur :	Intel(R) Core(TM) i3-2120 CPU @ 3.30GHz 3.30 GHz
Mémoire installée (RAM) :	4,00 Go (3,89 Go utilisable)
Type du système :	Système d'exploitation 64 bits
Stylet et fonction tactile :	La fonctionnalité de saisie tactile ou avec un stylet n'est pas disponible sur cet écran

L'augmentation du nombre d'éléments du maillage entraîne une augmentation du temps de calcul nécessaire à la résolution numérique. Cependant, un maillage plus fin permet généralement d'améliorer la convergence et d'accroître la précision des résultats de la simulation.

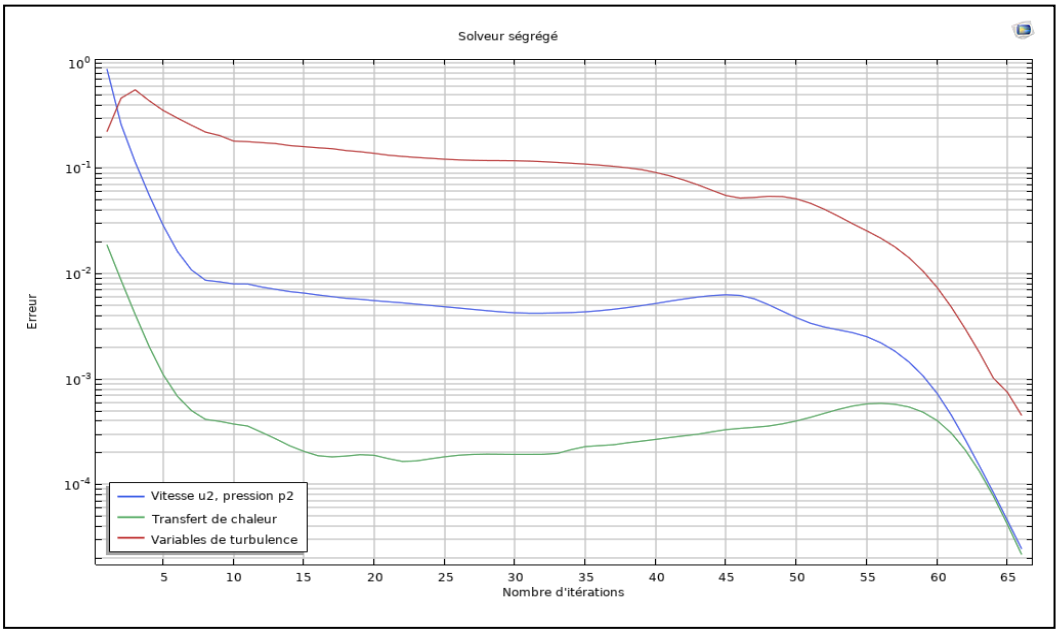


Figure.II.3. *Convergence du solveur*

h. Choix du solveur et lancement de la simulation

Les principaux critères qui doivent être assurés par le solveur sont :

- La stabilité de la solution.
- L'unicité de la solution.
- La convergence de la solution.

Lorsque le problème est complètement défini, on lance la simulation pour permettre l'apparition des résultats.

i. Affichage des résultats

Après la résolution du problème, les résultats obtenus seront présentés sous plusieurs formes tels que : Courbes, champs des températures, ...

II.3. Calcul des performances du capteur HPV/T

II.3.1. Rendement thermique

Le rendement thermique d'un capteur HPV/T est donné par la relation suivante :

$$\eta_{the} \frac{Qu}{q_{ray} \times b \times L} \quad \textbf{(II.7)}$$

$\boldsymbol{Qu}$: Puissance utile.

$$Qu = qm.Cp(T_{as} - T_{ae}) \quad \textbf{(II.8)}$$

T_{as} : Température d'air à la sortie.

T_{ae} : Température d'air à l'entrée.

b : largeur panneau

L : longueur panneau

II.3.2. Rendement électrique

Le rendement électrique d'un capteur HPV/T est donné par la relation suivante**[17,18,20]** :

$$\eta_{el} = \eta_{re}[1 - 0.0045 \times (T_c - T_{ref})](\%) \quad \textbf{(II.9)}$$

Tel que :

Tc : température de la cellule.

T_{ref} : La température de référence égale à 25°C.

η_{ref} : Le rendement de référence qui est égale à 12%.

- **Puissance électrique :**

La puissance électrique produite par la cellule est définie par la relation suivante **[19]** :

$$P_u = \beta_{v.}\, \tau_v\, .q_{ray.}\, \eta_{él}\, .b.L \quad \textbf{(II.10)}$$

$\boldsymbol{\beta_v}$: Facteur de remplissage et égale à 0,83.

II.3.3. Rendement thermique équivalent au rendement électrique

On calcule le rendement thermique équivalent du capteur HPV/T par la formule suivante **[16]** :

$$\eta_{él,the} = \frac{\eta_{él}}{C_f} \ (\%) \qquad \textbf{(II.11)}$$

Tel que :

$\boldsymbol{\eta_{él,the}}$ **:** Le rendement thermique équivalent (%).

$\boldsymbol{C_f}$ **:** Le facteur de conversion de l'énergie thermique (C_f=0.4).

❖ **Définition du facteur de conversion**

Dans les systèmes PV/T hybrides, le facteur $\boldsymbol{C_f}$ traduit le rendement électrique ($\eta él$) en un rendement thermique équivalent ($\eta_{él,the}$), pour évaluer le rendement global ($\boldsymbol{\eta_g}$). Il harmonise électricité et chaleur, assurant une comparaison équilibrée des productions énergétiques malgré leurs qualités différentes. Avec C_f = 0.4, un watt électrique équivaut à quatre watts thermiques, reflétant la supériorité énergétique de l'électricité face à la chaleur basse température.

II.3.4. Rendement global du capteur HPV/T

C'est la somme de rendement électrique et du rendement thermique équivalent :

$$\boldsymbol{\eta_g = \eta_{el,the} + \eta_{the}} \ (\%) \qquad \textbf{(II.12)}$$

II.4. Calcul d'erreur

$$e = \left(\frac{\sum(e_i)^2}{N}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \textbf{(II.13)}$$

$$e_i = \left[\frac{X_i - Y_i}{X_i}\right] \times 100 \qquad \textbf{(II.14)}$$

N : nombre d'itération.

X_i : La température numérique.

Y_i : La température expérimentale.

II.5. Conclusion

Ce chapitre a permis de développer et de présenter le modèle numérique du capteur solaire hybride PV/T sous COMSOL Multiphysics. Après la définition de la géométrie, des matériaux et des conditions aux limites, la simulation a permis de représenter fidèlement les phénomènes thermiques et fluidiques au sein du capteur. L'étude du maillage et du solveur a garanti la précision et la stabilité des résultats. Enfin, les équations nécessaires au calcul des performances thermiques et électriques ont été établies, préparant ainsi l'analyse comparative avec et sans effet Joule dans le chapitre suivant.



Chapitre III

Résultats et discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter et interpréter les résultats obtenus avec le logiciel Comsol Multiphasiques. Nous allons étudier et comparer les performances des deux cas du panneau solaire hybride à air : avec et sans production d'énergie électrique (effet Joule). Cette étude va aider à mieux comprendre le fonctionnent du capteur solaire dans les deux situations et à évaluer leurs efficacités.

III.2. Validation

Afin de confirmer la validité du modèle numérique développé sous COMSOL pour le capteur solaire hybride, une comparaison a été effectuée entre les résultats obtenus numériquement et ceux trouvés par Joshi et al **[12]** d'une étude réalisée sur un panneau solaire hybride à air. La comparaison est présentée sous forme des courbes des figures III.1 et III.2. Cette comparaison a permis d'évaluer et montrer la cohérence et la précision du modèle numérique.

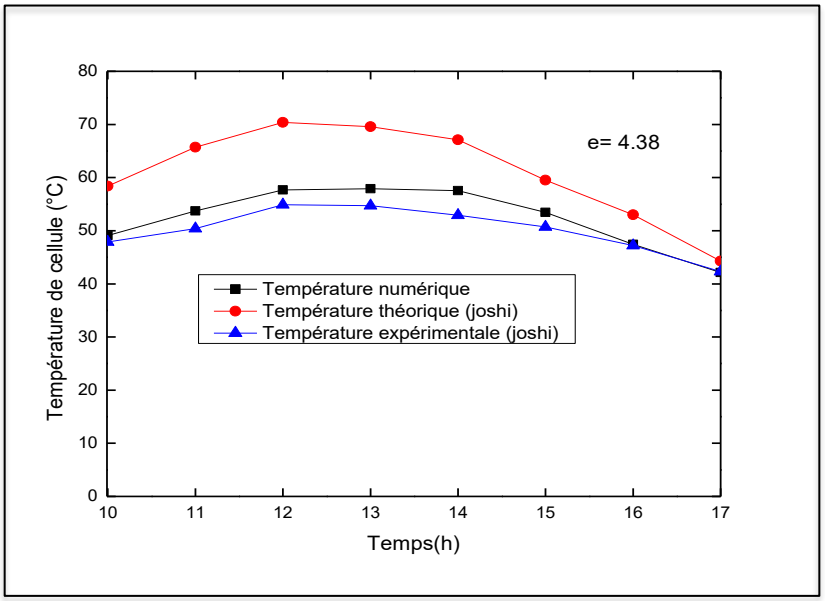


Figure III.1. *Variation de la température de la cellule au cours de la journée*

La **Figure III.1** présente une comparaison entre la température de surface de la cellule simulée et celles expérimentale et théorique obtenues par Joshi. Une bonne concordance est observée entre les résultats avec une erreur de 4,38 % entre numérique et expérimentale ; ce qui confirme la précision du modèle proposé du panneau solaire. Cette différence est dû aux incertitudes lors du calcul et aux hypothèses imposées.

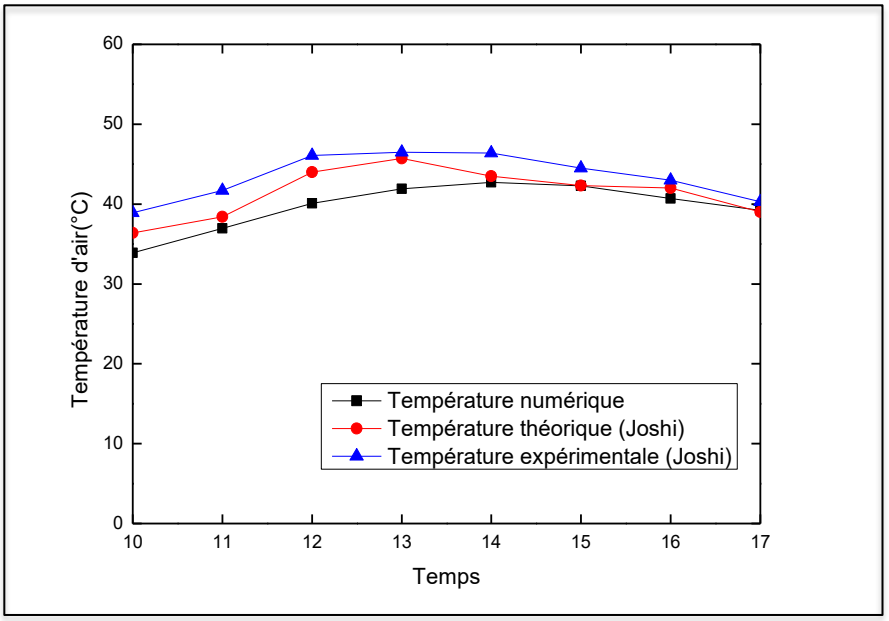


***Figure III.2**. Variation de la température de l'air à la sortie de canal en fonction du temps*

La **figure III.2** représente la variation de la température de l'air à la sortie du canal au cours de la journée. L'examen de cette figure montre que l'écart entre les trois modèles est faible, en confirmant la capacité de notre modèle à bien suivre l'écoulement de l'air et les échanges de chaleur.

III.3. Résultats numériques obtenus par Comsol

Les valeurs des paramètres de départ utilisés dans le model numérique, pour la suite des calculs, sont celles trouvées expérimentalement par Joshi et al.

Ces paramètres sont : la température ambiante, le rayonnement solaire, la vitesse d'écoulement d'air et la température de la cellule.

III.3.1. Capteur solaire HPVT (avec effet joule)

Dans cette partie, on analyse les performances thermique et électrique du capteur solaire hybride, qui produit à la fois de l'électricité et de la chaleur. Dans ce cas, au niveau de cellule la génération de l'énergie électrique va produire de la chaleur par effet Joule.

a. Température de la cellule

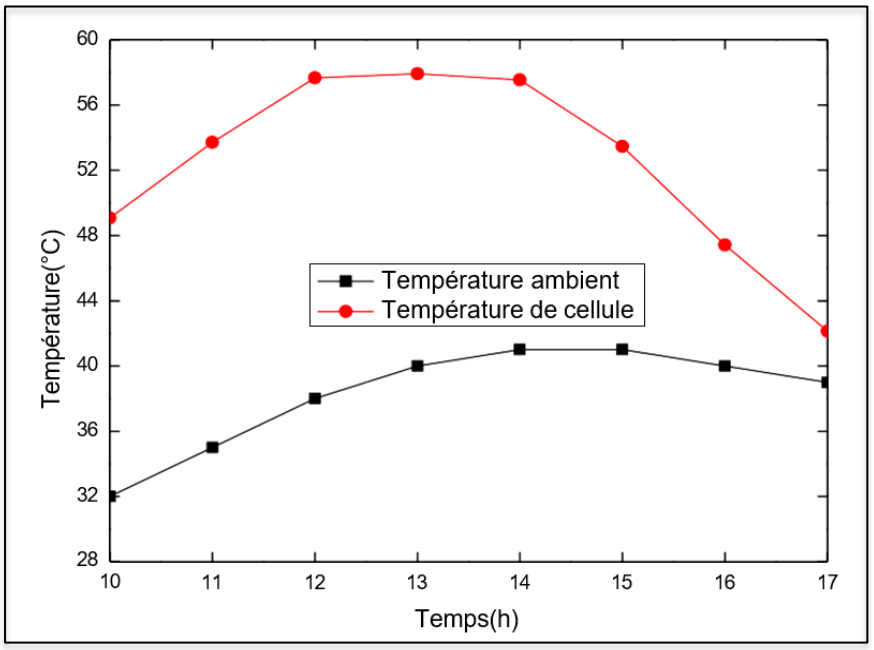


Figure III.3. *Variation de la température de la cellule et de la température ambiante en fonction du temps*

La **Figure III.3** montre l'évolution de la température de la cellule et celle de l'air extérieur (ambiant) durant la journée. On remarque que les deux courbes présentent même forme de variation. La température de la cellule monte en même temps que la température ambiante et atteignant son maximum vers 14h. L'écart entre les deux températures est variable. Il arrive jusqu'au environ 15 °C.

b. Variation de la température de la surface de la cellule en fonction de la longueur du panneau : Influences du rayonnement solaire

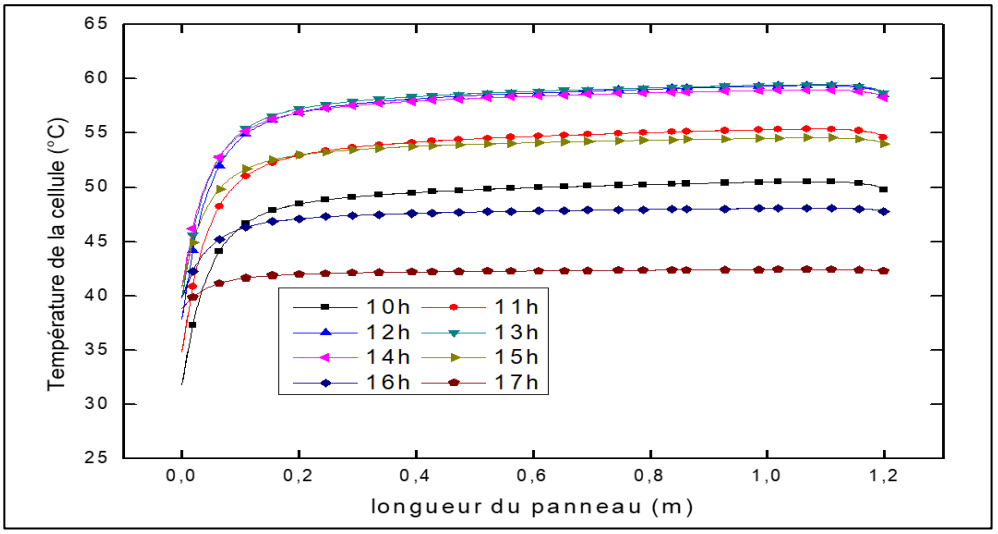


Figure III.4. *Courbes de variation de la température de la surface de la cellule en fonction de la longueur du panneau pendant la journée*

La **figure III.4** représente la variation de la température à la surface de la cellule pour différents temps de la journée. L'examen de cette figure montre qu'il y a trois parties à traiter selon la longueur du panneau et l'augmentation de la température.

De l'entrée de panneau à 0,11m de longueur, la température s'élève avec un écart important par rapport à la température ambiante. Entre 0,11 m et environ 0,76m, cet écart devient moins important. Au-delà de cette longueur la température de surface de la cellule commence à se stabiliser et prend une valeur constante.

c. Distribution de la température à travers les différentes couches du panneau solaire

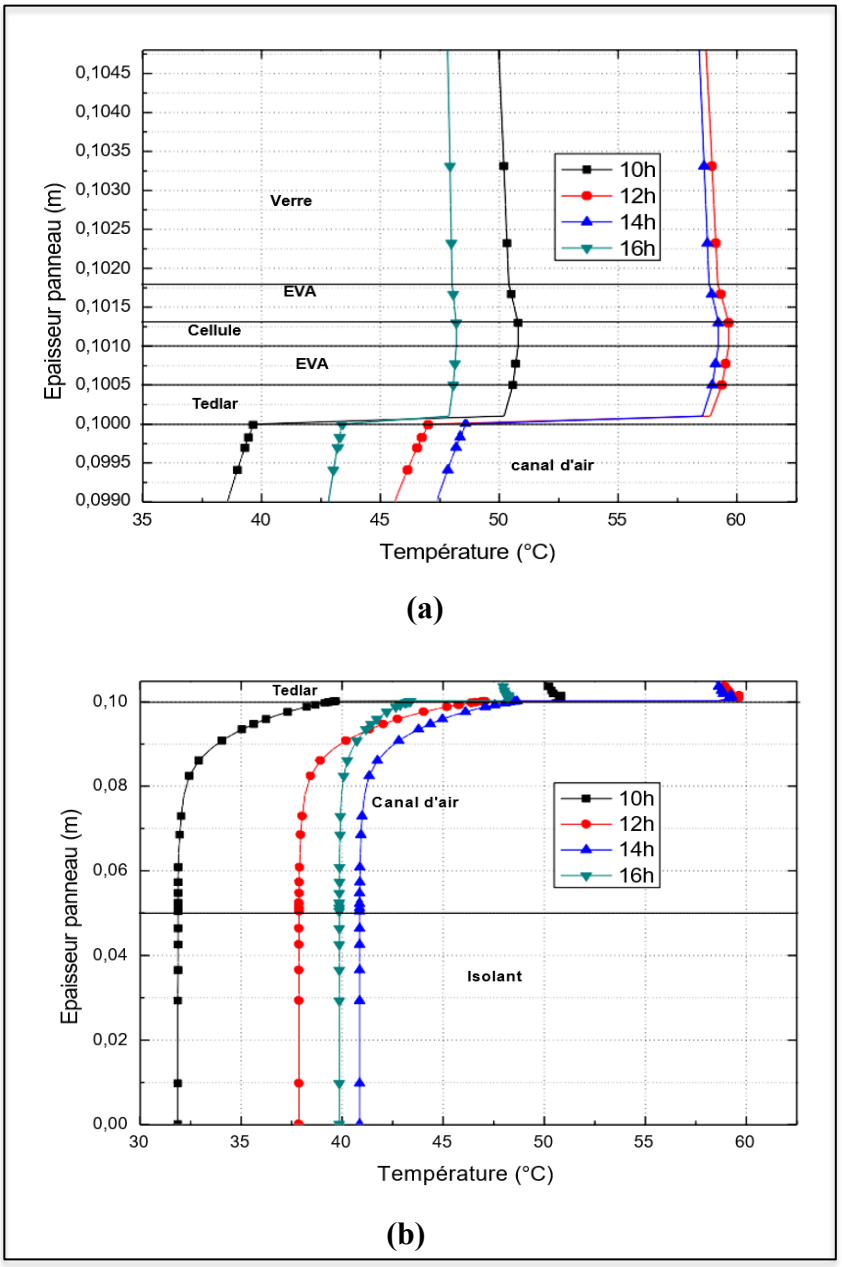


Figure III.5. *Variation de la température à travers les différentes couches du panneau solaire en fonction du temps* ***: a)****-au centre de la cellule ; b)- au centre du canal d'air*

L'observation de la **Figure III.5** (a) montre que la valeur de la température la plus élevée se situe au niveau de la couche de silicium. Elle diminue progressivement en direction de la couche de verre. Une chute notable de température est observée à travers la couche de Tedlar, et ce, pour les différents moments de la journée. Cette différence de température est liée aux caractéristiques thermo-physiques des matériaux.

Dans la **Figure III.5** (b), on remarque que l'influence du rayonnement solaire sur l'échauffement de l'air est significative pour l'air en contact avec la face inférieure du Tedlar. À partir d'une distance de 2 cm, cette influence devient moins importante, et la température de l'air tend vers la température ambiante.

d. Température de l'air à la sortie du canal

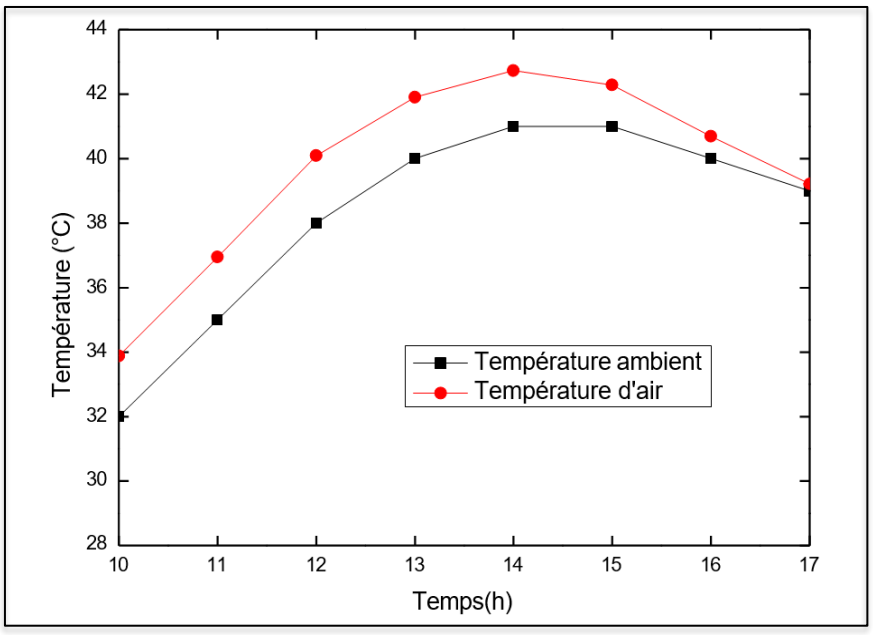


Figure III.6. *Variation de la température de l'air à la sortie de canal et de la température ambiante en fonction du temps*

La **Figure III.6** représente l'évolution de la température de l'air chaud à la sortie du canal et de la température ambiante pendant la journée. On constate une augmentation significative de la température de l'air de sortie du canal, qui suit étroitement la température ambiante. À 14h, les deux températures atteignent leur maximum. Un écart de température est observé entre les deux, ce qui montre l'efficacité du système à capter la chaleur pour chauffer l'air.

Cela est très positif pour la production thermique.

e. Variation de la température de l'air de sortie en fonction de la hauteur du canal : Influence du débit d'air

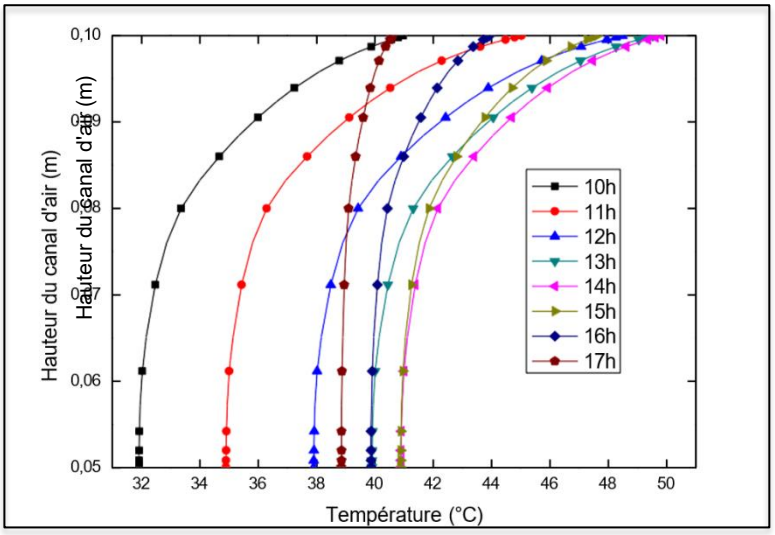


Figure III.7. *Variation de la température de l'air de sortie en fonction de la hauteur du canal*

La **Figure III.7** représente l'évolution de la température de l'air à la sortie du canal pour différents moments de la journée. On remarque un écart entre la température de l'air en contact avec le Tedlar et celle en contact avec la couche isolante. Cet écart est plus important vers le milieu de la journée, entre 12h et 14h, et peut atteindre 10°C. En fin de journée, vers 17h, cet écart diminue et atteint une valeur minimale d'environ 2°C. Cette différence de température est due à la variation du rayonnement solaire au cours de la journée.

f. Puissances et rendements

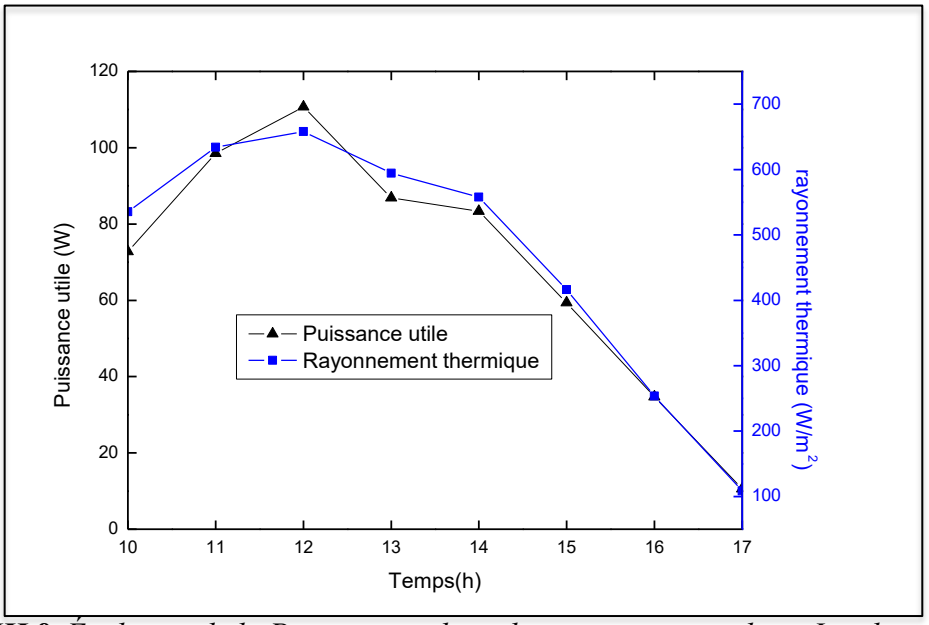


Figure III.8. *Évolution de la Puissance utile et du rayonnement solaire Incident au cours de la journée*

Les courbes de la **Figure III.8** illustre la variation de la puissance thermique produite et du rayonnement solaire en fonction du temps. On observe que les deux paramètres présentent une évolution similaire au cours de la journée. En effet, la puissance thermique augmente progressivement depuis le lever du soleil. Elle atteint un maximum vers le milieu de la journée, le moment où le rayonnement solaire est à son maximum, avec une valeur maximale de 110 W. Puis le rayonnement solaire diminue, la puissance thermique décroît aussi pour atteindre une valeur minimale de l'ordre de 10 W en fin de journée. Cela montre clairement que la puissance transférée à l'air dépend directement et fortement de l'énergie solaire reçue par le capteur solaire.

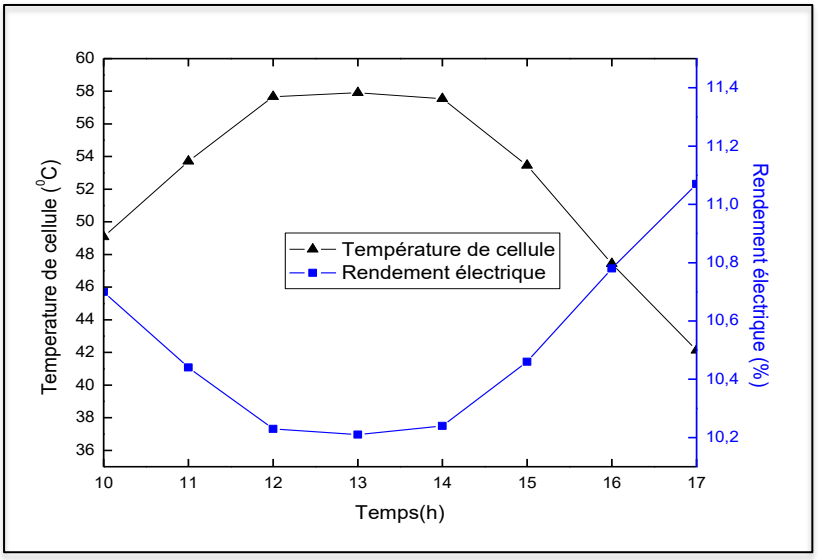


Figure III.9. *Influence de la température de cellule sur le rendement électrique du panneau solaire*

La **Figure III.9** met en évidence l'influence de la température de la cellule photovoltaïque sur le rendement électrique du panneau solaire. On observe une relation inverse entre les deux grandeurs : à mesure que la température de la cellule augmente, le rendement électrique diminue. Ce phénomène s'explique par le fait que la performance des cellules photovoltaïques est sensible à la température et baisse avec l'élévation de la température de la cellule. Ce comportement confirme un phénomène bien connu dans la littérature : le rendement des panneaux solaires décroît généralement avec l'augmentation de la température de fonctionnement.

Ainsi, il est essentiel de maîtriser la température de fonctionnement pour optimiser la production d'électricité.

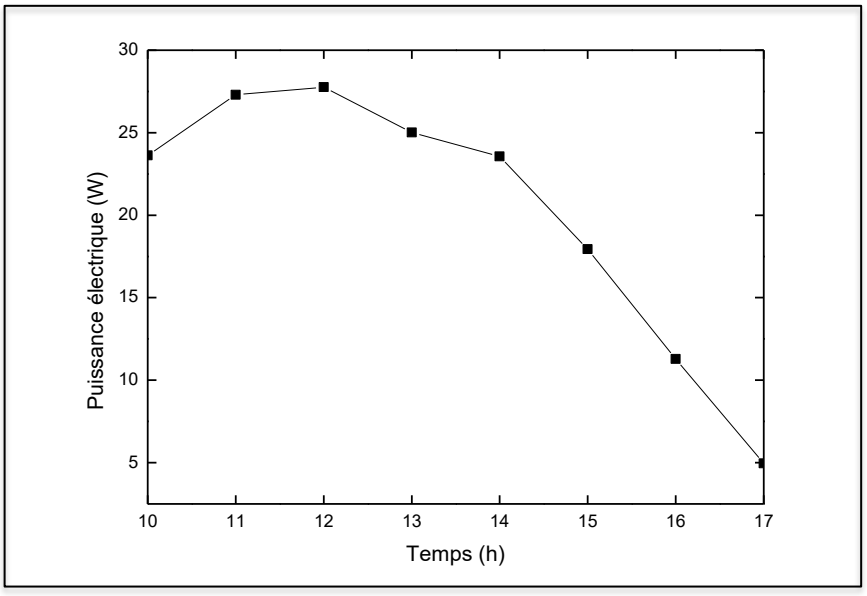


Figure III.10. *Variation de la puissance électrique en fonction du temps*

La **Figure III.10** présente la variation de la puissance électrique produite par la cellule photovoltaïque au cours de la journée. L'analyse de la courbe de cette figure montre que la puissance atteint son maximum à midi, avec une valeur de puissance voisine de 28 W, moment correspondant au maximum d'irradiation solaire. À l'inverse, en fin de journée, la puissance chute à une valeur minimale et atteint 5W, en raison de la faible intensité du rayonnement solaire à ce moment de la journée. Cette évolution confirme que la production électrique du panneau photovoltaïque est directement liée à l'intensité du rayonnement solaire reçu par le capteur.

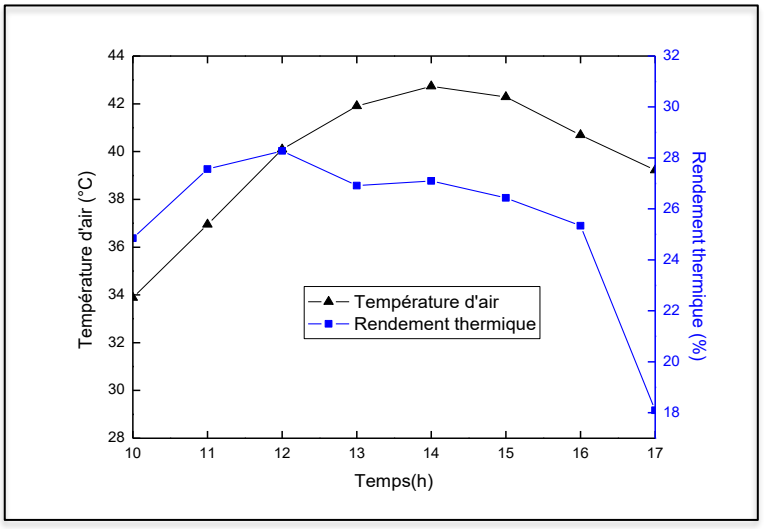


Figure III.11. *Variation de la température de l'air et du rendement thermique en fonction du temps*

La **Figure III.11** représente l'évolution de la température de l'air de sortie et du rendement thermique en fonction du temps. On observe que la température de l'air augmente progressivement et atteint un maximum de 43°C vers 14h, après ce moment elle diminue légèrement jusqu'à 17h.

En parallèle, le rendement thermique suit une forme de variation similaire mais avec une légère différence : il atteint son pic (environ 28 %) plus tôt, vers 12h, puis commence à diminuer progressivement.

Cette évolution montre une relation directe entre la température de l'air de sortie du canal et le rendement thermique. En conclusion, le rendement thermique est optimal lorsque la température augmente, mais au-delà d'un certain seuil, une surchauffe pourrait entraîner une baisse de performance.

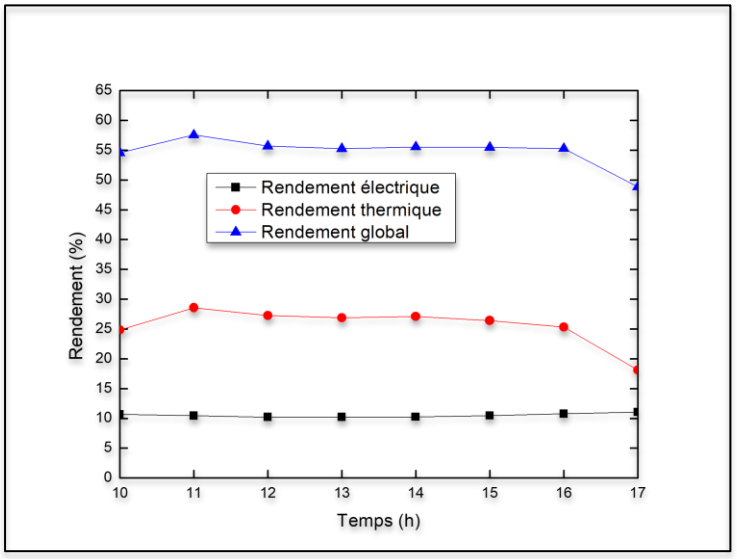


Figure III.12. *Evolution temporelle des composantes du rendement d'un panneau solaire hybride*

La **Figure III.12** présente l'évolution des rendements électrique, thermique et global d'un panneau solaire hybride (PVT) en fonction du temps, dans l'intervalle horaire allant de 10 h à 17h. Il est observé que le rendement global du système se situe entre 50 % et 57 %, ce qui signifie qu'il y a une bonne valorisation de l'énergie solaire disponible.

Le rendement thermique évolue au cours de la journée entre 20 % et 25 %, traduisant l'efficacité du capteur à récupérer la chaleur transmise à l'air à l'intérieur du canal. En parallèle, le rendement électrique reste relativement stable, avec des valeurs comprises entre 10 % et 11 %, ce qui est lié au comportement électrique des cellules photovoltaïques.

g. Position du point chaud à la surface du panneau solaire

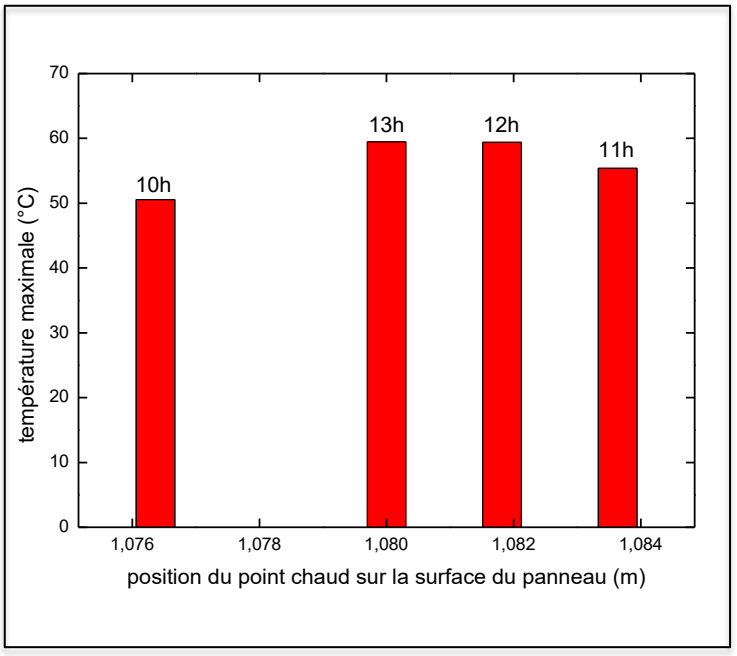


Figure III.13. *Position de la température maximale à la surface de la cellule*

D'après la figure qui représente la position de la température maximale sur la surface du panneau, on trouve que le point le plus chaud se situe au dernier quart du panneau solaire, quel que soit le moment de la journée. Cela est probablement dû aux conditions aux limites imposées.

h. Influence de la vitesse du vent sur la température de la cellule et le rendement électrique

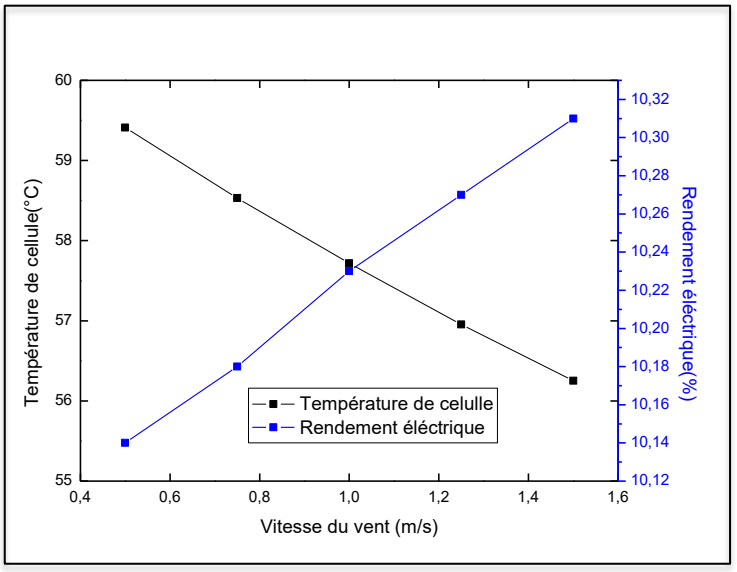


Figure III.14. *Variation de la température de la cellule et le rendement électrique en fonction de la vitesse du vent*

La **Figure III.14** illustre l'effet de la vitesse du vent sur les deux paramètres clés du fonctionnement d'un panneau solaire hybride : la température de la cellule et le rendement électrique. Il ressort de ces résultats que l'augmentation de la vitesse du vent de 0,5 m/s à 1,5 m/s entraine une diminution progressive de la température de la cellule, passant d'environ 59,5°C à 56°C. Cette baisse de température est accompagnée d'une augmentation du rendement électrique, qui passe d'environ 10,15 % à 10,31 %. Cela montre que le refroidissement induit par le vent améliore les performances du panneau solaire, car une température plus basse réduit les pertes thermiques et augmente l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité.

III.3.2. Capteur solaire HPVT (sans effet joule)

Dans cette partie, l'échauffement par effet Joule au niveau de la cellule sera éliminé en rendant le fonctionnement du panneau solaire purement thermique. Cela va nous permettre de montrer son impact sur les performances du panneau solaire sans production d'énergie électrique.

a. Comparaison du puissance et rendement thermique

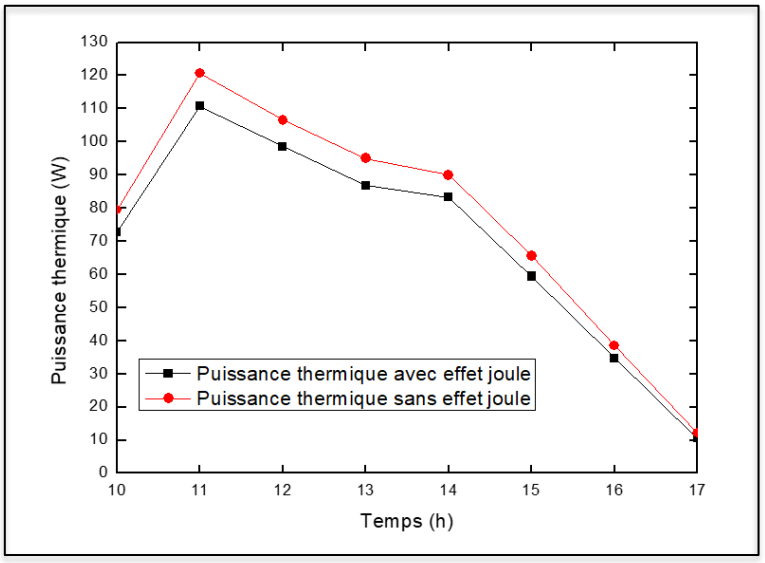


Figure III.15. *Évolution de la puissance thermique d'un panneau solaire en fonction du temps avec et sans effet Joule*

La **Figure III.15** illustre la quantité de chaleur produite par le panneau en fonction du temps avec et sans effet Joule. La comparaison entre les résultats des deux cas montre que la puissance thermique produite au niveau du capteur solaire sans effet Joule est plus importante que celle avec présence de l'effet Joule. Cela montre que même si l'effet Joule génère de la chaleur, cette chaleur ne semble pas être utile pour augmenter la puissance thermique collectée par le système. Au contraire, la présence de l'effet Joule semble réduire la capacité globale du panneau à délivrer de la chaleur utile.

Cela pourrait s'expliquer par le fait que la chaleur de l'effet Joule, en augmentant la température du panneau, entraîne aussi plus de pertes de chaleur vers l'air ambiant, réduisant ainsi la puissance thermique nette que à récupérer.

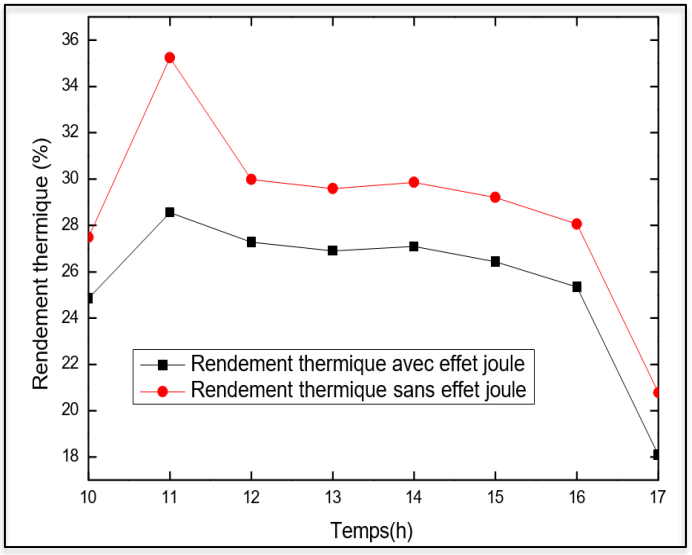


Figure III.16. *Evolution du rendement thermique d'un panneau solaire avec et sans Effet Joule*

La **Figure III.16** présente l'évolution du rendement thermique d'un panneau solaire hybride en fonction du temps, avec et sans effet Joule. On remarque que le rendement thermique est globalement plus élevé sans effet Joule, notamment entre 11h et 16h. Le rendement sans effet Joule atteint un maximum d'environ 36 %, contre seulement 29 % avec effet Joule. L'écart entre les deux cas est visible. En fin de journée, à partir de 16h, les deux rendements diminuent. Cette différence s'explique par les pertes thermiques causées par l'effet Joule, qui réduit l'efficacité globale du système.

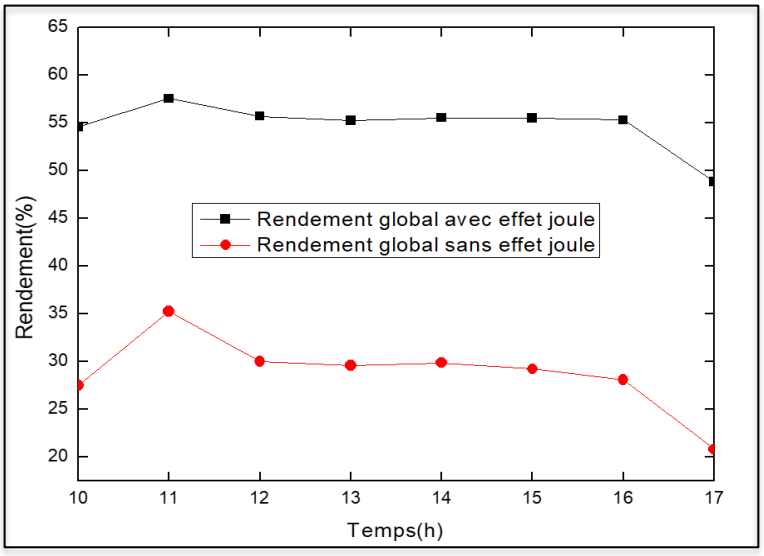


Figure III.17. *Évolution du rendement global d'un panneau solaire hybride avec et sans Effet Joule*

La **Figure III.17** représente le rendement global avec et sans effet Joule. Les courbes de cette figure montrent que rendement global du panneau solaire avec effet Joule est plus important que celui sans effet Joule. La différence entre les deux est le rendement électrique qui s'ajoute au premier cas.

b. Influence du rayonnement solaire sur la variation de la température de l'air à la sortie du canal

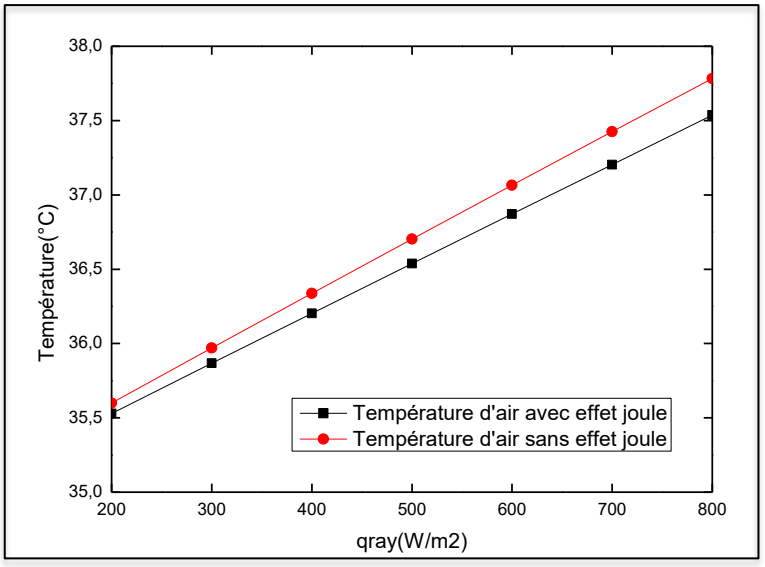


Figure III.18. *Influence du rayonnement solaire sur la température de l'air à la sortie du canal avec et sans effet Joule*

La **Figure III.18** représente la variation de la température de l'air sortie du canal en fonction du rayonnement solaire avec et sans effet Joule. L'examen des deux courbes de cette figure montre que l'augmentation du rayonnement solaire provoque une élévation de la température d'air avec et sans production d'énergie électrique. Ce résultat est cohérent avec la littérature. On note que la température de l'air sortie du canal sans effet Joule est supérieure à celle avec effet Joule. Cela signifie que le rayonnement incident au capteur solaire sera bien exploité par l'air utilisé lorsque l'effet Joule est absent dans le système.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté l'essentiel des résultats obtenus par simulation numérique d'un panneau solaire hybride photovoltaïque thermique à air avec et sans effet Joule.

Les valeurs obtenues ont montré qu'il y a une influence, de la génération de la chaleur par effet Joule au niveau de la cellule, sur les performances du panneau solaire.



Conclusion générale

Conclusion générale

Le présent travail a pour objectif d'étudier numériquement l'influence de la génération de la chaleur par effet Joule au niveau de la cellule sur le comportement thermique et électrique d'un capteur solaire hybride à air en utilisant le logiciel multiphysique COMSOL. Pour ce faire, un modèle de simulation par éléments finis a été développé en deux dimensions et en régime stationnaire pour analyser les performances de la cellule en utilisant les données expérimentales d'une étude réalisée par Joshi []. Cela nous a permis de comparer les résultats obtenus des températures de la cellule et de l'air à la sortie du canal et valider par la suite le modèle numérique. Les résultats obtenus ont montré que le modèle numérique reproduit de manière satisfaisante les phénomènes thermiques à travers les différentes couches du capteur solaire.

Les courbes da variation de la température de la cellule et du rendement électrique montre qu'il y a une relation inverse entre les deux grandeurs. Ce comportement confirme un phénomène bien connu dans la littérature : le rendement des panneaux solaires décroît généralement avec l'augmentation de la température de la cellule. D'où l'importance de maîtriser cette température afin d'optimiser la conversion électrique et améliorer les performances globales du système.

La puissance électrique atteint son maximum à midi, avec une valeur de 28 W. En fin de journée, la puissance chute à une valeur minimale et atteint 5W, en raison de la faible intensité du rayonnement solaire à ce moment de la journée. Ce résultat confirme la dépendance directe de la production électrique photovoltaïque au rayonnement solaire incident.

La température de l'air augmente progressivement et atteint son maximum de 43°C, elle diminue légèrement en fin de journée. La forme de variation du rendement thermique est similaire avec celle de la température de l'air traduisant une relation directe entre la température de l'air et le rendement thermique du capteur. Ce comportement indique que le rendement thermique est optimal lorsque la température de l'air augmente, en raison d'un meilleur transfert de chaleur vers le fluide caloporteur.

Le rendement global du système se situe entre 50 % et 57 %, ce qui signifie qu'il y a une bonne valorisation de l'énergie solaire disponible. Le rendement thermique évolue au cours de la journée entre 20 % et 25 % selon la chaleur transmise à l'air à l'intérieur du canal. Le rendement électrique prend des valeurs comprises entre 10 % et 11 %, car il est lié à la production électrique des cellules photovoltaïques.

Le refroidissement induit par le vent améliore les performances du panneau solaire, car une température plus basse réduit les pertes thermiques et augmente l'efficacité de conversion de l'énergie solaire en électricité.

La comparaison entre les résultats des deux cas montre que la puissance thermique produite au niveau du capteur solaire sans effet Joule est plus importante que celle avec présence de l'effet Joule.

Le rendement thermique est globalement plus élevé sans effet Joule. Le rendement sans effet Joule atteint un maximum d'environ 36 %, contre seulement 29 % avec effet Joule.

L'augmentation du rayonnement solaire provoque une élévation de la température d'air avec et sans production d'énergie électrique. La température de l'air sortie du canal sans effet Joule est supérieure à celle avec effet Joule. Cela signifie que le rayonnement incident au capteur solaire sera bien exploité par l'air utilisé lorsque l'effet Joule est absent dans le système.

Les résultats de cette étude confirment que les systèmes hybrides PV/T représentent une solution efficace pour améliorer l'exploitation de l'énergie solaire. Néanmoins, il est nécessaire de maîtriser les phénomènes de dissipation thermique, en particulier les pertes par effet Joule, afin de préserver et optimiser les performances globales du système.

Dans cette perspective, des travaux futurs devraient être consacrés à la validation expérimentale des modèles développés, ainsi qu'à la conception de solutions adaptées aux conditions climatiques particulièrement chaudes.

Références bibliographiques

[1] Hanene, Ben Cheikh Le Hocine. Modélisation nanothermique des systèmes Thermo/Photovoltaïques Applications aux collecteurs hybrides PVT. Diss. Thèse, 2015.

[2] https://www.espace-aubade.fr/blog/energie-renouvelables/panneaux-solaires-thermiques-budget-et-retour-sur-investissement.html (2025/11/25).

[3] Rechek, Seyfeddine, et al. Simulation numérique par le code de calcul COMSOL d'un capteur hybride photovoltaïque thermique. Diss. Université de Jijel, 2021.

[4] https://www.lepanneausolaire.net/les-differents-types-capteurs.php

[5] https://knowridge.com/2025/01/new-breakthroughs-in-renewable-energy-storage/

[6] Sarah, Belaidi. Etude et optimisation d'une installation photovoltaïque autonome. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2016.

[7] https://www.encyclopedie-energie.org/en/photovoltaic-solar-power-technologies-trajectory/

[8] https://www.cooltec.ch/hybride-pvt-faq.html

[9] BECHKI, Sara. Etude Numérique D'un Capteur Solaire HybridePVT. Diss. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2020.

[10] https://www.ecosources.org/panneau-solaire-hybride

[11] https://www.researchgate.net/figure/Equivalent-circuit-of-one-diode-model-of-PV-cell-The-load- current-I-can-be-expressed-in_fig1_344020044

[12] Joshi, A. S., et al. "Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal (PV/T)(glass-to-glass) system." International Journal of Thermal Sciences 48.1 (2009): 154-164.

[13] Yandri, Erkata, and Naoto Hagino. "Joule heating estimation of photovoltaic module through cells temperature measurement." International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) 13.2 (2022): 1119-1128.

[14] Yandri, Erkata. "The effect of Joule heating to thermal performance of hybrid PVT collector during electricity generation." Renewable Energy 111 (2017): 344-352.

[17] Morchid, Houda, and Michael Conlon. "Investigation of the effects of Joule heating on the performance of photovoltaic modules." (2017).

[18] Tiwari, Arvind, et al. "Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India." Solar Energy Materials and Solar Cells 90.2 (2006): 175-189.

[19] Zhou, Jicheng, et al. "Temperature distribution of photovoltaic module based on finite element simulation." Solar Energy 111 (2015): 97-103.

[20] Ghellab, Amel, Abdennacer Kaabi, and Yassine Kabar. "NUMERICAL STUDY OF A HYBRID PHOTOVOLTAIC/THERMAL SOLAR COLLECTOR USING TWO DIFFERENT GLAZING." Sciences & Technologie. B, Sciences de l'ingénieur (2017): 45-55.

[21] Radwan, Ali, and Mahmoud Ahmed. "The influence of microchannel heat sink configurations on the performance of low concentrator photovoltaic systems." Applied energy 206 (2017): 594-611.

[22] Hegazy, Adel A. "Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors." Energy Conversion and management 41.8 (2000): 861-881.

Résumé :

Ce projet a pour objectif d'étudier les performances thermiques et électriques d'un système solaire hybride PV/T qui utilise l'air comme fluide de refroidissement, à travers une simulation numérique réalisée avec le logiciel COMSOL Multiphysiques en 2D avec régime stationnaire.

Deux configurations ont été comparées : une cellule produisant de l'électricité (avec effet Joule) et une autre sans production (sans effet Joule). L'étude a permis d'analyser la répartition de la température dans le système et d'évaluer l'impact du refroidissement. Les résultats ont montré que l'effet Joule contribue clairement à l'élévation de la température de la cellule et à la baisse de son rendement thermique du 36% à 29%. Tandis que le refroidissement permet de limiter ces pertes thermiques et d'améliorer les performances globales.

Ces résultats mettent en évidence l'importance de maîtriser les pertes liées à l'effet Joule pour optimiser l'efficacité des systèmes photovoltaïques thermiques.

Mots clés : Effet joule, rendement thermique, température de la cellule, puissance électrique, Comsol multiphysiques.

Abstract :

This project aims to study the thermal and electrical performance of a hybrid PV/T (photovoltaic/thermal) solar system that uses air as a cooling fluid. The study is conducted through a 2D steady-state numerical simulation using COMSOL Multiphysics software.

Two configurations were compared: one with a current-producing cell (including the Joule effect) and another without current production (excluding the Joule effect). The study allowed for the analysis of temperature distribution within the system and the evaluation of the cooling impact.

The results demonstrated that the Joule effect clearly contributes to an increase in the cell's temperature and to a decrease in its thermal efficiency from 36% to 29%. Conversely, the cooling process helps to limit these thermal losses and improve overall performance. These findings underscore the importance of managing Joule effect-related losses to optimize the efficiency of photovoltaic/thermal systems.

Keywords : Joule effect, thermal efficiency, cell temperature, electrical power, COMSOL Multiphysics.

الملخص :

يهدف هذا المشروع إلى دراسة الأداء الحراري والكهربائي لنظام شمسي هجين كهروضوئي/حراري(PV/T) يستخدم الهواء كمائع تبريد، وقد أُجريت الدراسة من خلال محاكاة عددية ثنائية الأبعاد (2D) (steady-state) وفي حالة مستقرة باستخدام برنامج COMSOL Multiphysics.

تمت المقارنة بين تكوينين مختلفين : خلية منتجة للتيار الكهربائي (مع تأثير جول) وأخرى غير منتجة للتيار (بدون تأثير جول). أتاحت الدراسة تحليل توزيع درجات الحرارة في النظام وتقييم تأثير عملية التبريد.

أظهرت النتائج أن تأثير جول يساهم بوضوح في رفع درجة حرارة الخلية وخفض مردودها من36 % الى 29 %, في المقابل، يسمح التبريد بالحد من هذه الخسائر الحرارية وتحسين الأداء العام للنظام. تؤكد هذه النتائج على أهمية التحكم في الخسائر المرتبطة بتأثير جول لتحقيق الأداء الأمثل للأنظمة الكهروضوئية الحرارية.

الكلمات المفتاحية : تأثير جول، المردود الحراري، درجة حرارة الخلية، القدرة الكهربائية، كومسول ملتي فيزيكس.