

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Etude thermoélectrique d'un capteur solaire hybride à air de type PV/T

Oussama BOUFENARA

Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2016

Composition du Jury :

Président	Bouzid BENKOUSSAS	Maître de Recherche- A	ENP Alger
Promoteur	Salah LARBI	Professeur	ENP Alger
Co- Promoteur	Rabah SELLAMI	Chargé de Recherche	UBES Bousmail
Examineur	Med Tarek ATTOUCHI	Maître Assistant- A	ENP Alger

2016

Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et Développement

Mémoire de projet de fin d'études

pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

Etude thermoélectrique d'un capteur solaire hybride à air de type PV/T

Oussama BOUFENARA

Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2016

Composition du Jury :

Président	Bouzid BENKOUSSAS	Maître de Recherche- A	ENP Alger
Promoteur	Salah LARBI	Professeur	ENP Alger
Co- Promoteur	Rabah SELLAMI	Chargé de Recherche	UDES Bousmail
Examineur	Med Tarek ATTOUCHI	Maître Assistant- A	ENP Alger

2016

Ecole Nationale Polytechnique, Alger.

ملخص :

أثناء تشغيل الخلايا الضوئية، هنالك جزء كبير من الأشعة الشمسية التي تمتصها الخلايا، لا يتم تحويلها إلى طاقة كهربائية وبسبب زيادة في درجة حرارتها عن طريق تخفيض كفاءتها الكهربائية. درجة حرارة هذه اللواقط يمكن تخفيضها عن طريق تفرغ حرارتها باستخدام سائل متحرك طبيعياً أو باستخدام محرك خارجي مناسب. العمل المقدم في هذه المذكرة يتمثل في دراسة نظرية وتجريبية للأقطاب ثنائي الاستعمال كهروضوئي حراري هوائي. الدراسة النظرية للأقطاب الثنائي الاستعمال تمثلت في نمذجة خصائصها الحرارية والكهربائية عن طريق تحديد منط درجة حرارة مختلف طبقات الأقطاب. النموذج النظري بدراسة تجريبية، أقيم في إطار هذا المشروع، باستعمال نموذج حقق في مختبر أبحاث أجهزة وتطبيقات الطاقة الشمسية بوحدة تطوير معدات الطاقة الشمسية في بو سمايل. النتائج المحصل عليها تبين أن تشير النتائج إلى أن الجهاز هو بديل جيد للواقط الكهروضوئية والحرارية التقليدية المركبة بشكل منفصل.

الكلمات المفتاحية: (الواقط الشمسية، الكهروضوئية، الحرارية، هجين، درجة الحرارة، نموذج).

Abstract :

During the operating mode of the photovoltaic cells, a large part of the solar radiation absorbed by the cells is not converted into electricity and causes an increase in temperature by reducing the electrical efficiency. The temperature of these sensors can be reduced by heat dissipation using a suitable natural or forced fluid circulation. The work presented in this study is based mainly on theoretical and experimental study of a hybrid solar collector (Photovoltaic-Thermal with air circulation). The theoretical study on the hybrid sensor consists on a mathematical modeling of thermal and electrical characteristics by determining the temperature profile in the various layers of the sensor. The theoretical model is validated according to an experimental study, initiated in this project, by using a prototype developed at Equipements and Heliothermal Applications UDES laboratory (Development Unit of Solar Equipment at Bou Ismail). Obtained results showed that the system thus formed is a good alternative to conventional photovoltaic and thermal sensors installed separately.

Keywords : Solar collector, Photovoltaic, Thermal, Hybrid, Temperature, Prototype.

Résumé :

Au cours du fonctionnement des capteurs photovoltaïques, une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules n'est pas converti en électricité et provoque une augmentation de leur température en réduisant leur efficacité électrique. La température de ces capteurs peut être réduite par évacuation de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une étude théorique et expérimentale d'un capteur solaire hybride, Photovoltaïque- Thermique à air. L'étude théorique sur le capteur hybride a consisté en une modélisation des caractéristiques thermiques et électriques à travers la détermination du profil de température dans les différentes couches du capteur. Le modèle théorique a été validé par une étude expérimentale, entamée dans le cadre de ce projet, par l'utilisation d'un prototype réalisé au laboratoire Equipements et Applications Héliothermiques de l'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires de Bou Ismail). Les résultats obtenus montrent que le système ainsi constitué est une bonne alternative aux capteurs photovoltaïques et thermiques classiques séparément installés.

Mots clés : Capteur solaire, Photovoltaïque, Thermique, Hybride, Température, Prototype.

*«Je suis reconnaissant envers ceux qui m'ont répondu
‘NON’ ; Grâce à eux, je l'ai fait moi-même».*

Albert Einstein.

*A mes Parents,
A mon frère et ma sœur,
A mes grands- parents,
A mes oncles et mes tantes,
A ma famille petite et grande.*

Remerciements

Je remercie Dieu, le tout puissant de m'avoir donné la santé et le courage pour réaliser ce modeste travail.

Mes remerciements vont tout d'abord à mes parents pour m'avoir toujours soutenu. A mon père, mon exemple dans la vie. A ma mère qui a été toujours à mon écoute. A mon frère Lamine et à ma sœur Meroua. A toute ma famille pour les encouragements qu'ils m'ont toujours prodigués et leur appui inconditionnel à chaque étape de ma vie.

Mes remerciements vont en particulier, au Professeur Salah LARBI, mon promoteur et à Monsieur Rabah SELLAMI, mon co-promoteur, qui ont accepté de m'encadrer tout le long de ce travail. Je suis très reconnaissant pour leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils judicieux à tous les niveaux, et pour le temps qu'ils m'ont consacré. Ils m'ont appris ce qu'est la rigueur dans le travail et ont su me communiquer leur passion pour la recherche. Mes remerciements vont également aux membres du jury qui ont pris soin d'examiner ce travail : Monsieur Bouzid Benkoussas, Maître de Conférence- A et Mohamed Tarek Attouchi, Maître Assistant- A, tous deux enseignants à l'Ecole Nationale Polytechnique.

Je tiens à remercier : Monsieur Adel, Mlle Rym, et toute l'équipe EAS ainsi. Mes remerciements vont à Mesdames CHEKIRE Fethia et ATOUI Sakina, à Messieurs SMARA Zoubir, MEFLAH Aissa et CHIKH Madjid pour les connaissances dont ils m'ont fait bénéficier, leur suivi attentif, pour leur aide, leurs conseils et leur dévouement.

Mes remerciements vont aux chargées de la bibliothèque de l'UDES, à tout le personnel de la direction UDES et à tous les chercheurs de la division EER, ainsi qu'à tous les stagiaires rencontrés à l'UDES, pour l'accueil et la bonne ambiance qui a régné pendant mon stage. Une pensée particulière à Mlle Aya DELLIOU pour son encouragement, et son appui le long de l'année.

Je ne peux terminer sans exprimer ma gratitude à tous les profs du département de Génie Mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique, pour les connaissances acquises tout au long du cursus (théoriques et pratiques) ainsi que les relations humaines qu'ils m'ont fait bénéficier le long de ce cursus d'ingénieur.

Enfin, tous mes remerciements à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à l'aboutissement de ce mémoire.

Oussama BOUFENARA

Table des matières

Liste des tableaux.....	08.
Liste des figures.....	09.
Liste des symboles.....	12.
Introduction générale.....	15.
Chapitre I : Généralités sur les capteurs solaires hybrides PVT	18.
<i>I.1.</i> Capteurs solaires photovoltaïques	18.
<i>I.1.1.</i> Panneau photovoltaïque.....	20.
<i>I.1.2.</i> Système photovoltaïque	20.
<i>I.2.</i> Capteurs solaires thermiques	21.
<i>I.2.1.</i> Composantes d'un système de conversion thermique.....	23.
<i>I.2.2.</i> Définition et principe d'un capteur solaire plan.....	24.
<i>I.2.3.</i> Types de capteurs solaires thermiques.....	25.
<i>I.2.4.</i> Constituants d'un capteur solaire plan.....	26.
<i>I.2.5.</i> Paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire.....	27.
A. Paramètres internes.....	27.
B. Paramètres externes.....	30.
<i>I.2.6.</i> Pertes thermiques dans un capteur solaire.....	31.
<i>I.2.6.1.</i> Coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le vitrage.....	31.
<i>I.2.6.2.</i> Coefficient de transfert de chaleur sur le vitrage.....	32.
<i>I.3.</i> Problématique et naissance du PV/T.....	32.
Chapitre II : Contexte bibliographique.....	34.
<i>II.1.</i> Problématique.....	34.
<i>II.2.</i> Capteurs solaires PV/T à air.....	37.
<i>II.2.1.</i> Etudes théoriques.....	37.
<i>II.2.2.</i> Etudes expérimentales.....	41.
<i>II.3.</i> Capteurs solaires PV/T hybrides à eau.....	45.
<i>II.3.1.</i> Etudes théoriques.....	45.
<i>II.3.2.</i> Etudes expérimentales.....	45.
<i>II.4.</i> Capteurs PVT de concentration.....	52.

Chapitre III : Modélisation mathématique d'un capteur solaire hybride PV/T à air	56.
III.1. Description du système	56.
III.1.1. Composantes principales et principe de fonctionnement.....	56.
III.1.1.1. Panneau photovoltaïque	57.
III.1.1.2. Fluide caloporteur.....	57.
III.1.1.3. Isolant.....	57.
III.2. Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique.....	58.
III.2.1. Bilan énergétique du capteur hybride PVT.....	59.
III.2.1.1. Principe de l'étude thermique d'un PVT.....	59.
III.2.1.2. Régime transitoire.....	61.
III.2.1.3. Régime permanent.....	65.
III.2.1.4. Caractéristiques des capteurs et solution approchée.....	70.
III.2.1.4.1. Solution approximative.....	70.
III.2.1.4.2. Performance thermiques du capteur hybride.....	71.
III.3. Modèle électrique.....	71.
III.4. Simulation numérique.....	74.
Chapitre IV : Présentation du dispositif expérimental	76.
IV.1. Descriptif du capteur hybride.....	76.
IV.1.1. Caractéristiques électriques et dimensions du capteur.....	78.
IV.2. Dispositifs de mesure.....	79.
IV.2.1. Unité d'acquisition de données Fluke Hydra.....	79.
IV.2.2. Mesure de débit	81.
IV.2.3. Mesure des paramètres climatiques	82.
IV.2.4. Distributions de températures dans le capteur	82.
IV.3. Description et objectifs des essais expérimentaux.....	84.
Chapitre V : Résultats et discussions	87.
V.1. Introduction.	87.
V.2. Variation de quelques paramètres climatiques en fonction du temps.	87.
V.2.1. Eclairage solaire.	87.
V.2.2. Température ambiante.	88.
V.2.3. Vitesse du vent.	89.
V.3. Etude expérimentale.	90.
V.3.1. Etude thermique et variation des températures des couches du capteur....	91.
V.3.2. Etude de la production d'énergie électrique et thermique du capteur et de sa variation.	95.
V.3.4. Etude des performances du capteur PV/T et de leurs variations....	97.
V.4. Résultats théoriques de simulation.	99.
V.4.1. Variation des températures du capteur.	100.
V.4.2. Variation des performances du capteur.	101.
V.4.3. Comparaison et validation.	102.
V.5. Conclusion.	103.
Conclusion Générale.	105.
Références Bibliographiques.	108.

Liste des tableaux

<i>Tableau III.1</i> : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.....	58.
<i>Tableau IV.1</i> : Quelques caractéristiques électriques du module PV 185M.....	78.
<i>Tableau IV.2</i> : Dimensions du capteur PVT et de ses composants.....	79.
<i>Tableau IV.3</i> : Spécifications métrologiques du thermo-anémomètre.....	82.
<i>Tableau V.1</i> : Les valeurs moyennes des données climatiques et de débit d'air maintenu le long des journées d'essais.....	90.

Liste des figures

Figure I.1 : Panneaux PV intégrés en façade à la gare de Freiburg en Allemagne.....	18.
Figure I.2 : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque.	19.
Figure I.3 : Panneaux PV non intégrés au bâti.....	20.
Figure I.4 : Schéma de principe d'un panneau PV connecté au réseau.....	20.
Figure I.5 : Panneaux PV connectés au réseau et montés sur la toiture d'un bâtiment.....	21.
Figure I.6 : Intégration de 900 m ² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école à Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol).....	21.
Figure I.7 : Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan.....	22.
Figure I.8 : De gauche à droite : Capteurs solaires plans vitrés, non vitrés et capteurs solaires à tube sous-vide.	22.
Figure I.9 : Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif.	23.
Figure I.10 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif.	24.
Figure I.11 : Les capteurs plans vitrés.	24.
Figure I.12 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés.	25.
Figure I.13 : Capteurs à tube sous vide.	25.
Figure I.14 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide.	26.
Figure I.15 : Schéma éclaté d'un capteur solaire plan.	27.
Figure I.16 : Différentes formes d'ailettes rajoutées à l'absorbeur pour améliorer son efficacité.	28.
Figure I.17 : Milieux poreux utilisés dans le canal d'un capteur à double passes.	29.
Figure II.1 : Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV.	37.
Figure II.2 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à air.	37.
Figure II.3 : Prototypes I, II, III et IV du capteur solaire PV/T à air.	38.
Figure II.4 : Quelques exemples de modifications du capteur solaire PV/T hybride à air.	40.
Figure II.5 : Schéma d'un double capteur d'air (PV/T) avec des ailerons.	41.
Figure II.6 : Capteurs solaires combinés intégrés à la toiture de Brockshill Environment Center.	42.
Figure II.7 : Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air.	43.
Figure II.8 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à air à ailettes.	44.
Figure II.9 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau.	46.
Figure II.10 : Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau.	47.
Figure II.11 : Le capteur solaire PV/T hybride à eau.	47.
Figure II.12 : Premier et second prototypes construits.	48.
Figure II.13 : Section du capteur solaire hybride à eau étudié.	49.
Figure II.14 : Coupe transversale du composant hybride à eau.	50.
Figure II.15 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor.	51.
Figure II.16 : Capteurs PV/T de concentration.	53.
Figure III.1 : Vue schématique du capteur hybride PV/T à air.	56.
Figure III.2 : Vue des trois couches de panneau photovoltaïque.....	57.
Figure III.3 : Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur : a) à air. b) à eau.	57.
Figure III.4 : Schéma du capteur solaire hybride PVT à air existant à l'UDES.	58.
Figure III.5 : Schéma récapitulatif des énergies produites et absorbées du capteur	

hybride à air.	58.
Figure III.6 : Représentation des températures des différents nœuds.....	59.
Figure III.7 : Vue éclatée du nouveau capteur hybride à air.	60.
Figure III.8 : Bilan énergétique du nouveau capteur hybride PVT à air.	61.
Figure III.9 : Schéma électrique équivalent du capteur hybride photovoltaïque / thermique.	65.
Figure III.10 : Bilan suivant la direction x de l'air à l'intérieur de la conduite.	65.
Figure III.11 : Circuit électrique équivalent d'un module PV.	71.
Figure III.12 : Courbe caractéristique de courant-tension typique (I-V) d'un module photovoltaïque.	72.
Figure IV.1 : Photo du capteur PVT : capteur PV témoin orienté à 30° au sein de l'UDES.	76.
Figure IV.2 : Photo montrant les deux parties du capteur hybride avant montage.	77.
Figure IV.3 : Répartition des ventilos de 12V à la sortie du canal d'air.	77.
Figure IV.4 : Alimentation Multimetrix XA3052 des ventilateurs contrôlant le débit d'air dans la canalisation.	78.
Figure IV.5 : Unité d'acquisition des données : A-vue de face, B-vue de dessus, C-vue d'arrière.	79.
Figure IV.6 : Instruments de mesure de températures : A-thermocouple type K ; B-liaison thermocouple-rallonge ; C-liaison rallonge-cassette-acquisition.	80.
Figure IV.7 : Photo de l'emplacement des sondes des thermocouples à la sortie d'air ventilé.	80.
Figure IV.8 : Interface Fluke Hydra Logger et son tracé rapide des températures pour la journée du 24 mai 2016.	81.
Figure IV.9 : Photo montrant le thermo-anémomètre mesurant la vitesse en m/s et la température en °C.	82.
Figure IV.10 : Camera FLIR T640 utilisée pour voir la distribution de la température au niveau du banc d'essai du capteur hybride PV/T à air.	83.
Figure IV.11 : Face avant ; A-image thermique prise par la caméra IR, B-image réelle du capteur hybride PV/T.	83.
Figure IV.12 : image thermique de la face avant arrière du capteur.....	84.
Figure VI.13 : Installation expérimentale en mode opératoire.	85.
Figure V.1 : Variation de l'éclairement solaire globale au cours du temps le long du 25/05/2016.	87.
Figure V.2 : Evolution des rayonnements, direct, global, diffus et à surface inclinée en fonction du temps.	88.
Figure V.3 : Evolution de la température moyenne en fonction du temps.....	89.
Figure V.4 : Variation de la vitesse du vent le long de la journée du 25/05/2016.	89.
Figure V.5 : Variation du rayonnement solaire le long des journées d'essais.	90.
Figure V.6 : variation des températures des différentes couches du capteur hybride PV/T le long de la journée du 25/05/2016.	91.
Figure V.7 : Variation de Tted en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.	92.
Figure V.8 : Variation de Tv en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.	92.
Figure V.9 : Variation de Talum en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.	93.
Figure V.10 : Variation de Tfe en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.	93.
Figure V.11 : Variation de Tfs en fonction du temps pour les différentes journées	

d'essais.	94.
Figure V.12 : Variation des puissances Pelec, Pth et Pabs du capteur PV/T hybride le long du 25/05/2016.	95.
Figure V.13 : Puissance thermique produite au cours des journées des essais expérimentaux.	96.
Figure V.14 : Variation de la puissance électrique maximale Pmp pendant les journées d'essais expérimentaux.	96.
Figure V.15 : Variation de la puissance absorbée par le module PV durant les journées des essais expérimentaux.	97.
Figure V.16 : Variation des rendements du capteur le long de la journée d'essais du 25/05/2016.	98.
Figure V.17 : Zoom dans la plage du rendement électrique du 0.123 au 0.131 pour montrer la courbe de Relec.	98.
Figure V.18 : Variation du rendement thermique durant les journées d'essais à l'UDES.	99.
Figure V.19 : Variation du Relec durant les jours d'essais à l'UDES.	99.
Figure V.20 : Variation du rendement globale durant les journées d'essais effectuées à l'UDES.	99.
Figure V.21 : Représentation des résultats de simulation de Tfs, Tv et Tted pour le 01/06/2016.	100.
Figure V.22 : Distribution des températures le long de la journée du 01/06/2016.	101.
Figure V.23 : Résultats de simulation des performances thermoélectriques pour le 01/06/2016.	101.
Figure V.24 : Résultats expérimentaux des performances thermoélectriques de la journée du 01/06/2016.	101.
Figure V.25 : Comparaison des résultats de températures simulés et expérimentaux. ...	102.
Figure V.26 : Comparaison des résultats des performances simulés et expérimentaux...	102.

Liste des symboles

a : Facteur d'idéalité modifié ;

A : Surface du capteur, (m^2) ;

C : Coefficient de la bande interdite température moyenne, (K^{-1}) ;

C_p : Chaleur spécifique de l'air, ($J / kg K$) ;

dx : Longueur élémentaire dans le sens de l'écoulement, (m) ;

E_c : Taux d'énergie électrique disponible par unité de surface, (W / m^2) ;

E_g : Energie de la bande interdite de semi-conducteur, (eV) ;

FF : Facteur de remplissage du module PV ;

F' : Facteur d'efficacité du collecteur ;

F'' : Facteur de flux du capteur ;

F_R : Facteur de dissipation de la chaleur du capteur ;

G : Rayonnement solaire incident, (W / m^2) ;

h : Coefficient d'échange convectif, ($W / m^2.K$) ;

h_0 : Coefficient d'échange convectif relatif au vent, ($W / m^2.K$) ;

h_r : Coefficient d'échange radiatif, ($W / m^2. K$) ;

I : Courant du circuit, (A) ;

K : Constante de Boltzmann, (J / K) ;

k : Conductivité thermique ($W / m.K$)

L : Longueur du capteur, (m) ;

\dot{m} : Débit massique (kg / s),

P : Puissance électrique, (W) ;

q_{th} : Densité de flux thermique absorbée par unité de surface, (W / m^2) ;

q_u : Densité de flux thermique utile par unité de surface, (W / m^2) ;

Q_u : Flux de chaleur utile, (W) ;

R : Résistance électrique (ohm) ;

Rh : Humidité relative (en%)

S : Densité de flux totale absorbée par unité de surface (W / m^2)

t : Temps, (s) ;

T : Température, (K ou °C) ;

\bar{T} : Température moyenne sur la longueur du capteur, (K ou °C) ;

U_b : Coefficient d'échange global correspondant aux pertes de retour du côté intérieur du matériau d'isolation à l'ambient ($W/m^2.K$) ;

U_L : Coefficient d'échange global correspondant aux pertes globales de chaleur de la cellule solaire ambiante ($W/m^2.K$) ;

U_t : Coefficient d'échange global supérieur correspondant aux pertes globales de la cellule solaire à couvercle en verre ambient à travers ($W/m^2.K$) ;

U_T : Coefficient d'échange global correspondant à la conduction à travers la cellule solaire et le Tedlar ($W/m^2.K$)

V : Tension de circuit (V), vitesse (m / s) ;

w : Largeur du collecteur, (m) ;

x : Dimension dans la direction d'écoulement d'air depuis l'entrée, (m) ;

PV : Photovoltaïque ;

PV / T : Photovoltaïque / Thermique

MPPT : point de puissance maximale traqueur ;

Lettres grecques :

α : Mouillabilité, coefficient de température actuelle, (A / K) ;

β : Coefficient de température de la tension, (V / K) ;

β_c : Facteur d'emballage de cellules solaires ;

δ : Profondeur de conduit, (m) ;

Δ : Différence ;

γ : Coefficient d'efficacité maximale du point de puissance de la température, (K^{-1}) ;

ε : Emissivité ;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: Emissivités des surfaces intérieures du conduit ;

η : Efficacité ;

σ : Constant de Stefan-Boltzmann, ($W / m^2.K^4$) ;

τ : Transmittivité ;

$(\tau\alpha)_{\text{eff}}$: Produit de l'absorbivité et de la transmittivité efficace ;

Indices :

a : Air ;

amb : Ambiant ;

ted : Surface arrière du module PV ;

c : Cellule solaire ;

e : Electrique ;

e, th : Equivalent thermique ;

f : Fluide;

v : Verre ;

i : Matériau d'isolation, face interne de matériau d'isolation ;

inf : Côté arrière du matériau d'isolation ;

mp : Point de puissance maximale ;

oc : Circuit ouvert ;

r : Radiatif ;

ref : Conditions de référence ;

s : Série ;

sc : Court-circuit sc;

sh : Shunter;

th : Thermique;

T : Tedlar;

u : Utile.

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis la préhistoire, l'énergie solaire a toujours été utilisée par l'homme, pour le séchage de sa nourriture, pour l'évaporation de l'eau de mer pour la récupération du sel et bien pour d'autres usages. Depuis, le soleil a été identifié comme étant une source d'énergie inépuisable et une puissance motrice derrière chaque phénomène naturel, c'est pourquoi plusieurs tribus préhistoriques ont vénéré le soleil pour ses pouvoirs.

L'idée d'utiliser les collecteurs à énergie solaire a germé depuis longtemps : en 212 avant Jésus Christ, Archimède a conçu une méthode pour brûler la flotte romaine à l'aide de miroirs métalliques. Au 18^{ème} siècle, des fours solaires capables de fondre le fer, le cuivre et d'autres métaux ont été construits. Antoine Lavoisier a conçu un four pouvant atteindre une température de 1750 °C [1].

Au 19^{ème} siècle, des tentatives ont été faites afin de convertir l'énergie solaire en d'autres formes d'énergie basées sur la génération de la vapeur d'eau à basse pression pour actionner des machines à vapeur. En 1875, Mouchot a fait une avance notable dans la conception d'un capteur solaire en mettant au point un réflecteur sous forme de cône court. En 1901, A.G. Eneas a installé un collecteur de focalisation de diamètre 10 m qui a permis d'actionner un appareillage de pompage d'eau d'une ferme de Californie [2].

Durant les 50 dernières années, plusieurs constructions ont été conçues en utilisant les collecteurs solaires afin de chauffer le fluide de fonctionnement qui actionne l'équipement mécanique. La fabrication des chauffe-eau solaires a commencé à partir des années 50. Leur industrie a augmenté très rapidement dans beaucoup des pays du monde. Les besoins en eau potable a été toujours un souci pour l'homme, parmi les premières utilisations de l'énergie solaire la production d'eau potable à partir du dessalement d'eau de mer. La distillation solaire a été mise en pratique pendant longtemps, l'utilisation des concentrateurs solaires dans la distillation solaire a été rapportée dans la littérature, Pasteur en 1928 a employé un concentrateur pour focaliser les rayons solaires sur une chaudière de cuivre contenant de l'eau [3].

L'énergie solaire est l'énergie que dégage le soleil sous forme de rayonnement, direct ou diffus. Sur terre, l'énergie solaire est à l'origine du cycle de l'eau et du vent. Le règne végétal dont dépend le règne animal, l'utilise également en la transformant en énergie chimique par la photosynthèse. Grâce aux diverses transformations, elle peut être convertie en une autre forme d'énergie utile pour l'activité humaine, notamment en chaleur, en électricité ou en biomasse. Par extension, l'expression « énergie solaire » est souvent employée pour désigner l'électricité ou l'énergie thermique solaire obtenue à partir du rayonnement solaire [4].

Pour le cas de l'électricité solaire, il est à souligner que la plus grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules solaires n'est pas convertie en électricité et accroît par conséquent leur température, entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires PV/T hybrides sont des systèmes utilisant des panneaux PV comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les panneaux PV à l'aide d'un fluide caloporteur, ces capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. Ils associent ainsi un capteur solaire photovoltaïque intégré ou non au bâti et un capteur solaire thermique [5].

Le travail présenté dans ce mémoire est relatif à une étude thermomécanique d'un capteur solaire hybride à air de type PV/ therm sous les aspects, numérique et expérimental. Le mémoire est réparti en quatre chapitres principaux : le premier correspond à des généralités sur les capteurs solaires hybrides PVT. Le second chapitre traite de l'état de l'art sur le sujet, objet de ce mémoire. Le troisième chapitre est relatif à la modélisation mathématique d'un capteur solaire hybride PV/T à air. Le quatrième chapitre concerne un descriptif de l'installation expérimentale proprement dite. Le cinquième et dernier chapitre est relatif aux résultats obtenus et à des discussions.

Le mémoire se termine par une conclusion générale mettant en relief la synthèse des résultats obtenus et les perspectives, éventuelles, à envisager pour d'autres études ultérieures.

Chapitre I

Généralités sur les capteurs solaires hybrides PVT

Généralités sur les capteurs solaires hybrides PVT

Les capteurs solaires hybrides sont composés de capteurs photovoltaïques et de capteurs thermiques. Dans le cadre de ce chapitre, relatif aux généralités, nous allons définir en détails chacun de ces capteurs.

I.1. Capteurs solaires photovoltaïques

I. 1.1.Panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires sont constitués de l'assemblage en série et en parallèle de plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont composés de la connexion en série d'un certain nombre de cellules solaires. La figure I.1 montre des panneaux PV intégrés en façade à la gare de Freiburg en Allemagne.



Gare de Freiburg – Allemagne

Figure I.1 : Panneaux PV intégrés en façade à la gare de Freiburg en Allemagne [11].

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est la plupart du temps, le silicium). En heurtant la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (jonction p-n). Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique continu (CC), I , qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro-soudés en surface [1].

Deux principaux types de cellules au silicium se distinguent : les cellules cristallines (c-Si) et les cellules amorphes (a-Si). Les cellules en silicium cristallin sont les plus

commercialisées et comprennent les cellules monocristallines offrant un bon rendement électrique situé entre 10 et 17 % et les cellules poly-cristallines ayant un rendement électrique compris entre 11 et 15 %. Les cellules monocristallines offrent un meilleur rendement électrique mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse. En effet, l'obtention d'un cristal pur nécessite une grande quantité d'énergie. Les cellules poly cristallines nécessitent un procédé de fabrication consommant moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible malgré leur rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines, d'où leur utilisation dans les composants solaires hybrides bi-fluides [11]. La figure I.2 montre le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque

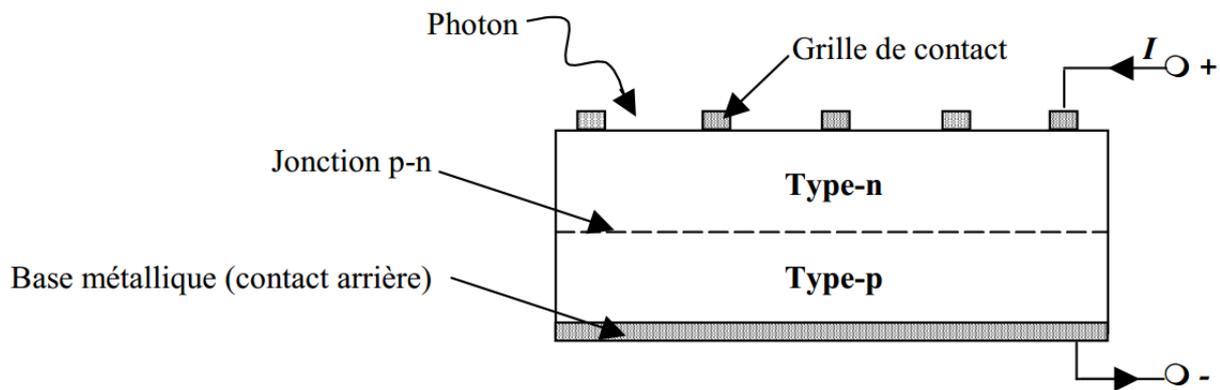


Figure I.2 : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque [2].

Quant aux cellules PV en silicium amorphe, elles ont notamment été utilisées pour le développement de capteurs solaires PV/T à eau (dont celui développé dans le cadre du PRI 6.2 [2]) en raison de la faible sensibilité de leur rendement électrique à leur température de fonctionnement. Cependant, le rendement électrique de ces technologies amorphes reste faible et est compris entre 4 et 7 %, bien qu'elles soient moins coûteuses que les précédentes. Elles sont adaptées aux installations solaires PV/T hybrides à grande superficie car la faiblesse du rendement électrique est compensée par un bon rendement thermique [3].

En dehors des cellules PV à base de silicium, il existe des cellules en Cadmium Telluride (Cds-CdTe), en Diséléniure Cuivre Indium (CIS) ou en matériaux organiques (cellules amorphes à hydrogène) dont le rendement est faible, malgré leur coût plus bas par rapport aux cellules en silicium cristallin. Des cellules solaires en Arséniure de Gallium (GaAs) généralement adaptées à des applications spatiales, sont de même commercialisées. Mais, elles peuvent être employées pour des applications terrestres à grande échelle. Malgré leur coût très élevé, elles présentent un haut rendement électrique (supérieur à 30 %). Cependant, elles contiennent un matériau potentiellement toxique, l'arséniure. Enfin, en 2001, environ 80 % des cellules solaires produites dans le monde sont en silicium cristallin. 13.23 % des cellules sont en silicium amorphe, 0.39 % en Cadmium et 0.18 % en Diséléniure [4].

Les panneaux PV peuvent être de plus, inclus dans un système photovoltaïque permettant la production et le stockage de l'énergie électrique si nécessaire [5].

La figure I.3 montre des panneaux PV non intégrés au bâti.



Figure I.3 : Panneaux PV non intégrés au bâti.

I. 1. 2. Système photovoltaïque

Ce type de système peut comprendre en dehors du panneau PV, une batterie d'accumulateur permettant le stockage de l'énergie électrique produite, un système de régulation de charge permettant la gestion de la batterie, et éventuellement un onduleur permettant la conversion du courant continu en alternatif. Le système PV peut être connecté directement au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur (Cf. Figure I.4) tel le cas du capteur solaire PV/T à air [11].

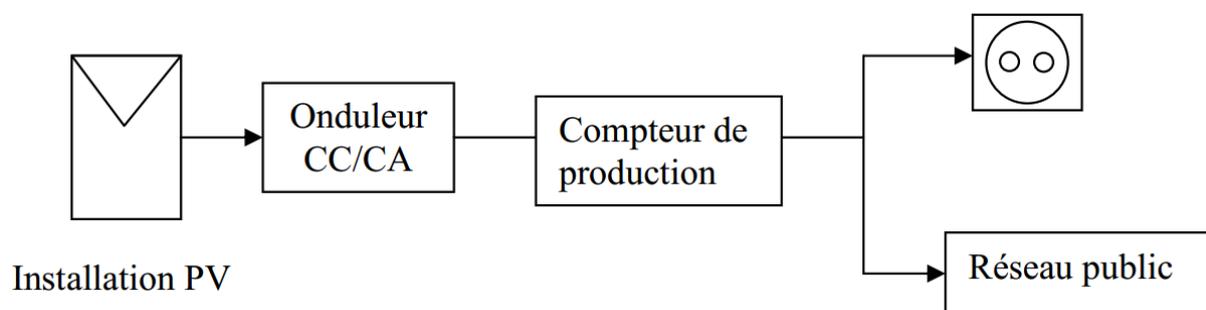


Figure I.4 : Schéma de principe d'un panneau PV connecté au réseau.

La Figure I.5 présente un exemple de panneaux PV connectés au réseau et montés en toiture. De plus, la Figure I.6 présente un système PV composé de 12 branches de 5 modules PV nommés Sarnasol, et intégré à la toiture de 900 m² d'une école professionnelle de Lugano, au sud de la Suisse. Ces modules PV Sarnasol sont constitués de cellules PV amorphes UNISOLAR recouvertes d'une membrane flexible en polyoléfine. Ce système PV fournit une puissance électrique totale de 15.36 kWc, soit une production annuelle de 16423 kWh, soit 1069 kWh / kWc [6].



Figure I.5 : Panneaux PV connectés au réseau et montés sur la toiture d'un bâtiment.



Figure I.6 : Intégration de 900 m² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école à Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol) [6].

Notons enfin qu'un système photovoltaïque indépendant du réseau électrique est dit autonome. Il est dans ce cas connecté directement à des récepteurs fonctionnant en courant continu ou alternatif.

Un grand nombre de prototypes de capteurs solaires hybrides est réalisé par combinaison d'un champ PV à un capteur solaire thermique préexistant. Le paragraphe suivant donne une synthèse des divers types de capteurs solaires décrits dans la littérature et se trouvant sur le marché.

I.2. Capteurs solaires thermiques

Les capteurs solaires thermiques permettent la production d'énergie thermique à partir du rayonnement solaire. Ils sont composés d'un corps opaque qui absorbe le rayonnement solaire en s'échauffant, d'un système de refroidissement à l'aide d'un fluide caloporteur (air ou liquide), d'un isolant thermique latéralement et en sous-face, le plus souvent d'une couverture transparente (en face avant et exposée au rayonnement) qui assure l'effet de serre, et

éventuellement d'un coffrage étanche à l'eau et d'un système de support mécanique de l'ensemble [7]. L'énergie solaire récupérée par le capteur solaire et transformée en énergie thermique est cédée au fluide caloporteur (air ou eau) (Cf. Figure I.7).

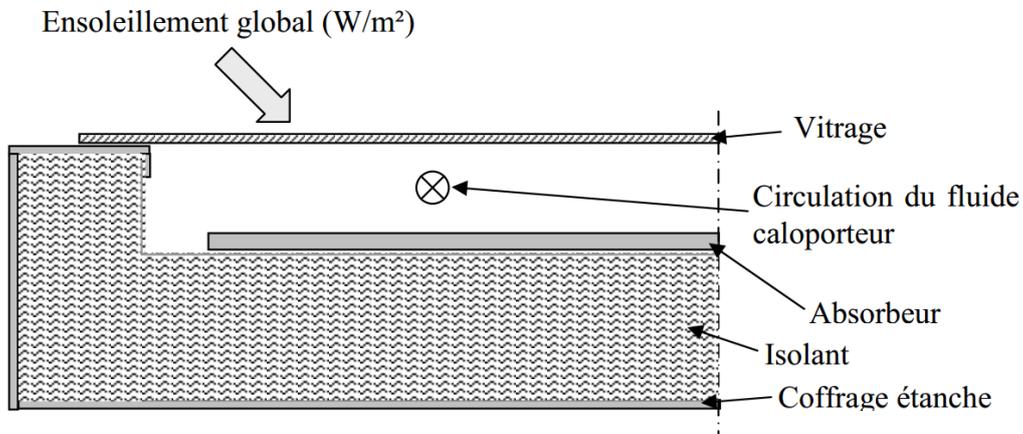


Figure I.7 : Schéma de principe d'un capteur solaire thermique plan.

L'énergie thermique peut être transférée vers un réservoir de stockage d'énergie ou utilisée directement. Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée du fluide. Les principaux types de capteurs solaires indépendamment du fluide caloporteur, sont les capteurs solaires à concentration, et les capteurs solaires thermiques plans [11]. Ces capteurs solaires plans se distinguent par leur fonction, leur forme géométrique ou leur température d'application (Cf. Figure I.8).



Figure I.8 : De gauche à droite : Capteurs solaires plans vitrés [8], non vitrés [9] et capteurs solaires à tube sous-vide.

Il existe des capteurs solaires plans vitrés convenant mieux à des applications à température modérée (comprises entre 30 et 70 °C) tel que le chauffage de l'eau sanitaire, des piscines d'intérieur et le chauffage des bâtiments. Les capteurs solaires plans sans vitrage conviennent à des applications à basse température (inférieure à 30 °C), tel que le chauffage des piscines d'extérieur et d'intérieur. Quant aux capteurs solaires sous vide (ou caloducs), ils sont parmi les types de capteurs solaires les plus efficaces mais aussi les plus coûteux. Ces capteurs solaires conviennent mieux à des applications à hautes températures pour lesquelles la température demandée atteint 50 à 95 °C (couplage au froid solaire). Ils sont

particulièrement employés pour le chauffage de l'eau des résidences, des bâtiments commerciaux, ainsi que celui des piscines d'intérieur.

I.2.1. Composantes d'un système de conversion thermique

Tout système de conversion de l'énergie solaire doit comprendre les éléments suivants :

- une surface de captation du rayonnement solaire ;
- un circuit caloporteur qui assure le transfert de l'énergie extraite du capteur à l'élément d'accumulation (stockage des calories), les fluides utilisés comme fluide caloporteur sont généralement : l'eau et l'air ;
- un stockage thermique ;
- un réseau de distribution.

I.2.2. Définition et principe d'un capteur solaire plan

Le capteur solaire plan est tout système exposé au rayonnement solaire afin de le capter et de le transformer en énergie thermique. Ce système de captage a pour base l'effet de serre où le rayonnement est capté dans le domaine du visible et du proche infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 0.3 et 3 μm), il traverse la vitre et il est piégé à l'intérieur où il est capté par la surface absorbante. L'absorbant émet du rayonnement thermique dans un domaine de l'infrarouge éloigné du visible (entre 4 et 30 μm). Ce rayonnement est totalement arrêté par la paroi du verre qui s'échauffe et rayonne par partie vers la surface absorbante et par partie vers l'extérieur. Le fluide qui circule sous cette paroi récupère par convection une partie de cette énergie absorbée et subit une élévation de température à la traversée du capteur.

I.2.3. Types de capteurs solaires thermiques

a)- Capteurs plans non vitrés à revêtement sélectif

Ce sont des capteurs simples adaptés aux basses températures et peu sensibles à l'angle d'incidence du rayonnement, ils peuvent être utilisés pour le chauffage des piscines et le chauffage de l'eau chaude sanitaire Cf. figure I.9). Leur principe de fonctionnement est présenté sur la figure (I.10).



Figure I.9 : Capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [10].

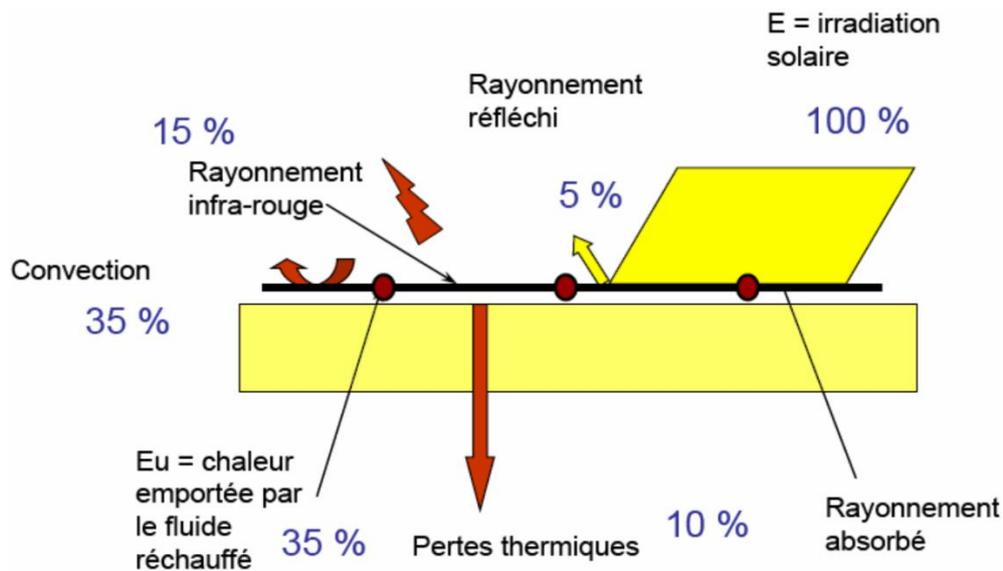


Figure I.10 : Principe de fonctionnement des capteurs solaires non vitrés à revêtement sélectif [13].

b)- Capteurs plans vitrés

Ce type de capteurs (Cf. figure I.11) peut être intégré dans l'architecture des bâtiments, ses températures de fonctionnement correspondent aux températures de production de chauffage et d'eau chaude sanitaire lorsque les besoins sont plus importants (hôtellerie par exemple). La figure(I.12)montre son principe de fonctionnement.

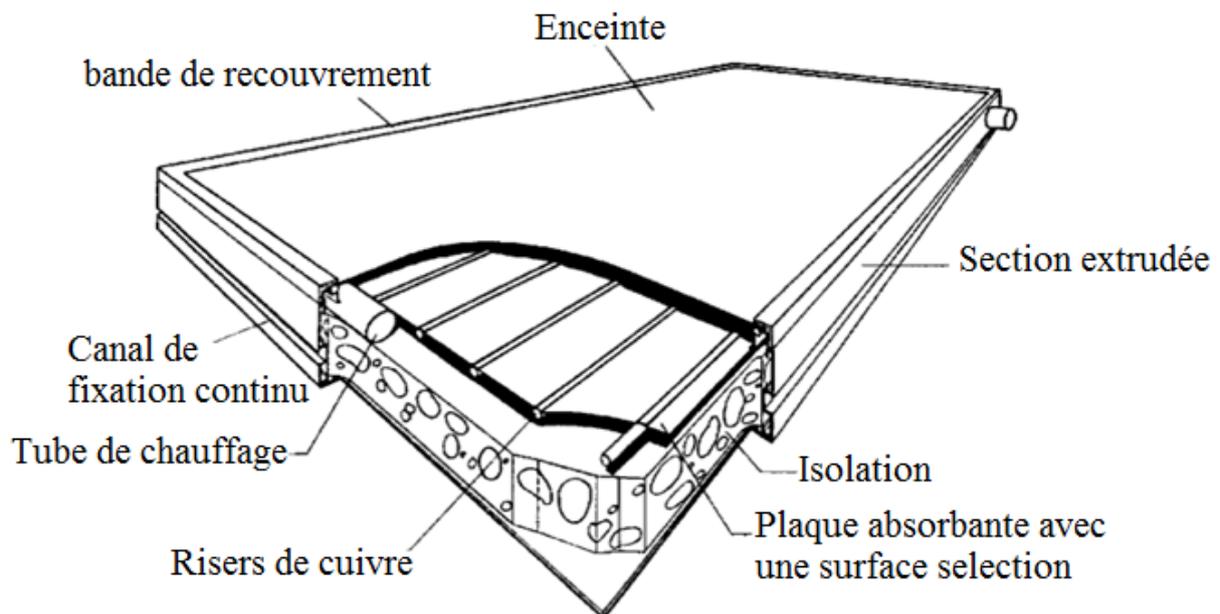


Figure I.11 : Les capteurs plans vitrés [14].

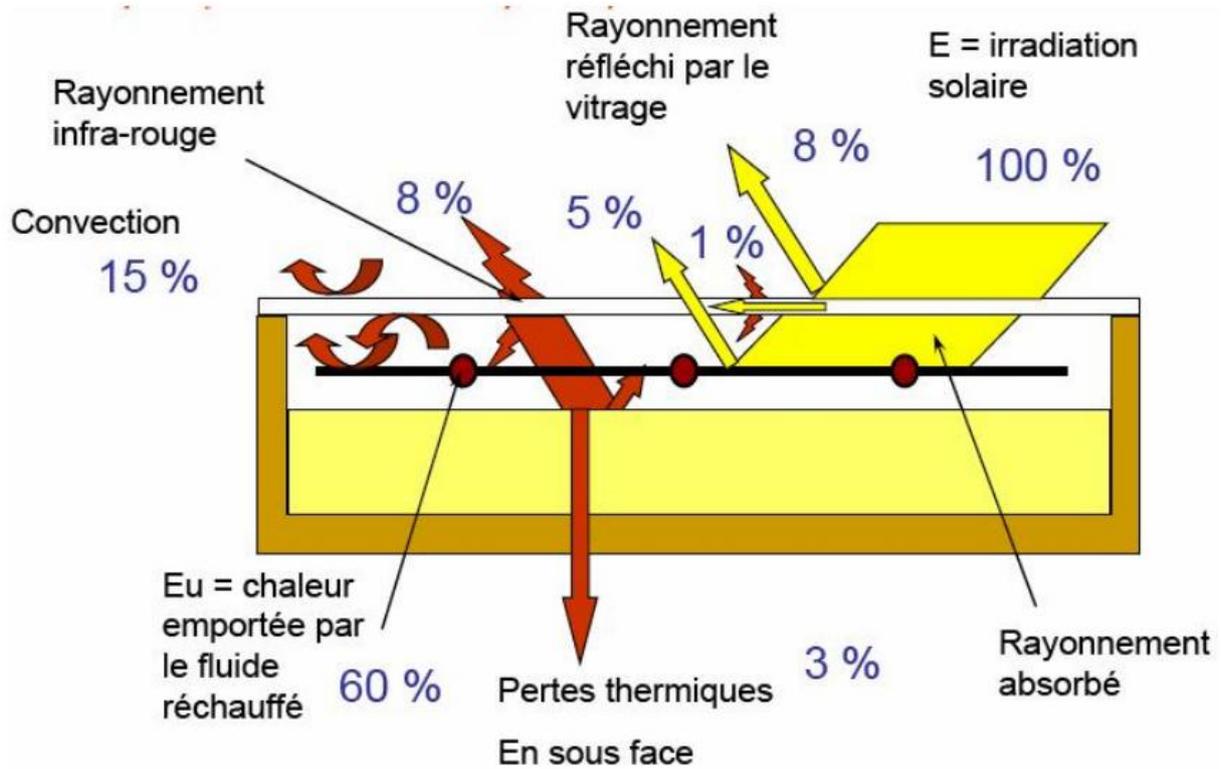


Figure I.12 : Principe de fonctionnement des capteurs plans vitrés [10].

c)- Capteurs à tubes sous vide

Le capteur à tubes sous vide présenté dans la figure (I.13) et son principe de fonctionnement dans la figure (I.14), permet de satisfaire aux applications nécessitant des niveaux de températures plus importants. Il est rencontré dans des applications industrielles, mais aussi dans le chauffage et la production d'eau chaude sanitaire et dans l'habitat individuel et collectif.

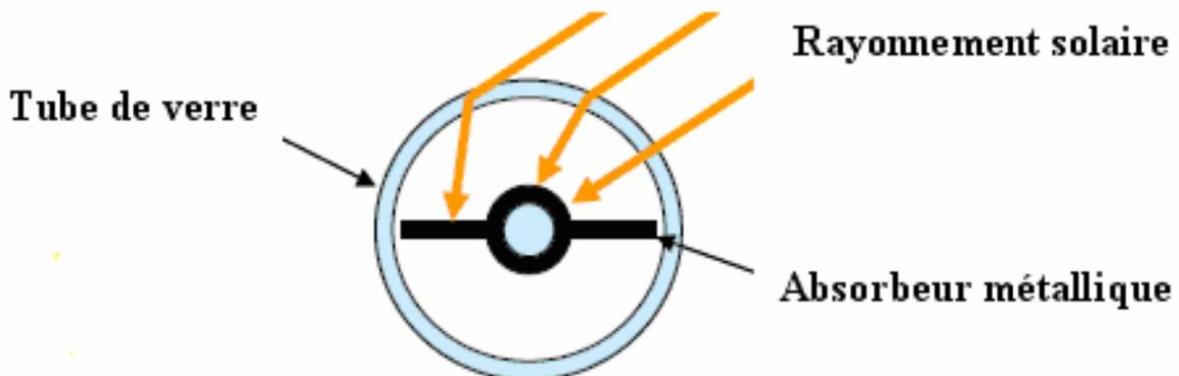


Figure I.13 : Capteurs à tube sous vide [10].

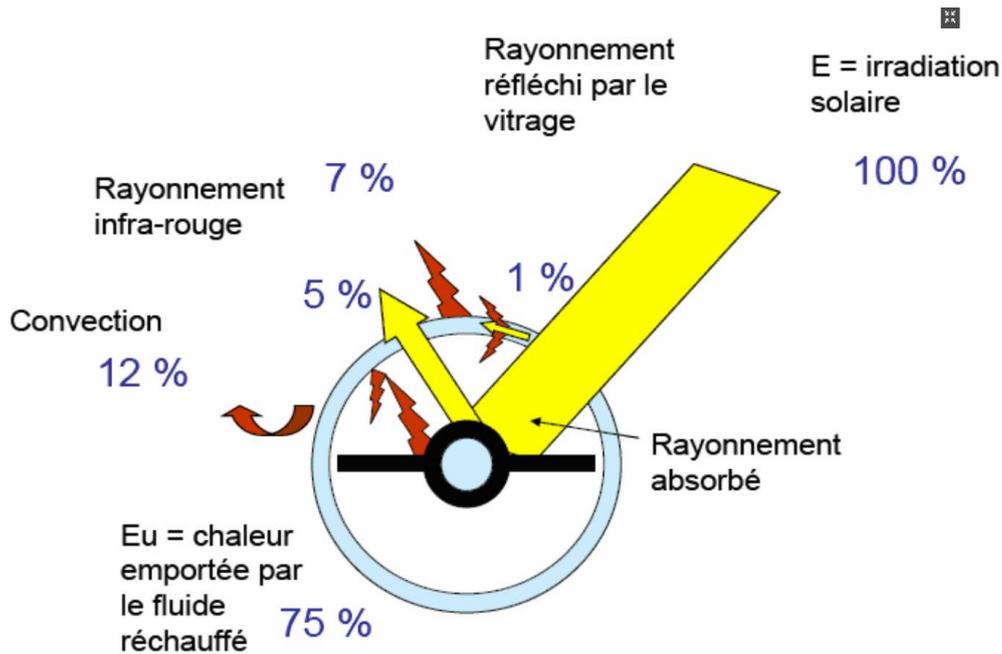


Figure I.14 : Principe de fonctionnement des capteurs à tubes sous vide [10].

I.2.4. Constituants d'un capteur solaire plan

Le capteur plan est une boîte constituée de trois parties principales : une partie avant, la partie absorbante et la partie arrière.

i. Partie avant :

C'est la couverture transparente constituée du verre ou du plastique et qui peut être simple, doublée ou triplée. Cette couverture doit assurer trois fonctions essentielles : recevoir le maximum du rayonnement incident sans réflexion ni diffusion importante, transmettre la plus part du rayonnement reçu et s'opposer aux déperditions thermiques par convection et rayonnement.

ii. Partie absorbante :

C'est la partie au niveau de laquelle s'effectue la conversion thermique. Elle doit assurer les fonctions suivantes : absorber la plus grande partie du rayonnement incident, transmettre la chaleur produite par cette absorption vers le fluide caloporteur et minimiser les échanges thermiques vers l'extérieur pour augmenter son efficacité.

iii. Partie arrière :

Elle est généralement constituée d'une couche isolante, qui diminue les pertes par convection et ralentit ainsi le refroidissement de la face opposée au rayonnement solaire. Le choix du matériau à utiliser dépend de : sa résistance aux températures de fonctionnement, la permanence de ses caractéristiques dans le temps (conductivité thermique), la résistance aux chocs, à l'humidité, au feu, à l'eau de pluie...etc. La figure I.15 montre un schéma éclaté d'un capteur solaire plan.

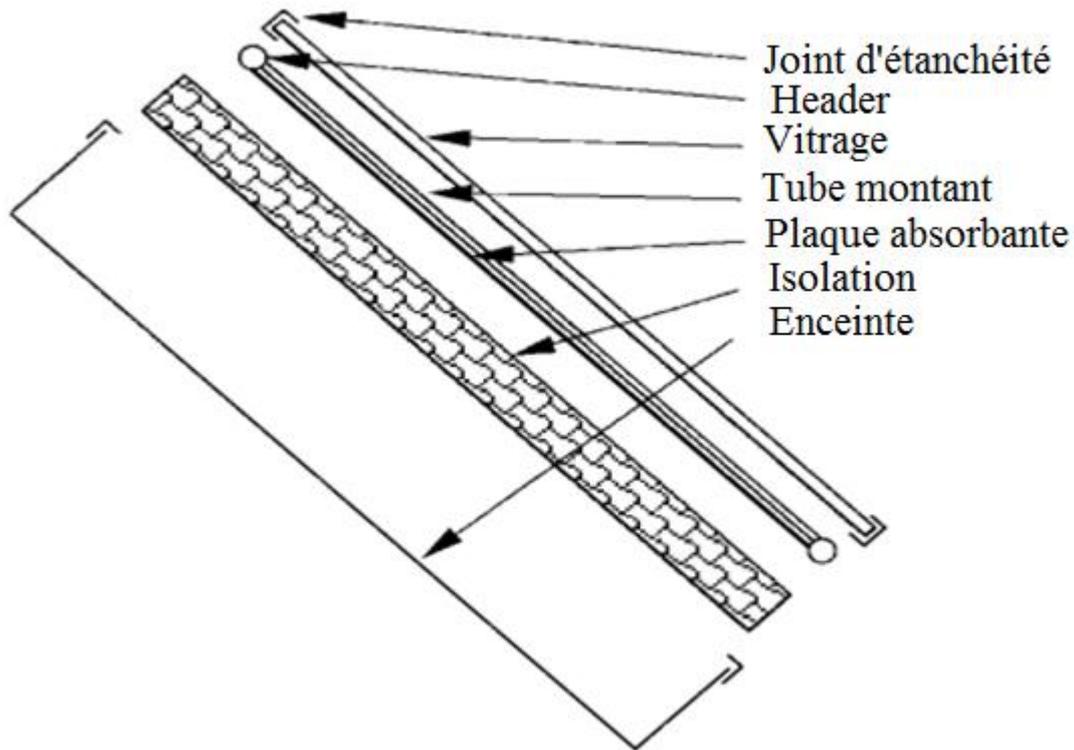


Figure I.15 : Schéma éclaté d'un capteur solaire plan [14].

I.2.5. Paramètres influant sur le fonctionnement d'un capteur solaire

L'efficacité thermique du capteur solaire dépend fortement du matériel, de la *forme*, des *dimensions*, de la *disposition* du capteur et des *conditions environnementales* [10]. Tous ces facteurs peuvent être classés en deux catégories principales :

A. Paramètres internes

i. Le vitrage :

La plus part des capteurs solaires couverts utilisés sont à couverture simple, à double ou triple. S. Youcef Ali [31] a montré dans une étude expérimentale que la couverture triple donne des performances plus importantes que celle à double vitre grâce à la minimisation des pertes vers l'extérieur.

Turhan. Koyuncu [32] a étudié expérimentalement l'influence du nombre de couvertures et il a trouvé que ce facteur influe fortement sur l'efficacité du capteur. Le verre est tout à fait intéressant comme couverture pour les dispositifs solaires, puisque il absorbe presque tout le rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur ayant pour résultats une amélioration de l'efficacité thermique du capteur. Néanmoins, son utilisation présente certains inconvénients : coût élevé et fragilité pendant le transport et en service ; c'est la raison pour laquelle, que pendant plusieurs années, des couvertures en plastique transparent ont été appliquées largement pour construire des capteurs solaires de coût modéré et de qualité assez rigide.

Dans ce contexte, Donation Njomo [33] a noté après une étude numérique, qu'un capteur avec double couverture de matière différente (ici la couverture extérieure est en plexi-glace et

celle intérieure est en verre) a des performances meilleures qu'un capteur à deux vitrages de même matière.

ii. L'absorbeur

L'augmentation de la surface du capteur accroît le taux du rayonnement solaire intercepté et la surface de contact entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (augmentation de la surface d'échange), mais aussi elle augmente le coefficient des pertes thermiques entre la couverture et l'extérieur (Ho-Ming Yeh et Tong-Tshien Lin [38]). L'allongement du capteur solaire influe fortement sur son efficacité (Suleyman Karsali. [27] M. Augustus Leonet S. Kumer [20]).

Ainsi, des chercheurs ont proposé d'augmenter le transfert thermique entre l'absorbeur et le fluide caloporteur (sans toucher les dimensions du capteur) par l'ajout des obstacles (ailettes) (Figure (I.9)) jointes à la face inférieure de l'absorbeur (N. Moumami et al. [30], A. Abene et al. [15], S. Youcef-Ali [31], A. Ucar et M. Inalli [39], Hikmet Esen [40], Ho-Ming Yeh et Chii-Dong Ho [38]), selon ces auteurs, les obstacles peuvent augmenter la surface d'échange, réduire les zones mortes et créer la turbulence. A. Abene et al. [15], ont montré que la forme, les dimensions, l'orientation et la disposition de ces obstacles influent considérablement sur l'efficacité du capteur (comme souligné par K. R. Ahrwal et B. K Gandhi [85]). La figure I. 16 montre différentes formes d'ailettes rajoutées à l'absorbeur pour améliorer son efficacité.



Figure I.16 : Différentes formes d'ailettes rajoutées à l'absorbeur pour améliorer son efficacité [15].

iii. La forme et le diamètre des conduites

Un autre facteur influe aussi sur l'efficacité du capteur : la tuyauterie. Elle est généralement soudée à la partie inférieure de l'absorbeur et parfois elle fait partie de l'absorbeur. Sa forme diffère d'un capteur à un autre. Parmi ces différentes formes, la forme sinusoïdale est la plus efficace, puisqu'elle offre la plus grande surface d'échange et réduit les zones mortes. Comme l'a montré par Marwa. M. Hassanet Yvan Beliveau [16], le diamètre des tubes le plus efficace est de l'ordre de 6.35 mm.

Pour les réchauffeurs solaires à doubles passes et dans le but d'améliorer leurs efficacités, K.Sopian et al [10] ont proposé d'ajouter un milieu poreux au canal inférieur (Cf. figure I. 17), ce qui augmente le secteur de transfert thermique d'où l'élévation de la température de sortie et par conséquent un rendement de 60-70%, c'est à dire 20-70% plus élevé qu'un

capteur sans milieu poreux. Paisarus Naphon [17] a montré que les milieux poreux donnent une efficacité 25.9% plus élevée et que leur conductivité thermique a un effet significatif sur le rendement des capteurs solaires à air.

K. Sopian et al. [10] ont souligné que ces milieux peuvent conduire à un rendement plus élevé que celui d'un capteur simple, et peuvent augmenter son efficacité jusqu' à environ 60 à 70%.

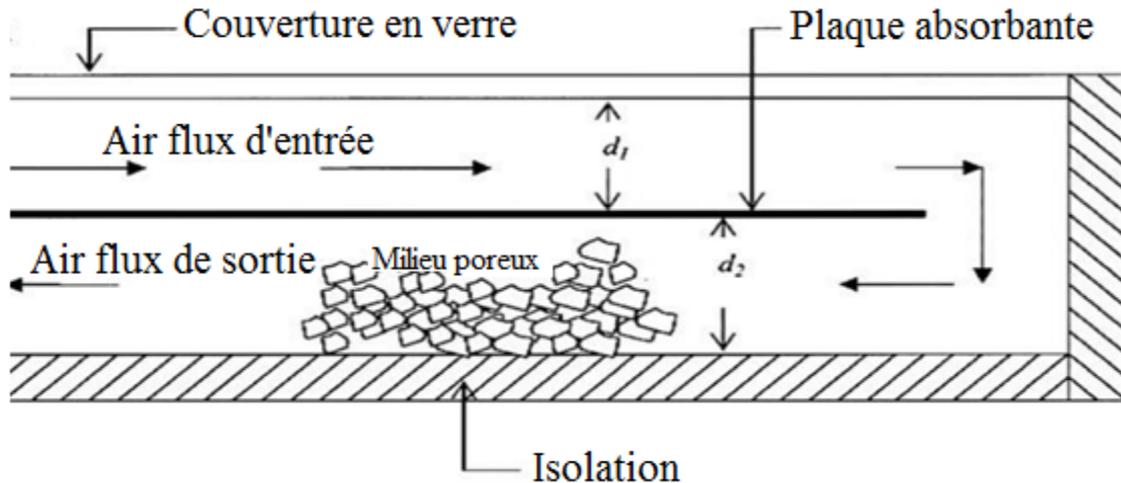


Figure I.17 : Milieux poreux utilisés dans le canal d'un capteur à double passes [10].

iv. Circulation du fluide caloporteur

Selon M. N. Bargach et al. [18], C. D. Ho et al. [19], l'augmentation de la circulation du fluide caloporteur augmente la puissance du capteur solaire. M. Augustus Leon et S. Kumar [20] ont montré que le débit d'air a l'effet le plus fort sur l'efficacité d'échanges thermiques et par conséquent sur le rendement.

Les travaux expérimentaux et numériques menés par Marwa. M. Hassan et Yvan Beliveau [16], ont montré que la diminution du débit massique augmente la température du fluide et décroît les gains globaux de la chaleur, au-dessus d'un débit de 0.06 m³/h, la température du fluide n'augmente plus. Le passage de l'air a une influence considérable sur l'efficacité du capteur solaire.

Plusieurs travaux ont été élaborés dans le but de vérifier la faisabilité d'augmenter le nombre de passage d'air d'une seule passe à une double passe et même à multi- passes (K. Sopian et al. [10], La réutilisation (recyclage) de l'air accroît la vitesse du fluide ce qui peut améliorer l'efficacité du capteur à plus de 80% comme a été souligné par H. M. Yeh et C. D. Ho [19] ont montré théoriquement et expérimentalement que l'élévation du débit de l'air recyclé augmente l'efficacité, et la dissipation d'énergie se produit aussi.

v. L'isolation

Les pertes de chaleur du capteur sont de la face de la couverture, puisque les cotées latérales et le dos peuvent être isolés, alors que la face avant doit être exposée au rayonnement solaire et à la température ambiante. C'est pour cela que l'air est utilisé fréquemment comme une isolation contre les pertes de chaleur conductives et convectives de l'absorbeur vers le

vitrage. Selon N. T. Ahmed [21], on peut réduire ces pertes en utilisant de l'isolation transparente (un film de bulles d'air). Fayza Benyelles et al. [22] ont montré qu'on peut utiliser l'aérogel (matériau poreux de faible conductivité thermique) comme un superbe isolant de la face avant du capteur solaire plan.

vi. L'orientation et l'inclinaison du capteur

L'influence de l'orientation d'un capteur et de son inclinaison avec l'horizontal est due au fait que ces deux dernières changent le rayonnement solaire atteignant la surface du capteur. La meilleure orientation du capteur solaire est celle directement au sud (Huseyin Gunerhan et Arif Hepbasli [23]).

L'angle optimum d'inclinaison est appliqué à une variété de systèmes, tels que, les capteurs plans ou paraboliques, les panneaux photovoltaïques, maisons solaires et serres installées dans une position fixe. Cet angle joue un rôle important en augmentant la collection d'énergie par les capteurs solaires. O. Turgut et N. Onur [24] ont pu déduire de leurs études expérimentale et numérique tridimensionnelle que le nombre de Nusselt sur la surface des capteurs dépend faiblement de l'angle d'attaque, ce dernier diminue lorsque le taux de transfert thermique augmente.

B. Paramètres externes

i. Obstacles

Il s'agit avant tout des constructions et de la végétation, leur position dans la trajectoire solaire peut créer sur les surfaces captatrices une ombre nuisible au bon fonctionnement de l'installation (Charles [25]).

ii. Rayonnement solaire

Selon F. Moukhtari et D. Semmar [26], l'efficacité du capteur solaire est considérablement affectée par le rayonnement solaire, et l'élévation de la température varie presque linéairement avec le rayonnement solaire incident (Suleyman Karsil [27]).

iii. Température

La température de l'environnement influe fortement sur le fonctionnement du capteur solaire. Runsheng Tang et al. [28] ont montré, dans une étude expérimentale, que les capteurs peuvent être endommagés par le gel pendant la nuit.

iv. Vitesse du vent

La vitesse du vent apparaît dans le coefficient de convection entre la vitre et l'extérieur qui agit sur la valeur des pertes, c'est pourquoi la connaissance des données météorologiques est importante. Lorsque le coefficient de transfert thermique dû au vent est à son maximum (pour une longueur de 1m d'absorbeur noir installé horizontalement) la réduction maximum de l'efficacité s'avère au plus bas niveau comme souligné par Rajendra Karwa et al. [29]).

I.2.6. Pertes thermiques dans un capteur solaire

Les pertes thermiques au niveau du capteur solaire sont dues à la convection, la conduction et le rayonnement.

i. **Pertes par convection**

Ce mode de transfert intervient généralement entre la couverture et le milieu extérieur, l'absorbeur et la lame d'air, la lame d'air et la couverture. Selon A. Benkhelifa [34], le coefficient de pertes thermiques augmente avec l'augmentation de l'émissivité de l'absorbeur, sa température, et le coefficient d'échange convectif avec l'air ambiant, alors qu'il diminue avec l'accroissement de la distance entre l'absorbeur et la vitre. Les obstacles soudés à l'absorbeur peuvent réduire les pertes par l'avant en diminuant la température de l'absorbeur, comme a été montrée par S. Youcef-Ali [31]. Ali M. El-Nashar [32] a trouvé dans son travail expérimental que l'effet de la perte au niveau de la tuyauterie sur l'efficacité du capteur est faible dans les périodes de midi et grande dans les périodes du matin et après-midi.

ii. **Pertes par conduction**

Les pertes par conduction peuvent avoir lieu entre l'absorbeur et le vitrage lorsque ces derniers se trouvent sur une très faible distance, comme elles existent au niveau de l'isolation de la partie arrière et latérale du capteur.

iii. **Pertes par rayonnement**

Les matériaux utilisés comme couvertures laissent passer le rayonnement solaire incident mais sont opaques au rayonnement infrarouge réémis par l'absorbeur porté à la température de 35 à 100°C (effet de serre), la face interne de la couverture absorbe ce rayonnement infrarouge, puis elle subit une augmentation de température et rayonne à son tour moitié vers l'extérieur et la moitié vers l'absorbeur. Les pertes par rayonnement sont ainsi diminuées de moitié. Il serait possible de réduire encore ces pertes en mettant plusieurs couvertures.

I.2.6.1. Coefficient de transfert de chaleur entre l'absorbeur et le vitrage

Pour calculer ce coefficient, plusieurs corrélations ont été proposées, mais la plus utilisée dans la littérature est celle recommandée par Hollands et al (K. S. ONG [33] et A. Benkhelifa[34]). Cette corrélation donne le nombre de Nusselt moyen en fonction du nombre de Rayleigh et de l'angle d'inclinaison du capteur (pour un angle d'inclinaison qui varie entre 0° et 75°) comme suit :

$$\overline{Nu} = 1 + 1.44 \left[1 - \frac{1708(\sin 1.8\theta)^{1.6}}{Ra \cos \theta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \theta} \right] - \left[\left(\frac{Ra \cos \theta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right] \quad (1.1)$$

$$Ra = \frac{2 \beta g (T_H - T_C) L^3 Pr}{\nu^2} \quad (1.2)$$

$$h = \frac{\overline{Nu} k}{L} \quad (1.3)$$

La même corrélation est proposée par R. R. Avezov et autres (2007), mais avec un angle qui varie entre 20° et 60°.

I.2.6.2. Coefficient de transfert de chaleur sur le vitrage

Selon K. S. ONG [33], ce coefficient peut être calculé à partir de nombreuses corrélations existantes dans la littérature, on peut en citer quelques-unes :

- Mac Adams [10] :

$$h_w = 5.7 + 3.8V \quad (1.4)$$

- Watluff et al. [10] :

$$h_w = 2.8 + 3.3V \quad (1.5)$$

- Sparrow et al. [10] :

$$Nu_w = 0.0158 Re^{0.8} \quad (1.6)$$

Ernani Sartori [35], Watmuff et al. [10] ont suggéré que la première corrélation inclus l'effet du rayonnement, ainsi, ils ont proposé la relation :

$$h_c = 2.8 + 3.0V \quad (1.7)$$

Lunde[10] a présenté la corrélation :

$$h_c = 4.5 + 2.9V \quad (1.8)$$

Telle que pour toutes les corrélations, V : c'est la vitesse du fluide en mouvement.

I.3. Problématique et naissance du PV/T

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, un module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident [12], dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module.

Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module.

Partant du constat que le rendement du panneau photovoltaïque décroît avec l'augmentation de la température, et que la fonction d'un capteur solaire est de transférer la chaleur captée par sa surface à un fluide caloporteur, l'idée est née d'associer ces deux technologies et d'en faire un prototype hybride nommé PV/T, qui permet à la fois de convertir l'énergie solaire captée en électricité mais aussi de valoriser l'autre part, habituellement perdue, en chaleur.

Chapitre II
Contexte Bibliographique

Contexte bibliographique

Dans ce chapitre, une analyse bibliographique sur les capteurs solaires PV/T hybrides est effectuée, y sont présentés essentiellement : l'évolution de la recherche sur le concept des capteurs solaires hybrides intégrables au bâti suivant le fluide caloporteur employé (air ou liquide). Des exemples de capteurs solaires PV/T hybrides à air et de capteurs solaires PV intégrés seront présentés. Quelques systèmes PV/T hybrides à liquide caloporteur recensés dans la littérature seront analysés. De plus, dans chaque cas, des détails sur le marché de ces composants solaires sont donnés.

II.1.Problématique

Les capteurs hybrides utilisant de l'air et de l'eau avec absorbeur ont été évalués expérimentalement [41-43], analytiquement [44-46] et économiquement. Des travaux ont été menés pendant trois ans au Massachusetts Institute of Technology. La conclusion la plus importante de ce travail affirmait que la viabilité du capteur hybride PV/T sera décidée par la capacité du système à satisfaire les charges thermiques et électriques demandées.

Il y a plusieurs paramètres influant sur les performances du capteur PVT, on note que son rendement électrique s'améliore avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire.

La recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. Les études théoriques et expérimentales du PV/T ont été documentées dès les années 1970 [59-61]. Bien que la validité technique a été conclue au début, seulement au cours des dernières années qu'il a acquis une grande attention. Ce qui suit donne un aperçu de l'évolution de la technologie, en mettant l'accent sur les activités de recherche et développement dans la dernière décennie.

La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettent l'accent sur le développement de modèles thermiques analytiques ou réalisés suivant une analogie électrique, et plus rarement de modèles électriques de photo-conversion en régime permanent ou dynamique. Certaines de ces analyses s'appuient en outre sur des confrontations avec des études expérimentales en conditions contrôlées ou in situ sur divers sites.

D'autres recherches ont pour but l'optimisation des performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation du composant...) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Ainsi, elles se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de constitution

(isolant thermique, absorbeur, cellules PV...) ou des fluides caloporteurs (air, eau glycolée...). Ces améliorations visent à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire voire éliminer les pertes thermiques extérieures du capteur solaire hybride.

En 1976 Wolf [62], effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur. Kern *et al.* 1978 [63], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Raghuraman et Cox, En 1981, ont présenté des méthodes numériques permettant l'étude des performances des capteurs solaires plans PVT à eau ou à air. L'année suivante, 1982, Henderiea développé un modèle théorique de système PVT hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards, Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PVT hybrides à air, mettant l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur le rendement thermique et électriques. Les travaux de recherche qui ont suivi les capteurs plats, Lalovic et al, en 1986, proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV. O'Leary et Clements, Mbewe et al. Al-Baaliet Hamdy et al. incluent l'analyse de la performance sur les systèmes PVT concentrés à la lumière. [51]

Bhargava *et al.* 1991 et Prakash, 1994 présentent les résultats de leurs travaux sur l'effet du débit et de canal d'air. Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont l'effet du débit et de canal d'air [52].

En 1995, Garg et ses collègues ont effectué des études analytiques et expérimentales détaillées sur les systèmes de chauffage liquides hybride PVT à air. Ils ont souligné que l'augmentation des pertes de transmission due à l'ajout d'une deuxième couverture ne justifie pas la réduction des pertes de chaleur. Au-delà d'un seuil critique, la couverture réalisée par un simple vitrage permet de récupérer plus de chaleur. [51]

Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont été étudiés par Sopian *et al.* 1995 et 1996. Dans les travaux précités, le rendement thermique de ces systèmes PV/T était dans la gamme de 45 % à 65 %. On peut considérer pour les capteurs hybrides, un rendement total de conversion qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique [52].

Sopian et al. [64] ont développé un modèle stable pour comparer les performances des capteurs PVT à air simples et double-passages, la meilleure performance de la conception double passage a été trouvé attribué au refroidissement de production des cellules solaires et la réduction de la température de la couverture avant. Prakash [65] a effectué l'analyse des transitoires sur un capteur PVT classique conçu pour l'air et à l'eau de chauffage, respectivement. En comparaison avec le chauffage de l'eau, le rendement thermique inférieur de la conception de chauffage d'air en raison d'un mauvais transfert de chaleur entre la plaque d'absorbeur et de l'air s'écoulant a été conclu.

Bergene et Lovvik [66] ont proposé un modèle physique détaillée d'un système de capteur PVT à eau plaque plane pour l'évaluation des performances.

Des essais expérimentaux sur les systèmes PVT à eau à Riyad (à $24,6^\circ$ N), l'Arabie Saoudite [67] ont montré que la température ambiante élevée en été pourrait conduire à la chute de 30% de l'efficacité PV, bien que l'efficacité thermique reste bonne.

D'autre part, Rockendorf et al. [68] construits un prototype des capteurs thermoélectriques (première génération de la chaleur et par la suite l'électricité) et des capteurs PVT à eau (avec des cellules solaires de combinaison d'absorbeur aluminium et tubes en cuivre), et les résultats de simulation TRNSYS ont montré que la production électrique des capteurs PVT à eau est nettement plus élevé que celui du collecteur thermoélectrique. L'efficacité thermique calculée de systèmes PVT à eau est généralement de l'ordre de 45-70% pour la conception de capteur vitrés ou non vitrés. Pour les systèmes PVT à air, les rendements thermiques peuvent être jusqu'à 55% pour la conception du capteur optimisé.

En 2005, Zondag [69] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PVT hybrides en se basant sur le rapport du projet européen. Parmi les premières études recensées par Zondag, certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation. Diverses études expérimentales et théoriques ont été réalisées ensuite, en vue du développement des systèmes PV/T hybrides.

En 2007, Tripanagnostopoulos [70] a fait l'étude de capteurs solaires hybride PVT dont le fluide caloporteur est soit de l'air, soit de l'eau, et pouvant être intégrés au bâti.

L'objectif de ces travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous face du composant.

Un modèle mathématique de capteur thermique PV/T d'air à double passage avec des ailettes est proposé par Ebrahim *et al.* (2009) [71]. Chow *et al.* (2007) [72] présentent la modélisation et une étude comparative des performances d'un capteur solaire PV/T à eau. Kribus *et al.* (2006), ont discuté la conception d'un système PV/T en utilisant un concentrateur parabolique de petite taille, leur conception de système pouvait fournir le chauffage à très haute température. [72] Un nouveau type de collecteur PV/T est décrit par [73,74].

L'étude expérimentale de ce nouveau collecteur a constitué une nouvelle approche technique qui a permis de maximiser la conversion totale avec un coût réduit comparé aux deux collecteurs séparément installés. Dans ce *PFE*, le concept de capteur hybride Photovoltaïque/Thermique est présenté. L'objectif de ce travail est d'étudier les performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PV/T à air.

II.2. Les capteurs solaires PV/T à air :

Compte tenu de la faible demande en chauffage solaire sur le marché, peu d'études ont été menées sur les capteurs solaires PV/T à air isolés ou intégrés au bâti en comparaison avec les capteurs solaires PV intégrés. Ainsi, par exemple, en 1998, Sandberg et Moshfegh [75] [76] proposent l'étude théorique et expérimentale des phénomènes thermiques et aérauliques au sein d'une lame d'air (Fig. II.1) permettant la ventilation naturelle en sous-face d'une façade photovoltaïque et d'une toiture comportant des panneaux PV.

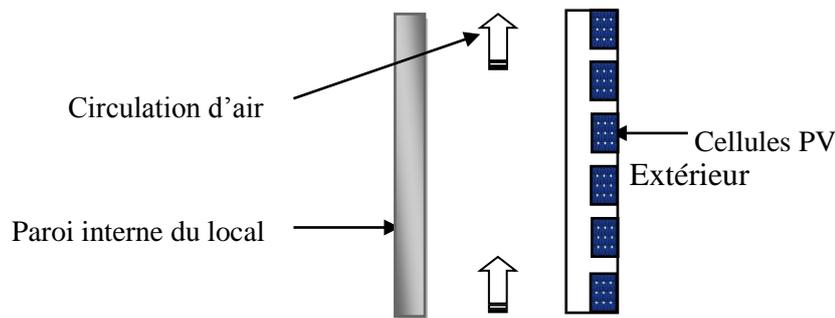


Figure II.1 : Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV [75].

Ce capteur solaire est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur peint en noir et d'un support arrière bien isolé (Fig. II.2). Les cellules PV sont collées sur l'absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive choisie pour ses bonnes propriétés de conduction thermique et d'isolation électrique.

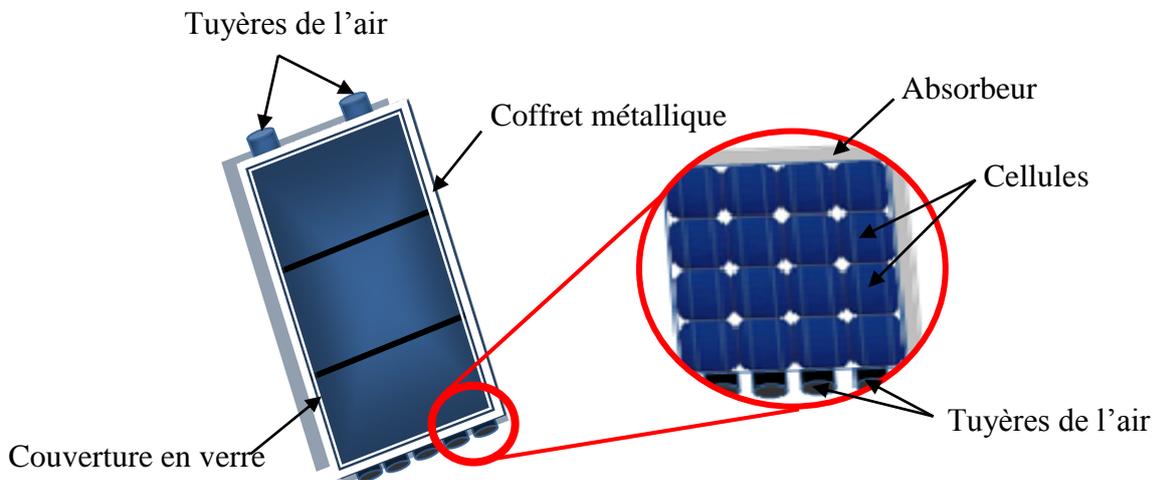


Figure II.2 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à air [77].

II.2.1. Etudes théoriques :

Les études paramétriques menées par Sandberg et Moshfegh [75] [76] ont montré que les dimensions et la position des modules PV le long de la lame, ont une forte influence sur le comportement thermique et aéraulique du système.

En 1999, Garg et Adhikari [77] proposent un programme de modélisation d'un capteur solaire PV/T hybride à air permettant d'en prédire les productivités thermique et électrique. Le rendement des panneaux PV est calculé à partir d'une fonction linéaire décroissante.

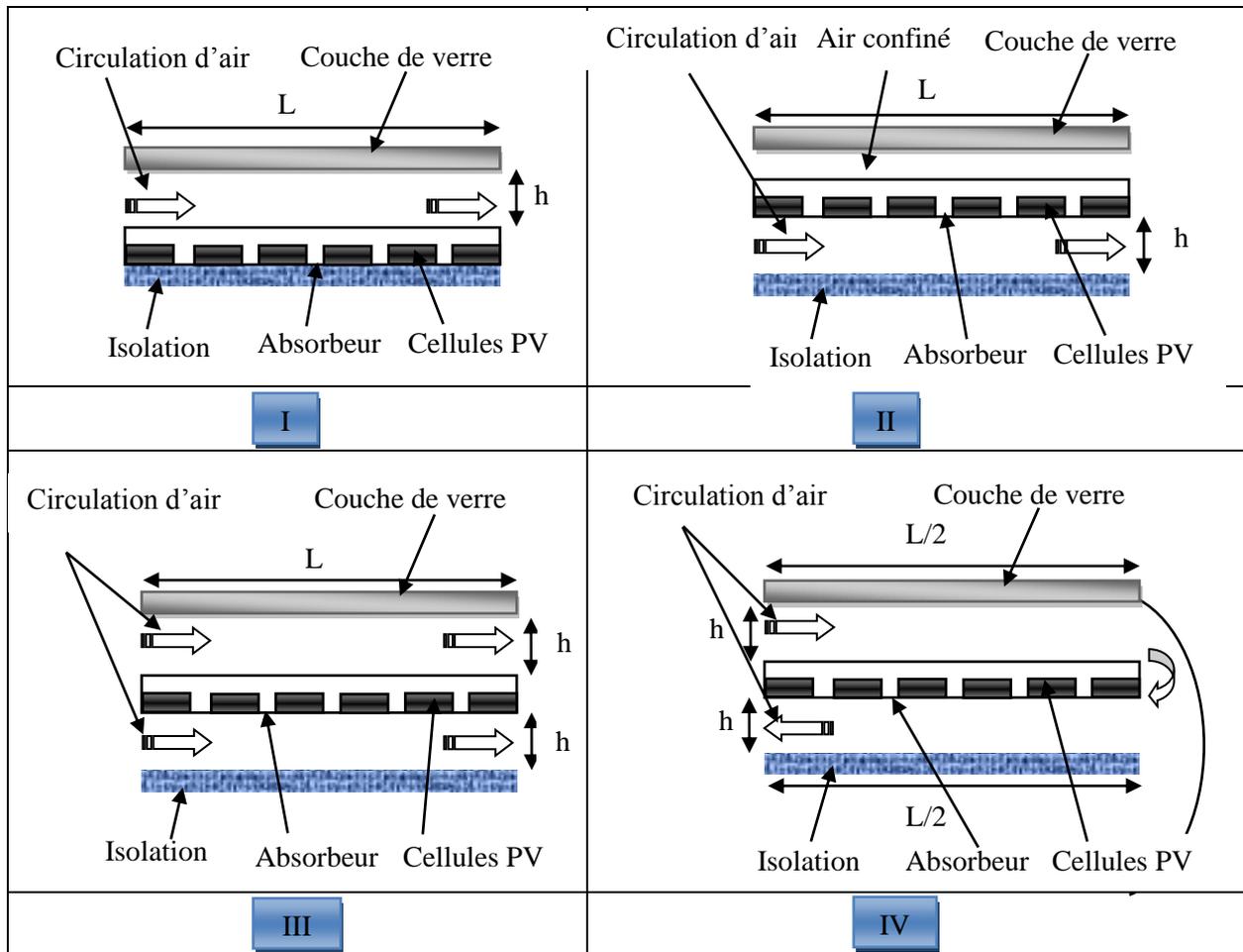


Figure II.3 : Prototypes I, II, III et IV du capteur solaire PV/T à air.

Hegazy [78] a comparé en 2000, les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires PV/T hybrides à air qui sont différenciés par le mode de refroidissement (mécanique) des panneaux PV, à savoir au-dessus (prototype I), en dessous (prototype II), de part et d'autre (prototype III) de l'absorbeur, et par double circulation d'air (prototype IV) (Fig. II.3).

Chacun de ces capteurs est vitré et a une longueur de 9 m et une largeur de 1 m. L'épaisseur de la lame d'air a été choisie en fonction d'un critère d'optimisation proposé par Hegazy [79] [80] pour divers débits massiques, à savoir :

$$\left(\frac{h}{L}\right)_{Opt} = 2.5 \times 10^{-3} \dots\dots\dots(1)$$

Avec ici, h la hauteur de la lame d'air et L la longueur du canal traversé par le flux turbulent d'air. Le panneau PV est composé de 20 modules constitués chacun de 36 cellules PV en silicium cristallin montées en série. Il couvre 62.8 % de la surface de l'absorbeur qui est de 9 m². La tension nominale aux bornes d'un module PV est 16.5 V, soit une puissance nominale de 50 Wc. Le modèle stationnaire réalisé pour chacun de ces composants est unidirectionnel.

Hegazy [78] souligne que les performances d'un capteur solaire PV/T hybride à air dépendent de la température maximale d'air en sortie, des rendements thermiques et électriques, et de l'énergie électrique nette disponible après soustraction de l'énergie nécessaire au fonctionnement du ventilateur et des autres appareils alimentés. La simulation réalisée pour une journée ensoleillée a montré que l'accroissement du débit massique de ventilation améliore comme attendu, le rendement thermique. Le prototype I a le plus faible rendement global alors que le prototype III semble donner les meilleures performances pour un fort ensoleillement et peut être aisément assemblé en usine. Les résultats obtenus ont montré de plus, que pour de faibles débits massiques de ventilation, l'utilisation d'un absorbeur sélectif est inappropriée pour ce type de capteur solaire car elle réduit la production d'énergie électrique.

En 2006, Vokas et al ont mené l'étude théorique d'un capteur solaire PV/T hybride à air en mettant l'accent sur ses performances thermiques. Le capteur solaire consiste en un capteur solaire thermique sur lequel est collé un panneau PV. Le modèle réalisé est basé sur celui d'un capteur solaire plan et sur les travaux de Duffie et Beckman. Le rendement thermique de ce capteur solaire PV/T hybride à air (de 1.32 m² de surface) a été comparé à ceux d'un capteur solaire thermique à air standard (de 1.32 m² de surface) et à ceux d'un capteur solaire thermique à air à absorbeur sélectif (de 2 m²). Dans le cas où la température d'entrée d'air dans le capteur solaire est égale à la température de l'air ambiant, les résultats obtenus montrent que le capteur solaire PV/T hybride à air a un rendement thermique inférieur de 9 % à celui du capteur solaire thermique standard (dont le rendement est de 70 %). Le capteur solaire à absorbeur sélectif a le rendement thermique le plus élevé (75 % environ). Cependant, l'avantage du capteur solaire hybride est qu'il peut produire outre une quantité importante d'énergie thermique, de l'énergie électrique sur une surface équivalente à celle du capteur solaire standard (soit 1.32 m², ici) et sur une surface inférieure à celle du capteur solaire à absorbeur sélectif (2 m²). [51]

En 2007, Tripanagnostopoulos [88] réalise à l'Université de Patras, l'étude de capteurs solaires PV/T hybrides dont le fluide caloporteur est soit de l'air soit de l'eau, et pouvant être intégrés au bâti. L'objectif de ces travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du composant. Pour cela, la configuration d'un capteur solaire PV/T à air a été modifiée à moindre coût. Des études paramétriques menées sur un système PV/T à air ont montré qu'une faible épaisseur de lame d'air améliore les transferts thermiques mais réduit le débit massique de ventilation de la lame, d'où une réduction du rendement thermique du système. Pour pallier ce problème en optimisant les transferts de chaleur

convectifs et radiatifs, la solution proposée est d'accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV. Pour cela, des configurations intégrant des plaques nervurées ou planes, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame d'air ont été envisagées (Figure II.4).

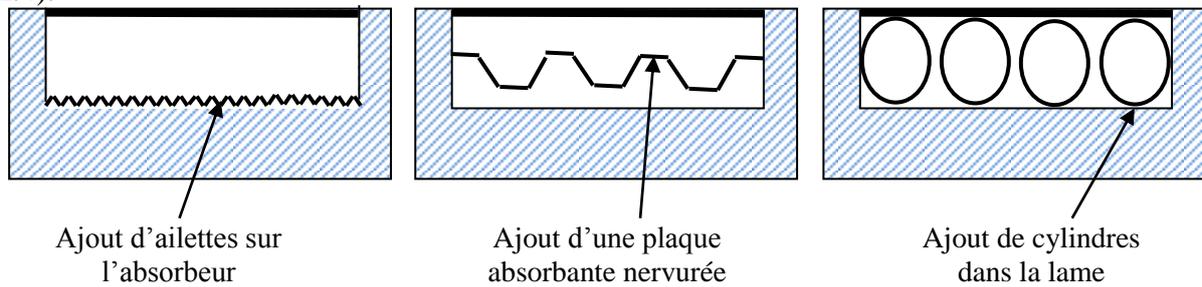


Figure II.4 : Quelques exemples de modifications du capteur solaire PV/T hybride à air [66].

En 2008 une Simulation d'un système Photovoltaïque/Thermique hybride de chauffage à air (de PVT) pour régénérer le gel déshydratant dans une salle de climatisation est étudiée par Y. Sukamongkol et al, Il conclue que le modèle développé de simulation peut prévoir l'exécution d'un système thermique photovoltaïque hybride de chauffage à air pour le déshydratant de régénérer dans une salle de climatisation. Le PVT de chauffage à air peut être employé pour fournir l'air chaud, qui est environ 50 °C, pour se mélanger à ceux de l'unité de condensation du dispositif de climatisation pour régénérer le déshydratant saturé. En outre, l'efficacité de PVT est haute jusqu'à 66% tandis que l'énergie électrique produite de 6.52 MJ peut être employée pour alimenter le dispositif électrique dans le système.

Les résultats trouvés dans les travaux précités ont été très encourageants et ils ont trouvé des rendements thermiques de 70% avec refroidissement par du liquide et 60% pour un refroidissement par air. Les publications récentes sur les capteurs PV/T présentent des systèmes basés sur le stockage de chaleur latente qui pourra être utilisée dans les immeubles et pour produire de l'eau chaude, ont été développé par K.Touafek et al (2009), étude thermique d'un capteur PVT à air recouvert destine au chauffage d'habitation, un Modèle mathématique de capteur thermique photovoltaïque d'air de double passage avec des ailerons par Ebrahim M et al (2009). La figure II.5 représente le schéma d'un double capteur d'air (PV/T) avec des ailerons [89].

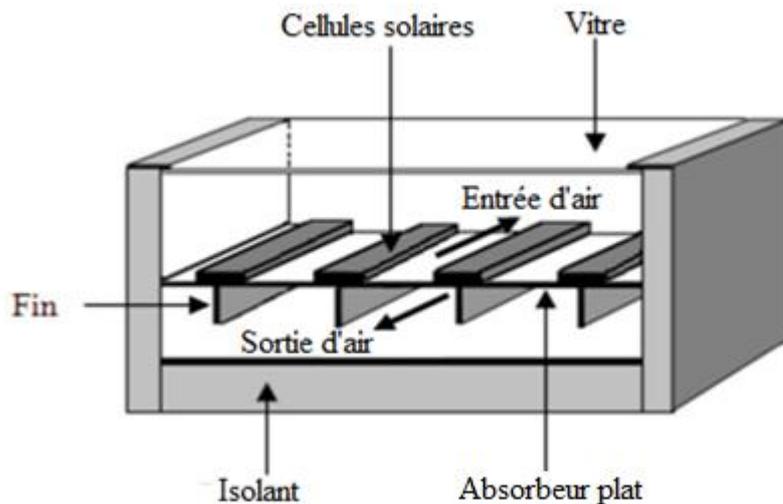


Figure II.5 : Schéma d'un double capteur d'air (PV/T) avec des ailerons.

Ebrahim M. Ali Alfegi et autres ont étudié l'effet des débits sur l'exécution du passage simple à ailettes, réchauffeurs solaires thermiques photovoltaïques d'air de double conduit (2009).

II.2.2. Etudes expérimentales :

Puis, en 2003, Mei et al [81] présentent le modèle dynamique d'un capteur solaire PV/T à air intégré à la façade d'un bâtiment. Cette étude s'inscrit dans le prolongement d'un projet européen précédent [82] visant l'intégration des systèmes photovoltaïques au bâti (ventilation naturelle sur les deux faces de panneaux PV intégrés à la façade et à la toiture de la bibliothèque publique Mataro (Espagne) en 1997 par la société Teulades Multi-Functional (TFM)). La façade sud du bâtiment considéré par Mei et al [81] comporte de haut en bas, des capteurs solaires à air, des panneaux PV connectés en série et séparés d'un double vitrage intérieur par une lame d'air de 14 cm, et une paroi en briques. Les modules PV sont composés de cellules poly-cristallines encapsulées entre deux couches de verre. Les autres façades sont composées de béton cellulaire et de bardages métalliques. L'air est aspiré à la base de la lame d'air située à l'arrière des panneaux PV.

Le modèle unidirectionnel de la façade a été validé à partir de mesures expérimentales réalisées in situ. Les besoins en chauffage et en rafraîchissement d'un bâtiment avec et sans intégration de capteur solaire à air ont été comparés. De plus, l'influence des conditions météorologiques sur les performances de ces bâtiments a été évaluée sur divers sites en Europe. Les résultats présentés ont montré que le capteur solaire à air ventilé couvre 12 % des charges de chauffage pour les sites ensoleillés (Barcelone) mais ne couvrent que 2 % des charges de chauffage dans les sites localisés plus au nord (tel que Stuttgart). Il faut malgré tout moduler ces résultats car les besoins de chauffage sont très différents suivant les sites.

Durant la même période, Cartmell et al [83] réalisent une étude similaire sur le Centre Environnemental Brockshill (BHEC) situé au sud de Leicester en Grande-Bretagne en vue de le rendre autonome du point de vue énergétique. Pour cela, ce bâtiment a été équipé

d'installations utilisant des énergies renouvelables dont un capteur solaire PV ventilé, un capteur solaire à air et un capteur solaire à eau. Le capteur solaire PV monté sur la toiture du bâtiment inclinée à 35° , est combiné au capteur solaire à air. Le panneau PV est composé de 20 modules d'une surface totale de 37 m^2 . Le capteur solaire à air de 12.5 m^2 de surface comporte une lame d'air isolée et un absorbeur noir muni d'ailettes afin d'accroître les transferts thermiques par convection entre l'absorbeur et l'air. L'air circule mécaniquement tout d'abord à l'intérieur du capteur solaire PV entre un isolant arrière et le panneau PV, puis dans le capteur solaire à air avant d'être injecté dans le local.



Figure II.6 : Capteurs solaires combinés intégrés à la toiture de Brockshill Environment Center.

Dans le cas où les besoins en chauffage du bâtiment sont nuls, cet air est dirigé vers un échangeur de chaleur en vue d'une production d'eau chaude sanitaire. Ce système combiné a été construit et installé par la société Grammer Solarluft-Technik GmbH. Les simulations ont été effectuées à l'aide de quelques logiciels (dont TRNSYS) ayant permis la réalisation de sous-programmes de calcul de la productivité (thermique et électrique) du système combiné.

Il est constaté que ce système couvre 64.4 % des besoins en eau chaude sanitaire du bâtiment (contre 26.5 % avec le capteur solaire thermique à eau) et 35 % des besoins en chauffage pendant la période froide.

La différence entre cette analyse et celle effectuée par Mei et al [81] réside dans le fait que dans l'étude de Cartmell et al, les interactions entre les capteurs solaires et le bâtiment sont négligeables compte tenu de l'épaisse couche d'isolant les séparant.

Plus tard, en 2005, Tiwari et al [84] présentent l'étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement.

Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV de 0.61 m^2 de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. Ce composant a été intégré à un banc d'essais en acier inclinable et monté à New Delhi, en Inde (Figure II.7). Des ventilateurs disposés à l'entrée de la lame d'air située entre le Tedlar et une couche isolante en bois permettent la ventilation forcée des modules PV en face arrière. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système PV/T à air d'environ 18 %.



Figure II.7 : Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air [84].

En 2007, Tiwari et Sodha [85] proposent l'étude paramétrique comparative de quatre types de capteurs solaires à air proches du système présenté précédemment. Ces systèmes se différencient par la présence ou non d'un vitrage et d'un support en Tedlar. Les modèles thermiques réalisés ont été validés expérimentalement sur le banc d'essais monté à New Delhi. Les résultats obtenus ont montré que le composant à air vitré sans Tedlar est le plus performant et présente l'accroissement de rendement global (thermique et électrique) le plus élevé. Ce système vitré peut être utilisé pour diverses applications telles que le chauffage des locaux et l'éclairage.

Les capteurs solaires à air non vitrés avec et sans Tedlar donnent des températures des cellules PV équivalentes. Enfin, le constat est fait que pour une longueur de capteur solaire donnée, la connexion en série de modules PV de plus petite surface permet une nette amélioration du rendement global du capteur solaire.

Plus tard, en novembre 2007, Joshi et Tiwari présentent l'étude des rendements énergétique et exergetique du capteur solaire hybride PV/T à air sans vitrage et comportant une couche de Tedlar. Les résultats validés expérimentalement indiquent que le rendement

énergétique du capteur solaire varie de 55 à 65 %. Le rendement électrique de ce capteur solaire est compris entre 14 % et 15 % [51].

De même, Vokas et al montrent que la part des besoins en chauffage couverte par une surface de 30 m² de ce système PV/T hybride à air est de 47.79 % en moyenne, à Athènes. Le capteur solaire standard peut couvrir 54.26 % des besoins en chauffage dans la même ville. Cependant, la différence entre ces valeurs n'étant que d'environ 6.65 %, les performances du capteur solaire hybride peuvent être considérées satisfaisantes. Enfin, une autre étude paramétrique montre que comme attendu, la localisation géographique ainsi que la surface de captation ont une forte influence sur la productivité du composant hybride.

En 2007, Othman et al [87] mènent l'étude théorique et expérimentale des productivités thermique et électrique d'un capteur solaire PV/T hybride à air à double circulation d'air. Le composant est constitué de deux lames dans lesquelles l'air circule successivement. La première lame d'une hauteur de 16.5 cm est comprise entre une couche de verre en face avant et les modules PV. La seconde lame d'air dont l'épaisseur est comprise entre 30 et 120 cm, se situe en sous-face des modules PV. La face arrière des modules est munie d'ailettes verticales n'étant pas en contact avec la plaque arrière du capteur solaire. Ces ailettes permettent d'accroître les transferts thermiques convectifs entre l'air et les modules PV. La surface totale couverte par les cellules PV en silicium mono-cristallin est de 0.38 m²

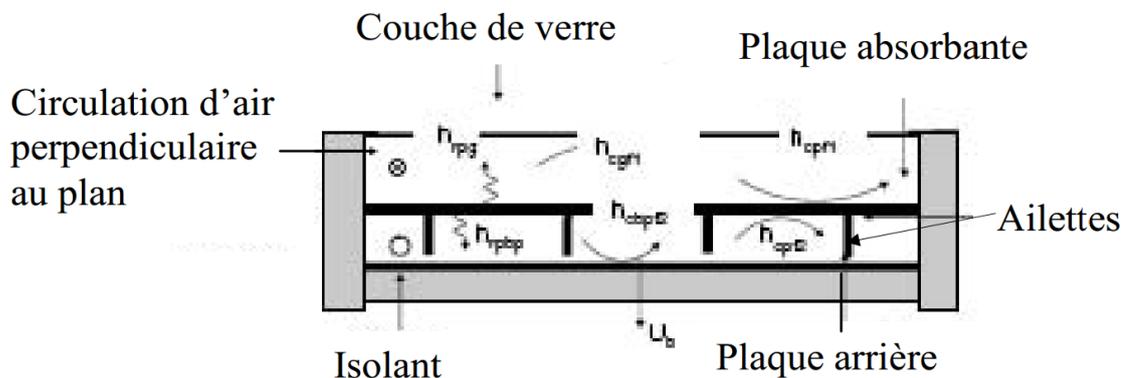


Figure II.8 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à air à ailettes [87].

Othman et al [87] développent un modèle thermique unidirectionnel en régime permanent de ce composant hybride. La confrontation des données de la simulation réalisée par la suite avec les résultats d'une étude expérimentale effectuée in situ a permis de noter que l'emploi des ailettes permet d'améliorer à la fois le rendement thermique et les performances électriques du composant hybride.

Ainsi, divers projets de recherche ont été menés sur l'intégration des capteurs solaires PV au bâti et sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air. Certains ont abouti à une mise sur le marché du composant. Un recensement des dispositifs ayant été étudiés et commercialisés est présenté en 2005. Parmi ces composants dont le mode de ventilation varie, ont été recensés, par exemple, les systèmes PV intégrés à la façade du bâtiment Scheidegger (ventilation naturelle en sous-face des modules PV) par la société Atlantis Energy, en 1993. Nous

pouvons de même citer les modules PV intégrés et à la façade du bâtiment Yellow House à Alborg en 2000 par la société Esbensen consulting (ventilation naturelle des deux faces des modules PV). Des capteurs solaires PV ont en outre été intégrés à la ferme Aerni en 2001 par la société Atlantis Energy (ventilation en sous-face des modules PV), au bâtiment ECO-canteen du Centre de Recherche de la société Fiat en 2003 et au centre d'entraînement professionnel de Casargo par la compagnie Secco Sistemi, en 2005. [51]

En ce qui concerne les capteurs solaires PV/T hybrides à air recensés, le nombre de dispositif est très réduit. Cependant, Zondag et al notent que le taux de commercialisation de ces capteurs solaires est très élevé par rapport aux autres types de systèmes plus complexes du point de vue technologique. Ainsi, citons le cas de l'entreprise Grammer Solar ayant commercialisé un capteur solaire PV/T hybride à air suite à divers tests. Cette société a réalisé, en outre un composant hybride à air pouvant être intégré à des habitations isolées.

De même, la compagnie Conserval Engineering construit un capteur solaire PV/T à air composé de panneaux PV collés à la surface de panneaux perforés nommés PV Solarwall dans le but d'accroître la production électrique des modules PV en les ventilant. Diverses configurations de ce composant à absorbeur perforé ont été testées in situ.

La société Aidt Miljø produit de plus, un capteur solaire PV/T à air devant contribuer à la ventilation de villas autonomes. En outre, Cythelia développe trois prototypes de capteurs solaires hybrides PV/T à air qui n'ont pas été commercialisés.

En 2003, l'OPAC (Office Public d'Aménagement et de Construction) de Paris est le premier bailleur social ayant décidé de moderniser ses installations de chauffage, permettant ainsi la réduction de 5 % de la consommation d'énergie de ses immeubles chauffés collectivement. Dans ce sens, pour les 637 logements du groupe Plantes Jean Moulin dans le 14ème arrondissement de Paris, 1020 m² de panneaux solaires ont été mis en place et permettent la couverture de 40 % des besoins en eau chaude sanitaire.[51]

Ce domaine étant vaste, la liste de composants que nous avons présentée est réduite mais, elle permet de définir les principales caractéristiques des composants solaires PV/T à air et PV intégrés rencontrés dans la littérature. Dans le cas des capteurs solaires PV/T hybrides à eau, la même démarche a été appliquée.

II.3. Capteurs solaires PV/T hybrides à eau :

II.3.1. Etudes théoriques :

Les résultats de la simulation pour la journée du 3 novembre 2007 ont montré que ce capteur solaire hybride vitré a une production électrique journalière de 339.3 Wh. De plus, en ajoutant une couche de verre supplémentaire en face avant du composant afin de réduire les pertes thermiques, la production électrique journalière se réduit à 296.2 Wh. En 2003, un capteur solaire PV/T hybride à eau est étudié en régime dynamique par Chow [60] qui en réalise un modèle adapté aux simulations thermiques en régime transitoire. Il

s'appuie pour cela, sur les travaux de Bergene et Lovvik qui présentent en 1995, la modélisation d'une configuration similaire de capteur solaire PV/T hybride à eau. Ce modèle thermique se base sur la méthode des volumes finis et permet le calcul des performances horaires, des gains thermiques et électriques, des rendements et du comportement thermique des diverses couches de ce capteur solaire. Le composant est constitué d'une couche de verre séparée d'un panneau PV par une lame d'air confinée (cf. Figure II.9). Le panneau PV est fixé à un absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive composée d'EVA (éthylène acétate de vinyl) et de Tedlar. Cet absorbeur se présente sous forme d'ailette soudée à des tubes de circulation d'eau parallèles, régulièrement espacés et connectés aux deux extrémités par des tubes de jonction. Cette disposition permet d'uniformiser le débit d'eau dans chacun des tubes. Les côtés et le fond du capteur solaire sont isolés.

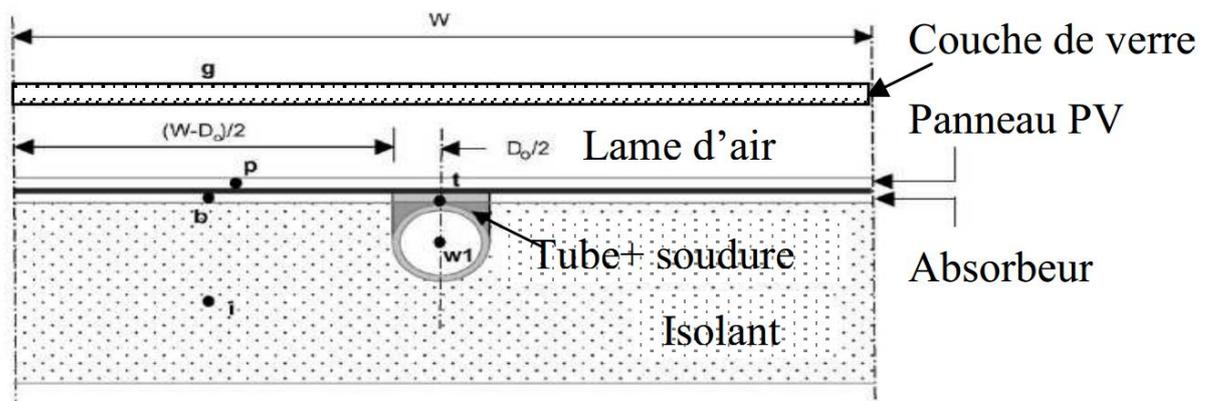


Figure II.9 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau [60].

Des études paramétriques sont réalisées en faisant varier les coefficients de transfert par conduction entre l'absorbeur et le tube, et entre l'absorbeur et le panneau PV. Il montre ainsi que le capteur solaire comportant un contact idéal entre l'absorbeur et le tube et entre l'absorbeur et les panneaux PV donne le rendement global le plus élevé, soit 70 %. Dans le cas où ces coefficients de transfert thermique sont faibles, le rendement descend à 60 %. Les diverses simulations réalisées ont montré que le modèle basé sur la représentation de chaque couche par un seul nœud de température est convenable pour l'étude des capteurs solaires de configuration similaire.

En 2006, en vue d'améliorer les transferts de chaleur entre les panneaux PV et l'absorbeur d'un capteur solaire hybride, Ji et al proposent l'analyse d'une combinaison de six prototypes de capteurs solaires PV/T à absorbeur en aluminium séparé d'un isolant en mousse de polyuréthane par des canaux d'eau disposés en sous-face. Entre les panneaux PV et une couverture de verre se trouve une lame d'air de 25 mm (cf. Figure II.10). Ces capteurs solaires étaient disposés en trois rangées en parallèle de deux capteurs solaires en série. Ces prototypes intégrés à un bâtiment ont chacun une surface de 1.173 m² et sont couplés à un ballon de stockage de 420 litres de volume. Chaque panneau PV est composé de 72 cellules PV en silicium poly-cristallin.

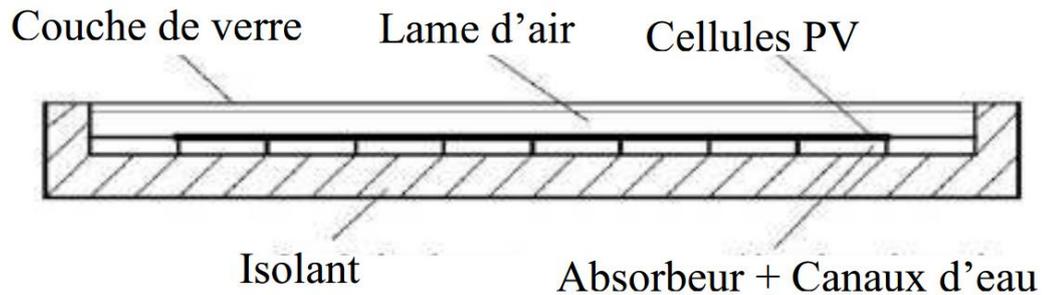


Figure II.10 : Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau.

Des tests réalisés in situ ont permis de valider le modèle développé. Le modèle thermique dynamique réalisé est basé sur une analogie électrique et tient compte des transferts thermiques dans le ballon de stockage. Les pertes thermiques latérales du capteur solaire sont prises en compte dans le bilan thermique. Les résultats obtenus ont indiqué qu'une conception adaptée de la lame d'air permet de réduire la température de fonctionnement des panneaux PV de 15 °C. De plus, ils ont montré que l'augmentation du débit de circulation de l'eau améliore le refroidissement des modules PV. Cependant, Ji et al constatent qu'il existe un débit massique critique au-delà duquel le rendement thermique se dégrade.

En 2007, Fraisse et al [53] étudient un système combinant un capteur solaire hybride à eau et un plancher solaire dans une phase d'intégration à un bâtiment situé à Macôn. Le système est composé de cellules mono et poly-cristallines (cf. Figure II.11).



Figure II.11: Le capteur solaire PV/T hybride à eau [53].

Ils démontrent qu'en présence d'un vitrage le rendement électrique annuel du système hybride combiné est de 6.8 %, ce qui est inférieur de 28 % au rendement d'un capteur solaire

PV non intégré (9.4 %). Ils expliquent cette baisse de rendement électrique par un accroissement de la température de fonctionnement des panneaux PV (pouvant être supérieure à 100 °C) dû à la couverture de verre. Par contre, en absence de vitrage le rendement électrique est de 10 %, ce qui est supérieur de 6 % à celui du capteur solaire PV non intégré. La forte augmentation de la température des modules PV en été, empêche l'utilisation de l'EVA comme adhésif des panneaux PV dans un composant vitré. De plus, Fraisse et al [63] notent que dans ce type de configuration, l'utilisation de cellules amorphes est la plus adaptée car elles sont moins sensibles aux variations de température. Cependant, les rendements électriques obtenus sont faibles étant donné le bas rendement électrique des cellules PV amorphes (à savoir, 4 à 7 %) et les pertes thermiques liées au vitrage.

Récemment, en 2007, Chow et al [54] présentent la modélisation et l'étude comparative des performances d'un capteur solaire PV/T hybride à eau, d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire à eau. Deux prototypes de capteurs solaires hybrides ont été construits, le premier ayant été modélisé en 2006.

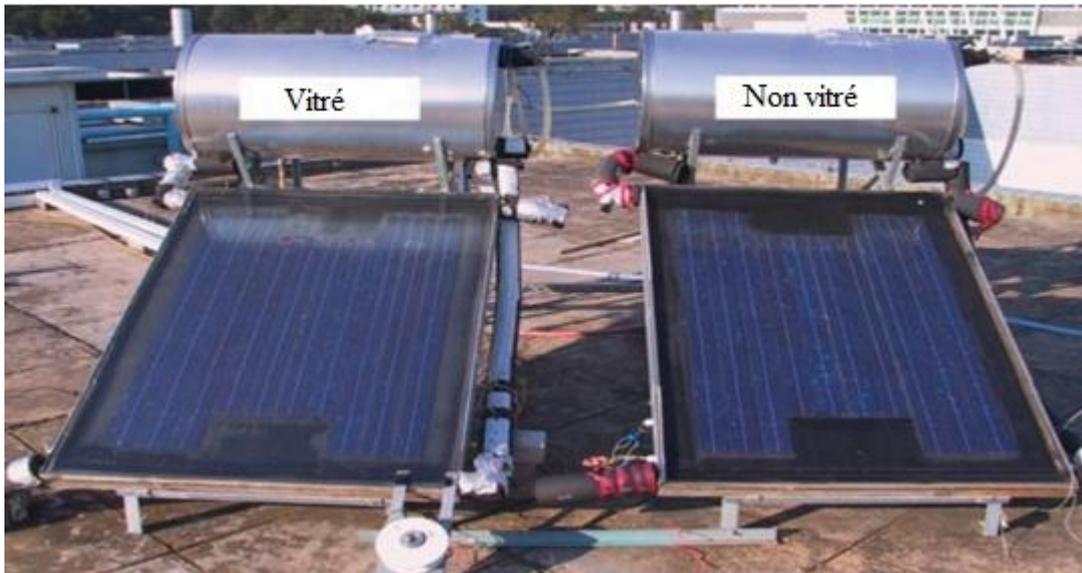


Figure II.12 : Premier et second prototypes construits [54].

Le second composant, plus performant a été modélisé plus finement [54]. C'est un capteur solaire vitré composé d'un panneau PV en silicium cristallin collé à un absorbeur métallique (cf. Figure II.12). Des tubes de circulation d'eau sont soudés à l'arrière de cet absorbeur. Le système est couplé à un ballon de stockage horizontal. Les résultats de la simulation montrent que le rendement thermique annuel moyen en eau de ce capteur solaire PV/T hybride à eau est de 38.1 % et celui du capteur solaire à eau, de 43.2 %. De plus, la comparaison du capteur solaire hybride avec un capteur solaire PV montre que le refroidissement avec de l'eau comme fluide caloporteur permet de réduire la température de fonctionnement des modules PV. Dans ce sens, la production d'énergie électrique annuelle du capteur solaire hybride est supérieure de 2.2 % à celle du capteur solaire PV.

En 2007, Kalogirou et Tripanagnostopoulos [55] poursuivent une étude précédente menée sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air [48] en analysant cette fois, le

comportement de capteurs solaires PV/T hybrides à eau comportant des panneaux PV à base de cellules en silicium poly-cristallin ou de cellules amorphes, sur trois sites. Ces composants ont été intégrés à des bâtiments industriels et ont chacun une surface totale de 300 m².

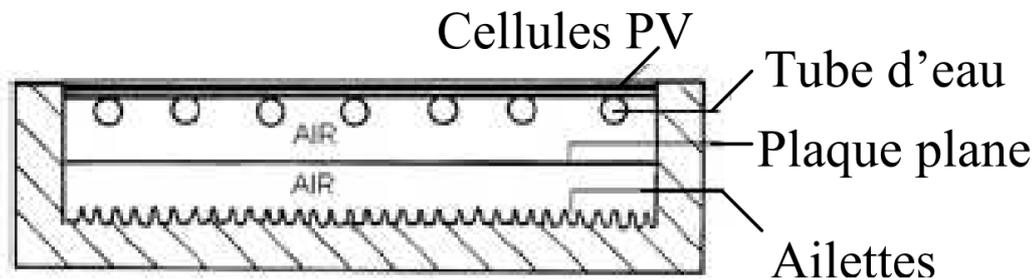


Figure II.13 : Section du capteur solaire hybride à eau étudié [55].

Le capteur solaire hybride a été isolé en face arrière par une couche de 5 cm de polyuréthane (Cf. Figure II.13). Les résultats des simulations réalisées à partir du logiciel TRNSYS montrent que la production électrique d'un capteur solaire PV est supérieure de 25 % à celle du composant hybride. Mais, le système hybride permet de couvrir une grande partie des besoins en énergie thermique des bâtiments considérés. L'évaluation de l'aspect économique de ces systèmes a montré qu'ils sont avantageux en particulier pour les sites bien ensoleillés. Le constat a été fait que les systèmes hybrides à eau constitués de modules PV sans protection thermique en face avant, ont d'importantes pertes thermiques entraînant ainsi un faible niveau de température de fonctionnement du système. Une couverture de verre peut ainsi être ajoutée en face avant pour y remédier, bien que les absorptions et réflexions supplémentaires inhérentes du rayonnement solaire entraînent une baisse du rendement électrique.

En 2008 K. Touafek et al ont étudié la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride. Ils ont établi par simulation numérique le comportement thermique de ce capteur PVT, ainsi que la cartographie de température pour cinq configurations : La première configuration représente le capteur photovoltaïque isolé thermiquement, et sur lequel une vitre supplémentaire a été déposée. La troisième configuration était l'installation d'un échangeur de chaleur, constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentin en tubes de cuivre, au-dessous du module photovoltaïque. Ils supposent l'état stationnaire, c'est-à-dire que le fluide s'écoule à l'intérieur de la tubulure et qu'il n'y a pas de circulation pendant la durée de la simulation. Tandis que dans la quatrième configuration, ils ont ajouté une vitre supplémentaire au-dessus du capteur. Et enfin ils ont déposé une seconde vitre au-dessus du capteur hybride, représentant ainsi la cinquième configuration. Les résultats de la simulation numérique sur le comportement thermique du capteur solaire PV/T y sont présentés et discutés [49].

II.3.2. Etudes expérimentales :

En 1997, Fujisawa et Tani [50] ont conçu et construit un capteur solaire PV/T hybride à eau sur une cité universitaire à Tokyo, au Japon. Les auteurs ont étudié un composant

solaire hybride composé d'un capteur solaire vitré à liquide caloporteur et à absorbeur plan en aluminium non-sélectif, et de modules PV en silicium mono-cristallin (rendement électrique de 13 %) (Cf. Figure II.14).

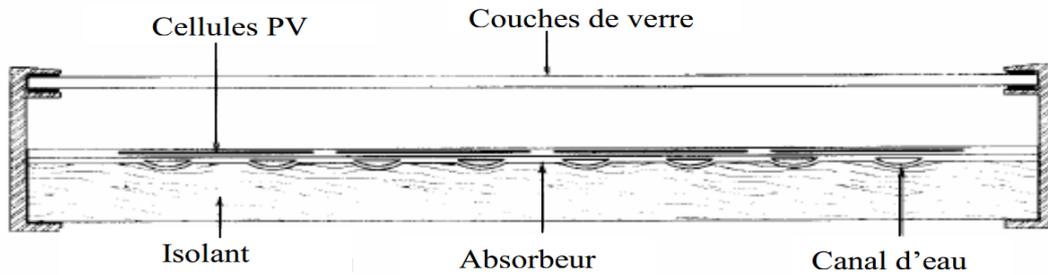


Figure II.14 : Coupe transversale du composant hybride à eau [50].

Ce capteur solaire a une longueur de 1.3 m et une largeur de 0.5 m. Cette analyse a consisté en l'évaluation des performances énergétiques du composant étudié. Ainsi, une étude expérimentale in situ a été menée sur ce capteur solaire vitré et sur un capteur solaire similaire mais sans vitrage en vue d'estimer et de comparer leurs performances énergétiques annuelles. Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire thermique. Il est noté que le capteur solaire hybride vitré produit autant d'énergie que le capteur solaire thermique. Le capteur solaire hybride non vitré produit le moins d'énergie thermique mais offre la plus grande quantité d'énergie électrique. Le capteur solaire PV a une surface de 0.48 m² et le capteur solaire thermique plan à une surface de 0.61 m². Quant aux capteurs solaires hybrides, ils ont une surface de panneaux PV de 0.48 m² et une surface d'absorbeur de 0.61 m². Il est montré qu'en ce qui concerne le gain total d'énergie (thermique et électrique), le système le plus performant est le capteur solaire hybride vitré qui a une production totale de 615 kWh/an, suivi du capteur solaire thermique plan (575 kWh/an), du capteur solaire hybride non vitré (480 kWh/an) et enfin du capteur solaire PV (72.6 kWh/an).

Cependant, la production d'énergie électrique du capteur solaire hybride non vitré est supérieure de 8 % à celle du capteur solaire PV. En effet, l'absence de vitrage permet la réduction des pertes thermiques par réflexion et une baisse du niveau de température de fonctionnement des modules PV [53]. De plus, la ventilation des modules PV en face arrière au niveau du composant PV/T hybride non vitré permet une réduction de la température de fonctionnement des modules PV par rapport au capteur solaire PV isolé. Quant au capteur solaire PV/T hybride vitré, il produit presque autant d'énergies thermique et électrique que le capteur solaire PV et le capteur solaire thermique plan réunis.

En 2001, Tripanagnostopoulos [46] effectue l'étude d'un capteur solaire hybride faisant appel à deux types de fluides caloporteurs disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique (à air ou à eau). Le système le plus performant schématisé sur la Figure II.13 comporte un absorbeur soudé à des tubes en cuivre situé en face avant du composant, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air.

Des cellules PV en silicium poly-cristallin ont été utilisées car assurant un bon rendement et ayant un coût plus réduit que les cellules PV en silicium mono-cristallin. Cependant, des cellules en silicium monocristallin et amorphe peuvent être employées.

En 2002, un capteur solaire PV/T hybride vitré est étudié par Sandnes et Rekstad [51]. Ce système est composé de cellules PV en silicium monocristallin collées sur un absorbeur en plastique noir polyphénilenoxyde par l'intermédiaire de 0.5 mm d'adhésif à base de silicium. Cet absorbeur est muni de canaux de circulation d'eau en sous-face (Cf. Figure II.15).

L'eau circule par l'intermédiaire de la force de gravité. Le panneau PV est constitué de 6 rangées de 5 cellules PV en série de 1.5 Wc chacune et a une surface de 0.32 m². Précisons que ce capteur solaire thermique a été construit par la société SolarNor AS, l'Université de Oslo et la société General Electric Plastics. L'analyse de ce prototype a consisté en la conception, en la modélisation du composant et en une étude expérimentale en vue d'évaluer ses performances thermique et électrique, et les interactions entre la production thermique en eau et la production électrique. Pour cela, des modèles analytiques existants ont été modifiés en vue de les adapter à ce système hybride. La température de l'absorbeur croît dans la direction d'écoulement du fluide caloporteur, soit du haut vers le bas du capteur solaire

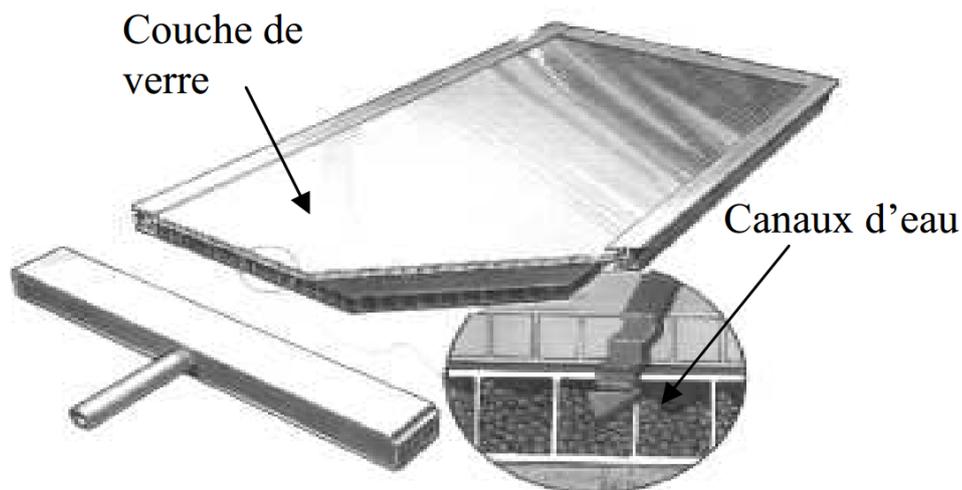


Figure II.15 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor [51].

Chow et al ont poursuivi cette étude des capteurs solaires hybrides PV/T à eau à travers l'intégration d'un système à la façade d'un bâtiment et l'étude expérimentale de ses performances thermiques et électriques. Le rendement thermique a été estimé à 38.9 % à basse température et le rendement électrique à 8.56 %.

La recherche sur les capteurs solaires hybrides à liquide caloporteur est en évolution constante, ainsi la liste de systèmes proposée précédemment n'est pas exhaustive. Au niveau du marché, la recherche bibliographique effectuée en particulier dans le rapport de synthèse EU-Project PV - Catapult sur les composants hybrides [56] nous a permis de constater que peu de capteurs solaires à liquide caloporteurs ont été commercialisés, jusqu'à présent. Nous pouvons citer le capteur solaire PV/T à eau non vitré commercialisé par la

société Millenium Electric. De plus, la société ECN propose le capteur solaire PV/T vitré PVTWINS. C'est le produit d'une collaboration entre ECN, ZEN Solar et Shell Solar et Renewable Energy Systems (RES), en Angleterre.

De 1996 à 1997, Solarwatt conduit un projet visant à produire un capteur solaire PV/T à eau. Cependant, le système n'ayant pas passé le test de résistance aux conditions climatiques faute d'une bonne isolation électrique des modules PV lors d'une démonstration en Allemagne, le concept fut abandonné.

Plus tard, les entreprises SDA, Sunearth & Unisolar mènent de 1997 à 2003 un projet intitulé PV BONUS consistant à combiner un capteur solaire PV laminé Unisolar à un capteur solaire thermique Sunearth. Mais, les nombreuses difficultés techniques rencontrées dues principalement à l'incompatibilité mécanique des matériaux de construction, ont empêché l'aboutissement du projet. La compagnie Powerlight conduit de 1997 à 2003, le projet PV BONUS dans lequel a été développé un système composé d'un capteur solaire PV laminé flexible Unisolar collé sur un absorbeur flexible EPDM. Cependant, suite à des décollements des modules PV, la commercialisation a été repoussée. En 1999, ICEC développe et teste un composant PV/T à liquide caloporteur mais, la mise en vente du produit n'a pas été effectuée.

En juillet 2004, dans le cadre du projet de Recherche Intégré PRI6.2 [42] et d'un soutien.

II.4. Capteurs PVT de concentration :

Le capteur PVT à concentration est relatif à la concentration du rayonnement solaire sur capteur hybride PVT.

Garg et Adhikari (1999) ont démontré l'utilisation de plusieurs CPCs (capteur de concentration parabolique) tronqués dans un module simple de PVT. Ils ont constaté que leur capteur pour le chauffage à air, avec un taux de concentration de 3, a eu comme conséquence de meilleures efficacités une fois intégré dans un système. Un système semblable a été également démontré par Othman et al (2005). Cependant, où Garg et Adhikari ont employé un passage simple pour chauffer l'air, ils ont utilisé un double passage avec une surface à ailettes arrière dans leur système. Le but de la surface à ailettes était d'améliorer le transfert thermique sur le visage arrière du module PV.

Le système de Trip Anagnostopoulos et al (2002) (un système de chauffage à air) est peut-être l'incarnation le plus simple d'un concentrateur de PVT. Comme mentionné, ceci a utilisé un réflecteur plat pour diriger le rayonnement solaire supplémentaire sur un capteur PVT. Cependant, la concentration du rayonnement solaire peut également être réalisée avec les objectifs paraboliques composés les réflecteurs des concentrateurs (CPC), linéaires ou circulaires de Fresnel ou avec des plaques paraboliques. Un arrangement typique d'un capteur PVT de CPC est montré sur le la figure II-16.

Comme mentionné, la concentration par les réflecteurs linéaires de Fresnel est également possible. Rosell et al (2005) ont démontré un système basé sur cette méthode qui a eu un rapport de concentration de 11. Ils pouvaient obtenir une efficacité thermique maximum

approximativement de 60% de leur système sans la charge électrique. D'ailleurs, ils ont identifié le fait qu'une des résistances thermiques principales dans leur capteur PVT était celle entre la cellule PV et le plat d'amortisseur sur lesquels il a été collé.

Une autre variation sur la ligne focalisant des collecteurs PVT est les GERÇURES (concentrant le système de la chaleur et d'alimentation) ; actuellement en service à une des résidences à l'université nationale australienne (ANU). Ce système, discuté par Coventry (2005), utilise un réflecteur parabolique de cuvette avec un module de PVT monté à son foyer. Le système a un taux de concentration de 37 et a un maximum rapport efficacité combinée de 69%.

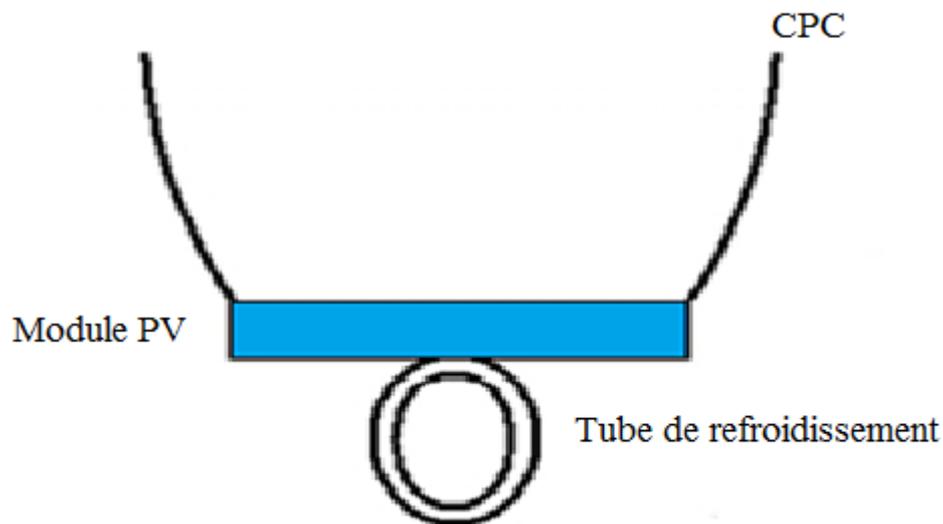


Figure II.16 : Capteurs PV/T de concentration.

Coventry a noté que le système ait eu une efficacité thermique inférieure que ceux rapportés dans d'autres études, les pertes de chaleur du système de GERÇURES où beaucoup inférieur, en raison de son plus petit secteur de chauffage. Coventry a également noté que les imperfections dans la forme de concentrateur ont eu comme conséquence l'illumination non-uniforme affectant de ce fait l'exécution électrique.

Kribus et al (2006) ont discuté la conception d'un système hybride PVT en utilisant un concentrateur parabolique de petite taille. À la différence des systèmes discutés plus tôt, leur conception de système pouvait fournir le chauffage à très hautes températures. Ils proposent que de tels systèmes puissent être employés dans des applications résidentielles pour conduire les systèmes de refroidissement à absorption.

La synthèse bibliographique sur les capteurs solaires photovoltaïques thermiques hybrides présentée nous a permis de contribuer à imaginer des voies d'évolution en vue de développer un travail de simulation par Matlab après une modélisation mathématique traitant les équations régissant le système PV/T de prototype existant au niveau de l'Unité de Développement des Equipements Solaires à Bou-Ismaïl, Tipaza ;concernant le capteur solaire PV, il est composé de cellules PV en silicium monocristallin afin d'obtenir un meilleur rendement électrique.

Chapitre III

*Modélisation mathématique
d'un capteur solaire hybride
PV/T à air*

Modélisation mathématique d'un capteur solaire hybride PV/T à air

Les capteurs solaires hybrides sont les éléments fondamentaux de transformation de l'énergie solaire en énergie thermique et électrique, permettant ainsi l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire captée.

La production de cette énergie électrique et thermique dépend des plusieurs paramètres d'entrée et de sortie : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur.

Les modèles théoriques servent à calculer ou prédire la production thermique des capteurs hybrides. Ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride

III.1. Description du système :

La figure III. 1 donne une représentation schématique d'un capteur PV/T à air. Lorsque le rayonnement solaire arrive sur les cellules solaires de modules PV, il est converti en partie en énergie électrique et en partie en énergie thermique. L'énergie électrique peut être stockée dans une batterie, tandis que l'énergie thermique disponible sur la surface arrière du module PV est absorbée par l'air circulant dans la conduite rectangulaire.

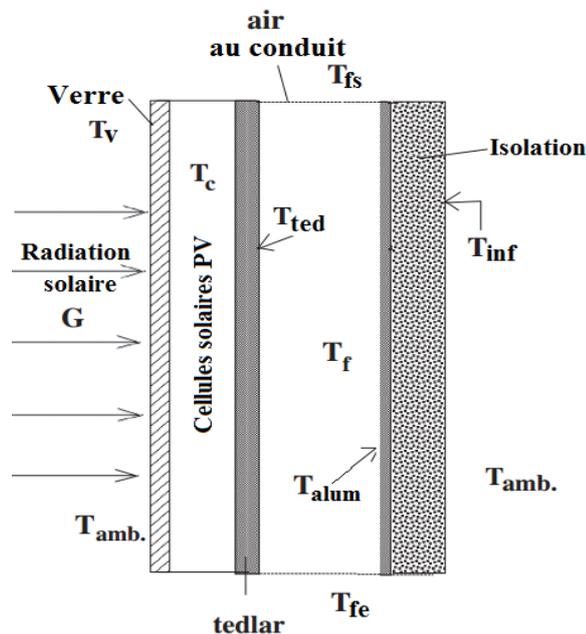


Figure III.1. Vue schématique du capteur hybride PV/T à air.

III.1.1. Composantes principales et principe de fonctionnement

Souvent, les composantes principales d'un capteur PVT sont :

- ✓ le vitrage ;
- ✓ le panneau photovoltaïque ;

- ✓ la plaque absorbante ;
- ✓ le fluide caloporteur ;
- ✓ l'isolant.

III.1.1. 1. Panneau photovoltaïque :

Le rôle du panneau photovoltaïque est de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique. Il se compose de trois couches : la première, le verre, qui est la face exposée au rayonnement incident ; la deuxième couche qui contient les cellules photovoltaïques et la troisième couche protectrice qui le tedlar. La figure III.2 montre ces trois couches PV.

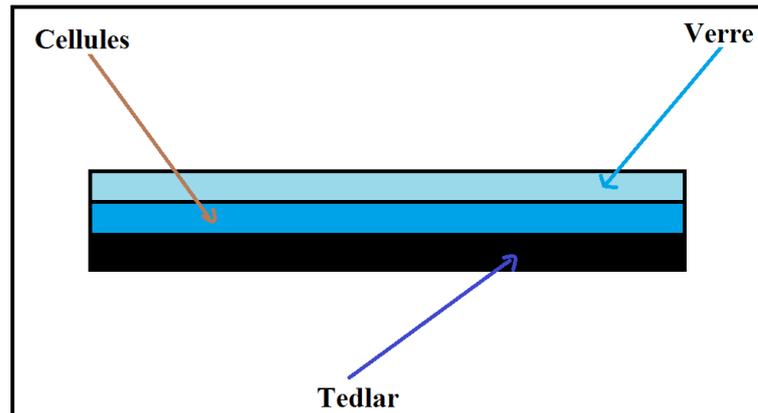


Figure III.2 : Vue des trois couches de panneau photovoltaïque

III.1.1. 2. Fluide caloporteur :

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise un fluide caloporteur qui est soit l'eau, soit l'air. La figure III.3 montre le schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur.

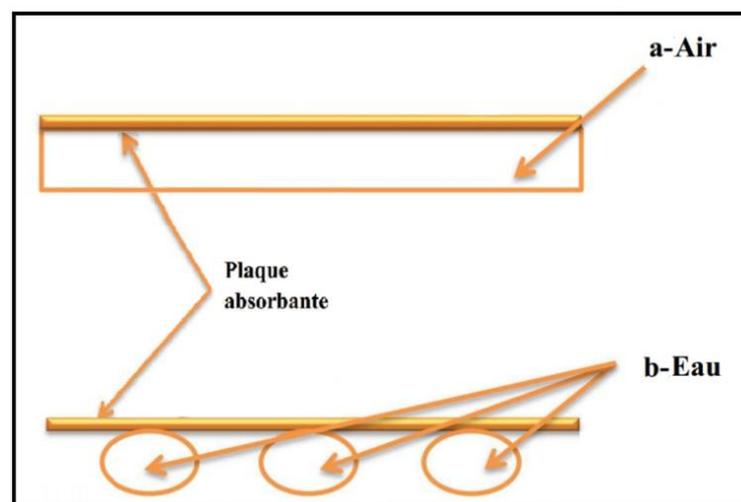


Figure III.3 : Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur :
a) à air. b) à eau.

III.1.1. 3. Isolant :

Pour minimiser les pertes thermiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolant. Le tableau III.1 donne les propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.

Tableau III.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants.

Matériau	k (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	Cp (J/kg.K)	$\alpha = (\lambda/\rho.Cp)$ (m ² /s)
Polystyrène expansé	0.04	20	1500	13.3
Laine (vêtement)	0.04	450	1880	0.47

III.2. Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque- thermique :

Les modèles théoriques permettent le calcul ou la prédiction de la production de chaleur des capteurs hybrides. Ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride [86].

La figure III.4 donne le schéma d'un capteur hybride. Il est constitué d'un capteur photovoltaïque logé dans une enceinte métallique qui englobe l'isolation thermique.

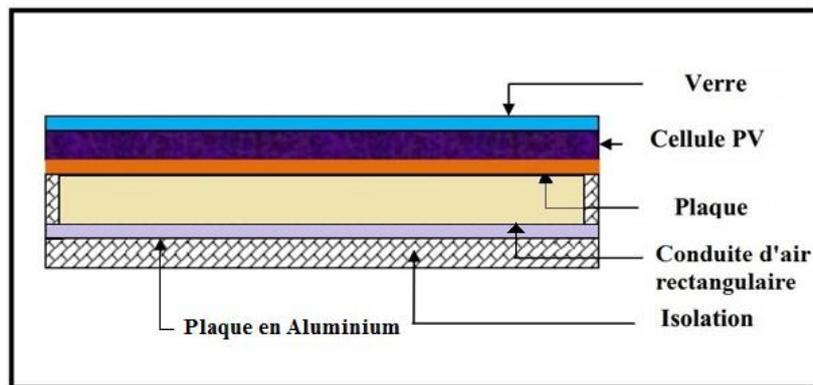


Figure III.4 : Schéma du capteur solaire hybride PVT à air existant à l'Unité de Développement des Energies Solaires.

La figure III.5 montre le schéma des couches du capteur où figurent les énergies absorbées ou produites par chacune des couches.

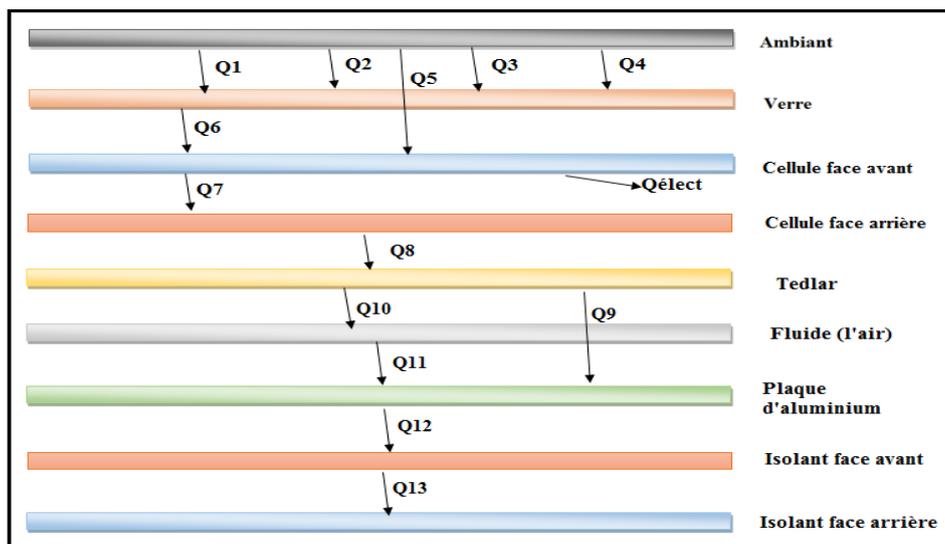


Figure III.5 : Schéma récapitulatif des énergies produites et absorbées du capteur hybride à air.

III.2.1. Bilan énergétique du capteur hybride PVT :

III.2.1. 1. Principe de l'étude thermique d'un PVT :

Le but de l'étude est de prévoir les distributions de températures dans chaque couche du capteur PVT. A cet effet, le principe de conservation d'énergie est utilisé pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie. Ainsi :

La variation d'énergie interne = l'énergie reçue – l'énergie perdue.

Sous la forme d'une équation mathématique, en considérant une section quelconque du système à l'instant t , le bilan au nœud i donne :

$$M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i \dot{Q}_i - \sum_j \dot{Q}_j \tag{3.1}$$

Où :

- M_i : Masse au nœud i ;
- C_i : Chaleur spécifique au nœud i ;
- dt : Pas de temps.

Le capteur étudié est un modèle à 9 nœuds. Les différents nœuds du capteur solaire sont indiqués sur la figure III.6 :

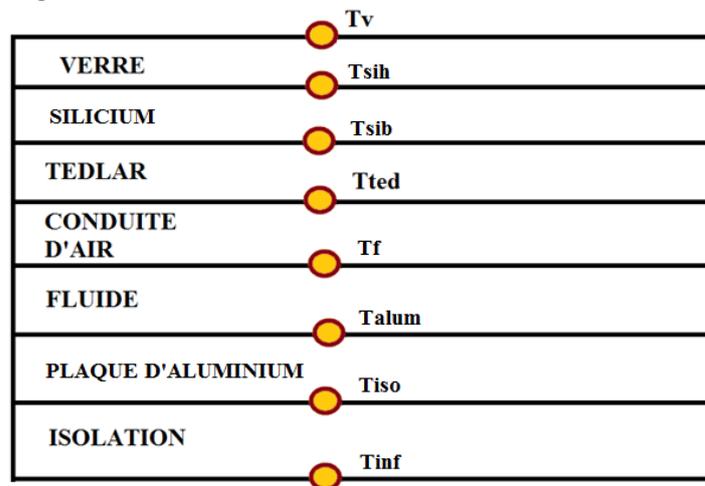


Figure III.6 : Représentation des températures des différents nœuds

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit [86] :

$$\dot{Q}_{\text{Solaire}} = A_{\text{verre}} G \tau_{\text{verre}} \alpha_{\text{cel}} \tag{3.2}$$

Où :

- A_{verre} : Surface du verre (m^2) ;
- G : Rayonnement direct totale absorbée par la cellule solaire (W/m^2) ;
- τ_{verre} : Transmittivité du verre ;
- α_{cel} : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire.

Le verre étant opaque par rapport au rayonnement émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice. Les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit :

$$Q_{\text{rad v-a}} = \sigma \varepsilon_v A_{\text{verre}} (T_v^4 - T_{\text{ciel}}^4) \quad (3.3)$$

Avec :

σ : Constante de Stefan Boltzmann en ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}^4$) ;

ε_v : Emissivité du verre ;

A_{verre} : Surface du verre en (m^2).

$$T_{\text{ciel}} = 0.0552 (T_{\text{amb}})^{1.5} \quad (3.4)$$

Les pertes thermiques par convection sont données par la loi de refroidissement de Newton entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur donnée par :

$$Q_{\text{conv v-a}} = h_0 A_v (T_v - T_a) \quad (3.5)$$

Avec :

T_v : Température du verre du capteur hybride (K) ;

T_a : Température ambiante (K) ;

h_0 : Coefficient de transfert convectif, fonction de la vitesse du vent en ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}$).

Le coefficient d'échange, $h_{c, a}$, est donné par l'expression suivante [86] :

$$h_0 = 2.8 + 3.0 V_{\text{vent}} \quad (3.6)$$

La figure III.7 montre une vue éclatée du capteur hybride photovoltaïque thermique à air. Il est constitué d'un module photovoltaïque (avec ses trois couches : couche de verre trempé, couche des cellules avec l'EVA et couche de tedlar) de type monocristallin de longueur 1.582m et de largeur 0.809 m.

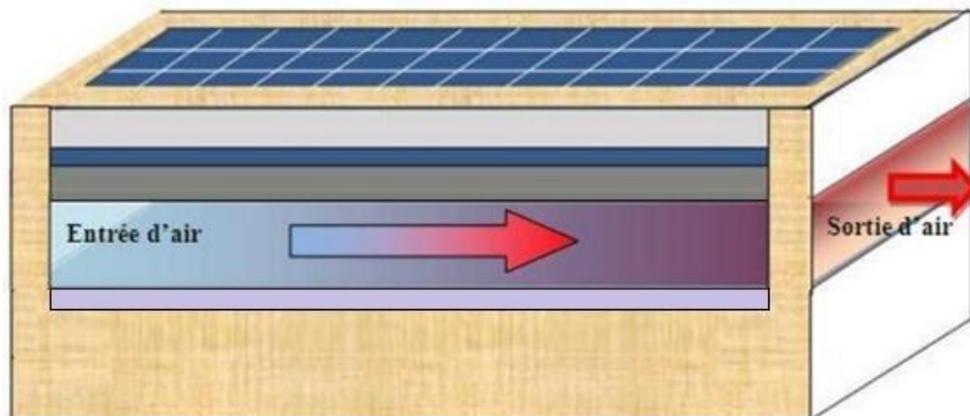


Figure III.7: Vue éclatée du nouveau capteur hybride à air.

Une isolation thermique sur tous les côtés du capteur hybride permet d'avoir de meilleures performances thermiques. L'isolation thermique est assurée par de la laine de verre. Les dimensions de ce nouveau capteur hybride sont : (2.004 X 0.863) m² L'isolation latérale : 0.0275m en laine de verre. L'isolation arrière : 0.039m en laine de verre.

Ce nouveau prototype de capteur hybride PVT [62] et [87] est une nouvelle conception qui a pour objectif l'augmentation du rendement de conversion électrique et thermique tout en minimisant le coût de sa fabrication.

Le capteur hybride photovoltaïque thermique produit de l'énergie électrique et calorifique. Le rendement de conversion est la somme des rendements électriques et thermiques.

Nous allons effectuer en premier lieu un bilan thermique pour chaque couche constituant le capteur hybride photovoltaïque thermique. Ce bilan permet d'établir le profil de température et de déterminer le rendement thermique et électrique du capteur.

Les hypothèses de travail considérées sont :

- le transfert thermique s'effectue en une seule direction de haut en bas ;
- on néglige le transfert de chaleur par conduction vers les côtés du capteur.

III.2.1. 2. Régime transitoire :

La figure III.8 montre le bilan énergétique utilisé pour les différentes couches constituant le capteur hybride. Nous avons en tout sept couches : trois couches constituant le module photovoltaïque (verre trempé, cellules au silicium, tedlar), la couche de la partie haute de l'absorbeur, le fluide caloporteur, la couche basse de l'absorbeur et enfin la couche de l'isolation.

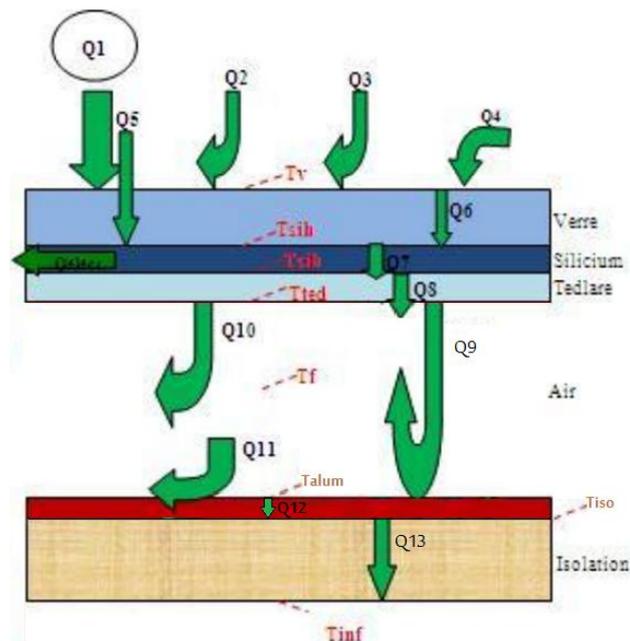


Figure III.8 : Bilan énergétique du nouveau capteur hybride PVT à air.

Les températures que nous allons calculer sont celles de la surface supérieure de la vitre (T_v), la température de la face haute et basse de la couche des cellules solaires (respectivement T_{sih} et T_{sib}), la température de la surface basse de la couche de tedlar (T_{ted}), la température moyenne du fluide caloporteur (T_f), la température de la couche d'aluminium (T_{alum}) et enfin la température externe du capteur au-dessous de l'isolation (T_{inf}).

Au niveau de la surface haute de la couche du verre, l'énergie reçue par la vitre étant celle des irradiations solaires plus une quantité de chaleur transmise à partir du ciel (à une certaine longueur d'onde) par rayonnement et à partir de l'air ambiant par convection plus un échange par rayonnement avec le sol. Une quantité de chaleur est transmise à la couche des cellules solaires par conduction. En négligeant la partie du rayonnement réfléchi par la vitre vers l'extérieur, nous aurons :

$$M_c c_v \frac{dT_v}{dt} = \dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3 + \dot{Q}_4 - \dot{Q}_5 \quad (3.7)$$

Où :

\dot{Q}_1 : Energie émise par le soleil sur le plan du capteur hybride à air ;

\dot{Q}_2 : Energie émise par le ciel par rayonnement sur le plan du capteur hybride à air ;

\dot{Q}_3 : Energie émise par l'air ambiant par convection sur le plan du capteur hybride à air ;

\dot{Q}_4 : Energie émise par le sol par rayonnement sur le plan du capteur hybride à air ;

\dot{Q}_5 : Energie émise par le soleil par rayonnement et absorbée par les cellules solaires PV.

Au niveau de la surface haute de la couche des cellules solaires, nous avons un échange par conduction à partir de la vitre et une partie du rayonnement solaire (puisque la vitre est transparente). Pour les pertes, nous avons la quantité de chaleur transmise par conduction à la face basse de la couche des cellules solaires, ce qui donne :

$$M_{si} c_{si} \frac{dT_{sih}}{dt} = \dot{Q}_5 + \dot{Q}_6 - \dot{Q}_7 \quad (3.8)$$

Où :

\dot{Q}_5 : Energie émise par le soleil par rayonnement et absorbée par les cellules solaires PV ;

\dot{Q}_6 : Quantité de chaleur transmise par conduction de la vitre à la couche haute des cellules solaires PV ;

\dot{Q}_7 : Quantité de chaleur transmise par conduction la couche haute des cellules solaires PV à la couche basse.

Au niveau de la surface basse de la couche des cellules solaires, il y a l'échange par conduction à partir de la couche haute des cellules solaires. Pour les pertes, il y a l'énergie électrique produite par le capteur hybride PVT et la quantité de chaleur transmise par conduction à la couche de tedlar. Si on néglige la transmission par convection et par rayonnement, nous aurons :

$$M_{si}c_{si} \frac{dT_{sih}}{dt} = \dot{Q}_7 + \dot{Q}_{élect} - \dot{Q}_8 \quad (3.9)$$

Où :

\dot{Q}_7 : Quantité de chaleur transmise par conduction la couche haute des cellules solaires PV à la couche basse.

\dot{Q}_8 : Quantité de chaleur transmise par conduction de la couche basse des cellules solaires PV à la surface basse du Tedlar.

Au niveau de la surface basse de la couche de tedlar nous avons l'échange par conduction à partir de la couche des cellules solaires et comme perte vers le fluide une quantité de chaleur transmise par convection et par rayonnement, nous avons :

$$M_{ted}c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = \dot{Q}_8 - \dot{Q}_9 - \dot{Q}_{10} \quad (3.10)$$

Où :

\dot{Q}_8 : Quantité de chaleur transmise par conduction de la couche basse des cellules solaires PV à la surface basse du Tedlar ;

\dot{Q}_9 : Quantité de chaleur transmise par rayonnement de la couche de tedlar à la couche d'isolant ;

\dot{Q}_{10} : Quantité de chaleur transmise par convection de la couche de tedlar vers l'air ;

Pour le fluide caloporteur, qui peut être de l'eau, de l'air ou du glycol, il y a échange par convection à partir de la couche de tedlar. Les pertes vers la couche d'aluminium sont relatives à une quantité de chaleur transmise par convection, nous aurons :

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = \dot{Q}_{10} - \dot{Q}_{11} \quad (3.11)$$

Où :

\dot{Q}_{10} : Quantité de chaleur transmise par convection de la couche de tedlar vers l'air ;

\dot{Q}_{11} : Quantité de chaleur transmise par convection de l'air chauffé à la couche de l'isolation.

Au niveau de la surface de la couche de l'aluminium, il y a un gain en énergie par convection à partir du fluide caloporteur et par rayonnement de la couche de tedlar. Les pertes vers la couche contenant l'isolation sont relatives à une quantité de chaleur transmise par conduction, nous aurons :

$$M_{alum}c_{alum} \frac{dT_{alum}}{dt} = \dot{Q}_9 + \dot{Q}_{11} - \dot{Q}_{12} \quad (3.12)$$

$$M_{iso}c_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt} = \dot{Q}_{12} - \dot{Q}_{13} \quad (3.13)$$

Où :

\dot{Q}_9 : Quantité de chaleur transmise par rayonnement de la couche de tedlar à la couche d'isolant ;

- \dot{Q}_{11} : Quantité de chaleur transmise par convection de l'air chauffé à la couche de l'isolation ;
 \dot{Q}_{12} : Quantité de chaleur transmise par conduction de la couche de la plaque d'aluminium à la couche supérieure de l'isolant du capteur hybride à air.
 \dot{Q}_{13} : Quantité de chaleur transmise par conduction de la couche de l'isolation à la face arrière du capteur hybride à air.

La masse étant égale à la masse volumique multipliée par le volume, en remplaçant les différentes quantités de chaleurs dans les équations précédentes de (3.7) à (3.13) nous aurons le système d'équations suivant :

- Sur la surface haute de la Vitre :

$$\rho_c V_c c_v \frac{dT_v}{dt} = \alpha \cdot A \cdot G + h_{rvc} \cdot S \cdot (T_{ciel} - T_v) + h_0 \cdot A \cdot (T_{amb} - T_v) + h_{rvsol} \cdot A \cdot (T_{solex} - T_v) - \frac{k_v}{e_v} \cdot A \cdot (T_v - T_{sih}) \quad (3.14)$$

- Sur la surface haute des cellules solaires :

$$M_{si} c_{si} \frac{dT_{sih}}{dt} = \tau \cdot \alpha \cdot A \cdot G + \frac{k_v}{e_v} \cdot A \cdot (T_v - T_{sih}) - \frac{k_{si}}{e_{si}} \cdot A \cdot (T_{sih} - T_{sib}) \quad (3.15)$$

- Sur la surface basse de la couche des cellules solaires :

La puissance électrique produite par le capteur hybride PVT est donnée par l'équation suivante [88]:

$$\dot{Q}_{elect} = \dot{Q}_{soleil} \cdot \eta_{réf} \cdot \exp(\beta \cdot (T_{sib} - T_{réf})) / \alpha_{si} \quad (3.16)$$

Avec : \dot{Q}_{soleil} , la quantité d'énergie absorbée par les cellules solaires au silicium constituant le capteur hybride PVT, donnée par l'équation suivante :

$$\dot{Q}_{soleil} = \tau_v \cdot \alpha_{si} \cdot G \cdot A \quad (3.17)$$

Où : G est l'éclairement global reçu sur le plan du capteur.

$$\rho_{si} V_{si} c_{si} \frac{dT_{sib}}{dt} = \frac{k_{si}}{e_{si}} \cdot A \cdot (T_{sih} - T_{sib}) - \tau_v \cdot A \cdot G \cdot \exp(T_{sib} - T_{réf}) - \frac{k_{ted}}{e_{ted}} \cdot A \cdot (T_{sib} - T_{ted}) \quad (3.18)$$

Sur la surface basse de la couche du Tedlar, on a :

$$\rho_{ted} V_{ted} c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = \frac{k_T}{e_T} \cdot A \cdot (T_{sib} - T_{ted}) - h_1 \cdot A \cdot (T_{ted} - T_f) - \delta \cdot A \cdot (T_{ted}^4 - T_{iso}^4) \quad (3.19)$$

Pour l'air circulant à l'intérieur du capteur, on a :

$$\rho_f V_f c_f \frac{dT_f}{dt} = h_1 \cdot A \cdot (T_{ted} - T_f) - h_2 \cdot A \cdot (T_f - T_{iso}) \quad (3.20)$$

En termes d'espace suivant la direction des x on a :

$$\rho_f V_f c_f \frac{dT_f}{dx} = w [h_1 (T_{ted} - T_f) + h_2 (T_{alum} - T_f)] \quad (3.20.1)$$

La résolution de cette equation est simple, elle est de premier ordre sa solution se fait par integration et elle est de la forme suivante :

$$T_f(x) = (T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2}) e^{-\frac{w}{mCp}(h_1 + h_2)x} + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \quad (3.20.2)$$

Au milieu de la plaque on obtient la valeur moyenne de cette température, sa valeur est obtenue en faisant son intégrale de 0 à L comme suit :

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx = -\frac{1}{L} \frac{mCp}{(h_1 + h_2)} \left(T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) \left(e^{-\frac{w}{mCp}(h_1 + h_2)L} - 1 \right) + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} L \quad (3.20.3)$$

Pour la couche d'aluminium, on a :

$$\rho_{alum} V_{alum} C_{alum} \frac{dT_{alum}}{dt} = h_2 \cdot A \cdot (T_f - T_{alum}) + \delta \cdot A \cdot (T_{ted}^4 - T_{alum}^4) - (A \cdot (T_{alum} - T_{iso})) / \left(\frac{e_{alum}}{k_{alum}} \right) \quad (3.21)$$

Pour la couche d'isolant, on a :

$$\rho_{iso} V_{iso} C_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt} = \frac{A \cdot (T_{alum} - T_{iso})}{\frac{e_{alum}}{k_{alum}}} - \frac{A \cdot (T_{iso} - T_{inf})}{\frac{e_{iso}}{k_{iso}}} \quad (3.22)$$

Avec :

T_{inf} , la température extérieure de la face inférieure (arrière) du capteur PVT à air.

La solution du système d'équations (3.14) à (3.22) permet la détermination du profil de température pour chaque couche du nouveau capteur hybride à air, le rendement thermique instantané ainsi que les puissances, thermique et électrique, produites par le capteur.

III.2.1.3. Régime permanent :

Pour modéliser le système en régime permanent, un certain nombre d'hypothèses est considéré :

- Le système étant en état d'équilibre ;
- Aucune variation de température le long de la largeur de chaque élément ;
- les pertes secondaires du système sont négligées ;
- Le produit de la transmittivité et l'absorptivité efficace $(\tau\alpha)_{eff}$, est constante ;
- Les pertes de chaleur de la partie supérieure et arrière du capteur se font à la température ambiante ;
- Le flux d'air est uniforme à l'intérieur du conduit ;
- La vitesse du vent est uniforme au-dessus et en dessous du capteur ;
- Le transfert de chaleur à l'intérieur, par convection naturelle, est négligé.

Le circuit de résistances thermiques du modèle thermique développé est représenté sur la figure III.9.

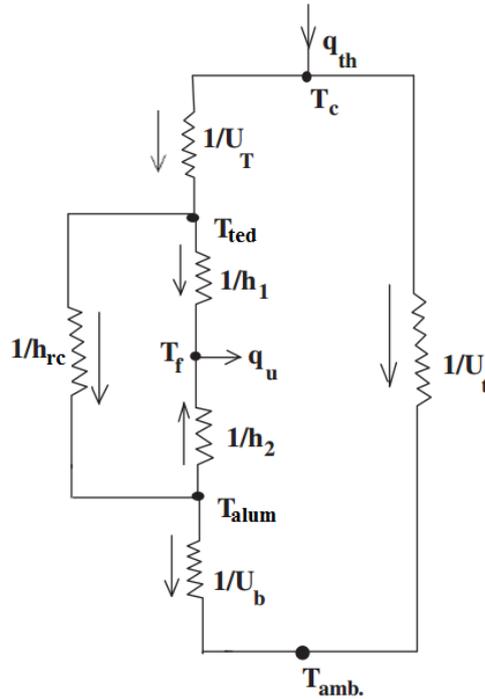


Figure III.9: Schéma électrique équivalent du capteur hybride photovoltaïque/thermique.

Le modèle mathématique utilisé est similaire à celui de Sarhaddi et al. [89], Joshi et al. [90], Duffie et Beckman [91], et Goh et al. [92] avec deux améliorations à savoir : prise en compte du transfert de chaleur par rayonnement entre la surface arrière du module PV et la surface intérieure de l'isolation (h_{rd}), ainsi que des coefficients de transfert de chaleur par convection à partir de ces surfaces pour le fluide en mouvement (exemple de h_1 et h_2). En régime permanent, on aura :

$$T_c = \frac{q_{th} + U_t T_{amb} + U_T T_{ted}}{U_t + U_T} \quad (3.23)$$

T_c : est la température de la cellule solaire.

T_{ted} : est la température du tedlar relative à la face de la conduite d'air, donnée par :

$$T_{ted} = \frac{U_T T_c + h_1 T_f + h_{rc} T_{alum}}{U_T + h_1 + h_{rc}} \quad (3.24)$$

T_{alum} : est la température intérieure de l'isolation (couche d'alum) de la face relative à la conduite d'air rectangulaire, exprimée par :

$$T_{alum} = \frac{U_b T_{amb} + h_2 T_f + h_{rc} T_{ted}}{U_b + h_2 + h_{rc}} \quad (3.25)$$

La figure III.10 montre le bilan thermique suivant la direction x de l'air à l'intérieur de la conduite.

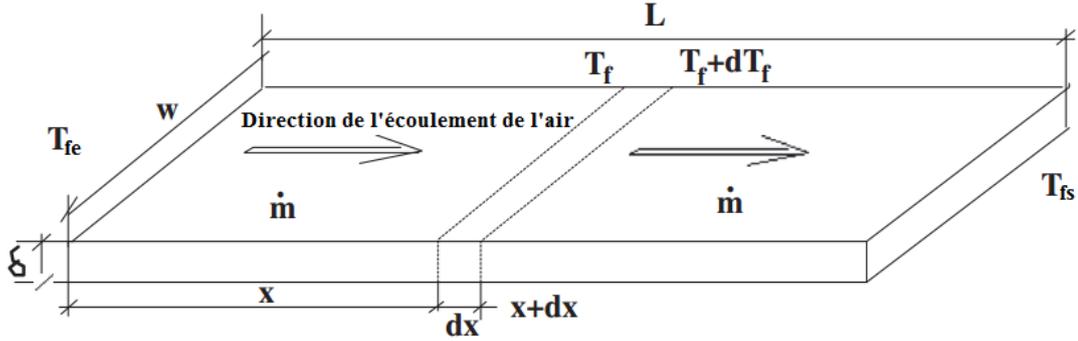


Figure III.10 : Bilan suivant la direction x de l'air à l'intérieur de la conduite.

En se référant à la figure III.10, l'équation du bilan d'énergie pour un élément de volume d'air à l'intérieur de la conduite peut être écrite comme suit :

$$\dot{m}C_p \frac{dT_f}{dx} = w[h_1(T_{ted} - T_f) + h_2(T_{alum} - T_f)] \quad (3.26.1)$$

Cette équation est la même obtenue en (3.20.1) sa résolution est simple, elle est de premier ordre sa résolution se fait par intégration directe et elle est de la forme suivante :

$$T_f(x) = (T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2}) e^{\frac{-w}{\dot{m}C_p}(h_1 + h_2)x} + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \quad (3.26.2)$$

Au milieu de la plaque on obtient la valeur moyenne de cette température, sa valeur est obtenue en faisant son intégrale de 0 à L comme suit :

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx = -\frac{1}{L} \frac{\dot{m}C_p}{(h_1 + h_2)} \left(T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) \left(e^{\frac{-w}{\dot{m}C_p}(h_1 + h_2)L} - 1 \right) + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} L \quad (3.26.3)$$

Où :

\dot{m} : Le débit massique d'air (kg/s) ; C_p : la capacité calorifique spécifique de l'air (J / kg K) ;
 h_1 : le coefficient de transfert de chaleur convectif à partir du module surface arrière au fluide en mouvement (W/m²K) ; h_2 : le coefficient de transfert de chaleur convectif de la surface intérieure du matériau d'isolation au fluide en mouvement (W/m² K) ; h_{rc} : le coefficient de transfert de chaleur radiatif entre le module surface arrière et la surface intérieure de l'isolation (W/m²K) ; q_{th} : le flux d'énergie thermique absorbé par unité de surface (W/m²) ;
 T_{amb} : la température ambiante (°C) ; T_f : la température du fluide (°C) ; U_b : le coefficient de perte arrière global de la surface intérieure de l'isolation jusqu'à la température ambiante (W / m² K) ; U_i : le coefficient de perte global supérieure de la cellule solaire à couvercle en verre (W / m² K) ; U_T : le coefficient de transfert de chaleur par conduction à travers cellule solaire et tedlar (W / m² K) ; w : la largeur du collecteur (m) et x est la distance le long du collecteur (m).

Les températures T_c , T_{ted} , T_{alum} et T_f sont dépendantes de la variable, x . La substitution des Equations (3.23), (3.24), (3.25) dans l'équation. (3.26) donne une équation différentielle linéaire à coefficients constants, qui peut être résolu analytiquement [93] en considérant la condition aux limites de $T_f = T_{fin}$ en $x = 0$.

Le gain en densité de flux de chaleur (q_u) est calculé comme suit :

$$q_u = q_{th} - U_t(T_c - T_{amb}) + U_b(T_{alum} - T_{amb}) \quad (3.27)$$

Le taux de chaleur absorbée par unité de surface (q_{th}) est :

$$q_{th} = S - E_c \quad (3.31)$$

Avec :

$$S = (\tau\alpha)_{eff}G \quad (3.28)$$

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau_g\alpha_c\beta_c + \tau_g\alpha_T(1 - \beta_c) \quad (3.29)$$

$$E_c = \tau_g\beta_c\eta_eG \quad (3.30)$$

S, est le taux d'énergie totale absorbée par unité de surface (W / m^2) ; G, le rayonnement solaire global incident (W / m^2) ; E_c , le taux d'énergie électrique disponible par unité de surface (W / m^2) ; β_c , le facteur d'emballage des cellules solaires, et η_e le rendement électrique.

Les coefficients de transfert de chaleur dans les équations. (3.23) à (3.25) sont :

$$U_T = \left[\frac{e_c}{k_c} + \frac{e_T}{k_T} \right]^{-1} \quad (3.32)$$

$$U_t = \left[\frac{e_v}{k_v} + \frac{1}{(h_{rvc} + h_0)} \right]^{-1} \quad (3.33)$$

$$U_b = \left[\frac{e_i}{k_i} + \frac{1}{(h_0)} \right]^{-1} \quad (3.34)$$

$$h_0 = 2.8 + 3V_{vent} \quad (3.35)$$

Où : e_c et k_c désignent respectivement, l'épaisseur et la conductivité thermique de la cellule solaire ; e_T et k_T , l'épaisseur et la conductivité thermique de Tedlar ; e_v et k_v l'épaisseur et la conductivité thermique du verre ; e_i et k_i , l'épaisseur et la conductivité thermique du matériau isolant ; h_{rvc} , le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement à partir du couvercle en verre à la température ambiante ; h_0 , le coefficient convectif de transfert de chaleur du couvercle en verre à la température ambiante.

Le coefficient de transfert de chaleur par convection h_1 , est déterminé à partir du nombre de Nusselt, en utilisant la corrélation de Dittus-Boelter [94] ou celle de Kays- Crawford pour un écoulement turbulent [91]. Le flux de chaleur est :

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_{fs} - T_{fe}) \quad (3.36)$$

Le rendement thermique est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{GA} = \frac{\bar{q}_u}{G} \quad (3.37)$$

Où : A et \bar{q}_u sont la surface du capteur (m^2), et la densité de flux de chaleur utile par unité de surface.

Les températures du verre et de l'isolant thermique arrière sont :

$$T_v = T_c - U_t(T_c - T_{amb}) \frac{e_g}{k_g} \quad (3.38)$$

$$T_{inf} = T_i - U_b(T_{alum} - T_{amb}) \frac{e_i}{k_i} \quad (3.39)$$

La température moyenne peut être déterminée en utilisant la température moyenne du fluide :

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx \quad (3.40)$$

Où : L est la longueur du capteur :

Dans la cadre de ce projet, des améliorations ont été faites sur les modèles thermiques utilisés précédemment pour le capteur PV / T. Ces améliorations sont :

1. Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, h_{rvc} de la couverture en verre à la température ambiante est calculée comme suit [95, 91, 94]:

$$h_{rvc} = \sigma \varepsilon_g \frac{(T_v + T_{ciel})(T_v^2 - T_{ciel}^2)(T_v - T_{ciel})}{(T_v - T_{amb})} \quad (3.41)$$

Cette relation est plus précise que l'équation approximative de Sarhaddi et al. [89]. Elle concerne les températures du ciel et la température ambiante.

2. La température du ciel efficace est [91] :

$$T_{ciel} = T_{amb} [0.711 + 0.0056T_{dp} + 0.000073T_{dp}^2 + 0.013 \cos(15t)]^{1/4} \quad (3.42-a)$$

Où : T_{ciel} et T_{amb} sont en (K), T_{dp} est la température du point de rosée en ($^{\circ}$ C) et t en (h) à partir de minuit.

L'équation (3.42-a) peut donner des résultats plus précis pour la température du ciel que les équations suivants, utilisés dans la littérature:

$$T_{ciel} = 0.0552 (T_{amb})^{1.5} \quad (3.42-b)$$

$$T_{ciel} = T_{amb} - 6 \quad (3.42-c)$$

Les équations (3.42-b) et (3.42-c) sont applicables pour le climat humide seulement. L'équation de travail (3.42-a) est adoptée lorsque la température du point de rosée ou l'humidité relative est disponible, autrement c'est l'équation (3.42-b) qui sera utilisée.

3. Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, h_{rc} entre les surfaces intérieures de la conduite d'air est considéré [95, 91, 94]. Il est donné par :

$$h_{rc} = \sigma \frac{(T_{ted} + T_{alum})(T_{ted}^2 + T_{alum}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (3.43)$$

Où : ε_1 et ε_2 sont les émissivités des surfaces intérieures du conduit d'air.

4. Le coefficient convectif de transfert de chaleur, h_2 est ajouté à partir de la surface intérieure du matériau d'isolation au fluide en mouvement qui peut être calculé de façon similaire au calcul de h_1 .

5. Le coefficient d'échange global, U_L , est déduit des pertes thermiques [91] :

$$\bar{q}_u = q_{th} - U_L(\bar{T}_c - T_{amb}) \quad (3.44)$$

D'où :

$$U_L = \frac{q_{th} - \bar{q}_u}{\bar{T}_c - T_{amb}} \quad (3.45)$$

6. La vitesse du vent est prise toutes les heures de la journée. Contrairement aux travaux donnés par [89], où elle est considérée constante. Le coefficient de transfert de chaleur (h_0) est affecté par la vitesse du vent comme dans l'équation (3.35).

Le débit massique du fluide en mouvement à l'intérieur du conduit d'air est calculé en fonction de la vitesse de l'air et la surface d'écoulement en section transversale effective, tandis que, dans la référence [89], la surface en coupe transversale a été calculée en fonction du diamètre hydraulique. Cela affecte le bilan de masse dans le conduit d'air.

III.2.1.4. Caractéristiques des capteurs et solution approchée :

En plus des températures des éléments du capteur et de l'efficacité thermique, certaines caractéristiques importantes du PV/T ont été calculées à savoir [91] :

1. Le coefficient d'échange global, U_L , est calculé à partir de l'équation (3.45).

2. Le facteur d'efficacité, F' est donné par :

$$F' = \frac{\bar{q}_u}{q_{th} - U_L(\bar{T}_f - T_{amb})} \quad (3.46)$$

$F'=1$ lorsque $U_L=0$

3. Le facteur de flux, F'' est donné par :

$$F'' = CR(1 - e^{-1/CR}) \quad (3.47)$$

Où : CR est le taux de capacité du capteur, donné par :

$$CR = \frac{\dot{m}C_p}{AU_L F'} \quad (3.48)$$

Notons que : $F''=1$ quand $CR \geq 100$.

4. Le facteur d'extraction de la chaleur est défini par :

$$F_R = F' F'' = \frac{\bar{q}_u}{q_{th} - U_L(T_{fe} - T_{amb})} \quad (3.49)$$

$F_R=F'$ quand $CR \geq 100$.

III.2.1.4.1. Solution approximative

La solution approchée pour le modèle thermique peut être trouvée dans [91]. En comparant l'équation (3.44) à l'équation (3.27), on déduit le coefficient de déperdition de chaleur global :

$$U_L = U_t + U_b \quad (3.50)$$

L'expression du facteur d'efficacité peut être écrite comme suit :

$$F' = \frac{h_1 h_2 + h_{rc}(h_1 + h_2)}{h_1 h_2 + h_{rc}(h_1 + h_2) + U_L(h_2 + h_{rd})} \quad (3.51)$$

Ainsi, le taux d'énergie utile est donné par :

$$\dot{Q}_u = A * F_R [q_{th} - U_L(T_{fe} - T_{amb})] \quad (3.52)$$

Les températures, moyenne et de sortie, du fluide, celle de la cellule, et la température de surface arrière du capteur sont données par les expressions :

$$T_{fs} = T_{fe} + \frac{Q_u}{\dot{m}C_p} \quad (3.53)$$

$$\bar{T}_f = T_{fe} + \frac{\bar{q}_u}{F_R U_L} (1 - F'') \quad (3.54)$$

$$\bar{T}_c = T_{fe} + \frac{\bar{q}_u}{F_R U_L} (1 - F_R) \quad (3.55)$$

$$\bar{T}_{ted} = \bar{T}_c \quad (3.56)$$

III. 2.1.4.2. Performance thermiques du capteur hybride

Les paramètres nécessaires pour la détermination des performances thermiques du capteur hybride sont, la température d'entrée et de sortie de l'air, le volume du fluide qui s'écoule à travers le capteur, et l'éclairement solaire. Le rendement est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}C_{air}(T_{fs} - T_{fe})}{A G} \quad (3.57)$$

III.3. Modèle électrique

Les paramètres électriques du capteur PV/T se trouvent dans le modèle électrique du module photovoltaïque. Le circuit électrique équivalent de la figure III.11 est utilisé pour décrire les caractéristiques I-V représentés sur la Figure III.12 [89,91]. Le courant est donné par :

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_S}{a}} - 1 \right) - \frac{V + IR_S}{R_{sh}} \quad (3.58)$$

Quant à la puissance de sortie, elle est exprimée par :

$$P = IV \quad (3.59)$$

Où : (I_L , I_0 , a , R_s , r_{sh} , I_D , I_{sh}) sont le courant de la lumière, courant de la diode de saturation inverse, le facteur d'idéalité modifié, la résistance série, shunt résistance du module PV, le courant de diode et le courant shunt respectivement. Ces paramètres doivent être trouvés d'abord aux conditions de référence ($G_{ref} = 1000 \text{ W/m}^2$, et $T_{c, ref} = 25 \text{ °C}$) et converties aux conditions de fonctionnement du modèle.

Les cinq conditions aux limites de référence suivants sont utilisés pour définir (A_{ref} , $I_{L,ref}$, $I_{0,ref}$, $R_{S,ref}$ et $R_{sh,ref}$): [91].

1. Au court-circuit: $I = I_{sc, ref}, V = 0$;
2. A circuit ouvert: $I = 0, V = V_{oc, ref}$;
3. Au point de puissance maximale: $I = I_{mp, ref}, V = V_{mp, ref}$;
4. Au point de puissance maximale : $\frac{dP}{dV_{mp}} = 0$;
5. En circuit ouvert :

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \beta = \frac{V_{oc}(T_{c,ref} + \Delta T) - V_{oc}(T_{c,ref})}{\Delta T} \quad (3.60)$$

Où: ΔT est l'écart de température.

Substituer chacune des conditions ci-dessus dans l'équation (3.58), un ensemble de cinq équations non linéaires seront ainsi obtenus. Ces équations sont résolues numériquement.

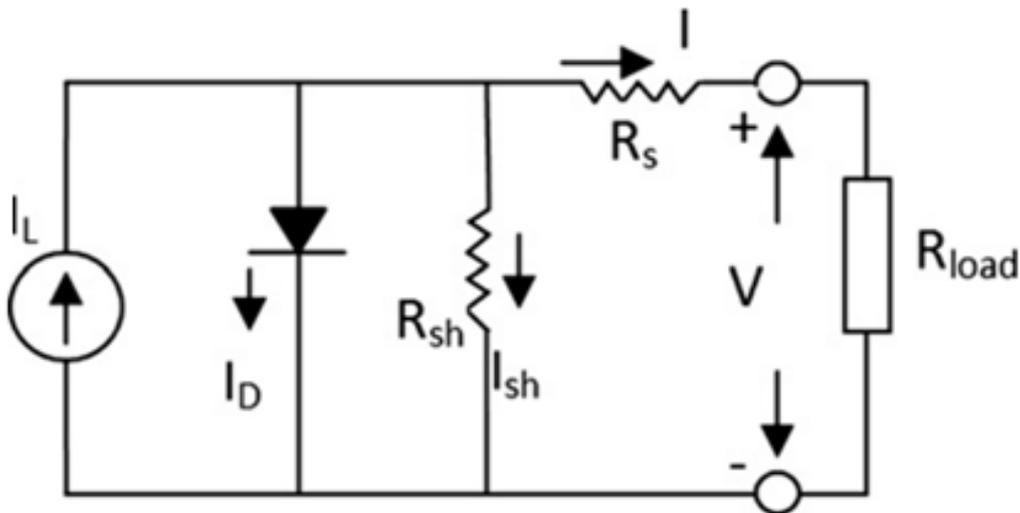


Figure III.11 : Circuit électrique équivalent d'un module PV.

Sarhaddi et al. [87] ont utilisé la pente de la courbe IV à un court-circuit qui est approximativement égale à $(-1/R_{sh})$ pour la cinquième condition aux limites. Cependant, à cause des problèmes d'instabilité, les résultats obtenus sont inexacts. L'utilisation du coefficient de la tension de température (β) pour la cinquième condition permet de conduire à une convergence stable.

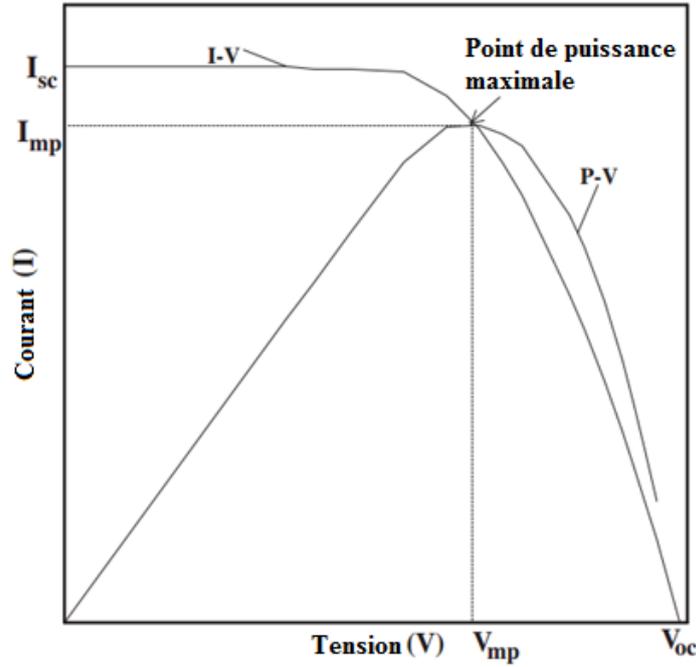


Figure III.12 : Courbe caractéristique de courant-tension typique (I-V) d'un module photovoltaïque.

Afin de calculer les paramètres du modèle à l'état de fonctionnement (G et T_c), les relations suivantes sont utilisées [91].

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (3.61)$$

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} [I_{L,ref} + \alpha(T_c - T_{c,ref})] \quad (3.62)$$

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left(\frac{T_c}{T_{c,ref}}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g}{KT_T} - \frac{E_g}{KT_{Tc}}\right) \quad (3.63)$$

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - C(T_c - T_{c,ref}) \quad (3.64)$$

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S} \quad (3.65)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (3.66)$$

Où : E_g , C et K sont respectivement l'énergie de la bande interdite de silicium, le coefficient de température pour l'énergie de bande interdite, et la constante de Boltzmann. Etant donné que le produit de la transmittivité-absorptivité efficace $(\tau\alpha)_{eff}$ est supposé constant, le rapport de l'énergie absorbée S/S_{ref} est égal au rapport du rayonnement solaire incident G / G_{ref} . Les équations (3.60) - (3.65) donnent des résultats plus précis que ceux utilisés dans [89]. Les caractéristiques de la courbe IV dans les conditions opératoires sont ensuite déterminées en utilisant les paramètres de modèles correspondants. Le rendement électrique du modèle PV (au point de puissance maximale) est donné par :

$$\eta_e = \frac{P_{mp}}{A_m G} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{A_m G} \quad (3.67)$$

Le facteur de remplissage FF relatif à la puissance maximale, P_{mp} , à la tension de circuit ouvert, les V_{oc} et le court-circuit I_{sc} , Ce facteur est calculé comme suit :

$$FF = \frac{P_{mp}}{V_{oc}I_{sc}} \quad (3.68)$$

Le coefficient de température du rendement de puissance maximale est approché par [19] :

$$\gamma = \eta_{mp,ref} \frac{\beta}{V_{mp,ref}} \quad (3.69)$$

Le rendement électrique au point de puissance maximale pour l'état de fonctionnement est :

$$\eta_{mp} = \eta_{mp,ref} + \gamma(T_c - T_{c,ref}) = \eta_e \quad (3.70)$$

Où :

$$\eta_{mp,ref} = \frac{P_{mp,ref}}{A_m G_{ref}} = \frac{V_{mp,ref} I_{mp,ref}}{A_m G_{ref}} \quad (3.71)$$

Les équations précédentes décrivent le modèle électrique et thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique suivant la configuration du système d'étude. Un programme informatique a été élaboré permettant ainsi la simulation du comportement de notre capteur hybride.

III.4. Simulation numérique :

Il est à souligner que les modèles, thermique et électrique, du capteur PV / T sont dépendants. Le modèle thermique a besoin de l'efficacité électrique du modèle électrique tandis que celui-ci a besoin de la température de la cellule à partir du modèle thermique. Les calculs des coefficients de transfert de chaleur nécessitent des valeurs initiales de température et de l'efficacité électrique. En outre, les propriétés des fluides sont évaluées aux valeurs moyennes. Un programme informatique est développé en utilisant *Matlab* [96]. Les données d'entrée pour le programme d'ordinateur comprennent les valeurs de configuration de conception du PV / T et les conditions de fonctionnement horaires tels que : le rayonnement solaire, la température ambiante, la température de rosée, la température d'entrée d'air, la vitesse de l'air à l'intérieur du conduit et la vitesse du vent. L'efficacité globale du capteur est calculée en convertissant tout d'abord le rendement électrique son équivalent en thermique puis en ajoutant celle-ci à l'efficacité thermique. : Il est donné par

$$\eta_G = \eta_{th} + \eta_{e,th} = \eta_{th} + \frac{\eta_e}{C_f} \quad (3.72)$$

Où : C_f est le facteur de conversion = 0.36 [89,90] d'autres auteurs considèrent $C_f = 0.4$. [73] Dans le cadre de notre simulation nous avons considéré $C_f = 0.36$.

Chapitre IV

*Descriptif du banc d'essai expérimental
de l'UDES de Bou-Ismaïl*

Présentation du dispositif expérimental

Le banc d'essai expérimental, objet de l'étude, est relatif à un capteur hybride photovoltaïque – thermique (PVT). Il est réalisé au laboratoire EAS de la Division EER de l'Unité de développement des équipements solaires de Bousmail, Tipaza ; Algérie.

IV.1. Descriptif du capteur hybride :

Le capteur hybride, élément principal du banc d'essai expérimental, est constitué essentiellement d'un module photovoltaïque de modèle JT-185M de JINTECH SOLAR, en technologie monocristallin. Le fluide caloporteur (air) circule à l'intérieur d'une canalisation rectangulaire au-dessous du tedlar du module PV et capte la chaleur émise par les cellules solaires. Le refroidissement des cellules est ainsi assuré et le rendement électrique sera alors amélioré. On parle de rendement total de conversion pour les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques qui est égal à la somme du rendement électrique équivalent converti et du rendement thermique. La figure IV.1 montre une photo du capteur utilisé au sein de l'UDES (Unité de développement des équipements solaires) de Bousmail, Tipaza.



Figure IV.1 : Photo du capteur PVT : capteur PV témoin orienté à 30° au sein de l'UDES.

Les cellules photovoltaïques utilisées sont en silicium monocristallin. Elles sont laminées entre une plaque de verre trempé de haute transmittivité à la face avant et une feuille de Tedlar à la face arrière. Le cadre du capteur est en aluminium afin d'assurer un montage facile sur toute la structure. Une enceinte en aluminium contient le fluide à chauffer au-dessous du module photovoltaïque. L'isolant thermique utilisé est de la mousse de polyuréthane.

Le banc d'essai est composé d'un capteur hybride fabriqué à partir d'un capteur photovoltaïque que l'on loge dans une enceinte en métal qui contient deux isolations thermiques : une isolation latérale de 2.3 cm et une isolation inférieure d'épaisseur de 3.5 cm. Toute l'isolation est en mousse polyuréthane.

La figure IV.2– A montre une prise de vue, au sein de l'Unité de Développement des Energies Solaires, du capteur photovoltaïque de puissance maximale de 185 W.

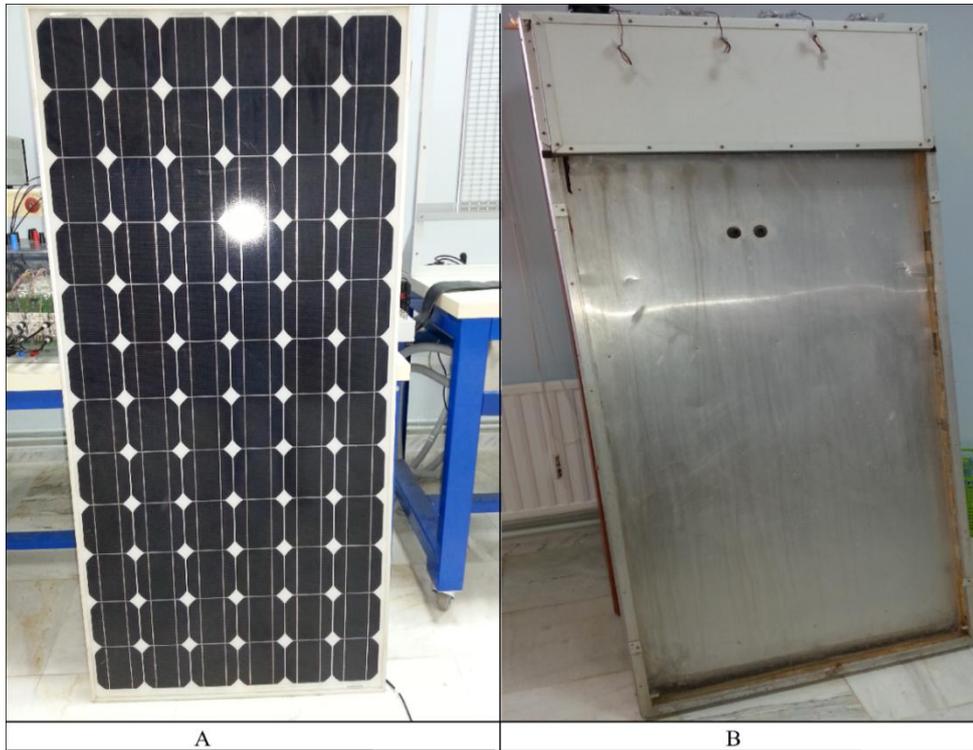


Figure IV.2 : Photo montrant les deux parties du capteur hybride avant montage.
A : panneau PV 185W, B : Socle de la partie thermique à air du laboratoire EAH.

La circulation d'air dans le capteur se fait par convection forcée. Elle est assurée par quatre petits ventilateurs à courant continu de tension 12V à la sortie de la canalisation d'air répartie de façon homogène. La figure IV.3 montre la disposition des ventilateurs à la sortie du canal d'air.



Figure IV.3 : Répartition des ventilos de 12V à la sortie du canal d'air.

Une alimentation de type Multimatrix Dual Output Adjustable DC Power Supply est utilisée pour alimenter les ventilateurs de façon réglable par les valeurs des données de tension et d'intensité de courants commandés manuellement. la figure suivante représente sa

photo prise au niveau du banc d'essai à l'Unité Développement des Energies Solaires Bou-Ismail. La figure IV. 3 montre le système de régulation de débit des ventilateurs utilisés.



Figure IV.4 : Alimentation Multimetrix XA3052 des ventilateurs contrôlant le débit d'air dans la canalisation.

IV.1.1. Caractéristiques électriques et dimensions du capteur:

Les caractéristiques sont mesurées suivant les spécifications internationales à un niveau d'ensoleillement de 1000 W/m^2 , un spectre de AM 1.5 et une température de 25°C . La composition du module est de : 2×36 cellules au silicium monocristallin en série. La surface du module est : $(1581 \times 809) [\text{mm}^2]$. Le tableau IV.1 donne quelques caractéristiques techniques du module PV 185M.

Tableau IV.1 : Quelques caractéristiques électriques du module PV 185M.

Courant de court-circuit : I_{sc}	5.76 A
Tension circuit ouvert : V_{oc}	43.2 V
Courant à puissance maximale : I_m	5.14 A
Tension à puissance maximale : V_m	36 V
Puissance maximale : P_m	185 W
WcFill factor : FF	$\geq 72\%$
Rendement électrique du module	14.4%

Le tableau IV.2 donne les composantes ainsi que les dimensions du capteur PVT utilisé dans le dispositif expérimental de l'étude.

Tableau IV.2 : Dimensions du capteur PVT et de ses composants.

Composants \ Dimensions	Longueur (mm)	Largeur (mm)	Epaisseur (mm)
Capteur PV/T à air	2004	858	85
Capteur PV	1581	809	40
Conduite d'air rectangulaire	1581	809	40
Entrée d'air	809	38	43

IV.2. Dispositifs de mesure :

IV.2.1. Unité d'acquisition de données Fluke Hydra :

Afin d'assurer l'acquisition et le stockage des valeurs des paramètres issus des capteurs de mesure, nous avons utilisé une centrale d'acquisition de données de type, Fluke Hydra séries II N°2645A, pour l'acquisition de l'ensemble des paramètres. Elle possède également une interface de connexion avec le micro-ordinateur. La figure IV.5 montre une photo de l'unité d'acquisition.



Figure IV.5 : Unité d'acquisition des données : A-vue de face, B-vue de dessus, C-vue d'arrière.

L'unité d'acquisition de données Hydra (modèle 2645A) est un appareil multi-canal permettant de mesurer des tensions continues et alternatives, des températures (par

thermocouple ou par sonde à résistance), des résistances et des fréquences. Elle comporte 21 canaux de mesure, 9 lignes d'E/S numériques, une entrée de totalisation et 4 lignes de sortie d'alarme. Elle est facilement transportable et peut s'alimenter sur secteur aussi bien que sur batterie. Elle peut être connectée un IEEE-488. Cette dernière est reliée par cassette liée par des fils-rallonge aux thermocouples de type K dont les sondes sont placées dans les emplacements où les températures doivent être mesurées. La figure IV. 6 montre l'emplacement des thermocouples de type K pour la mesure de températures.

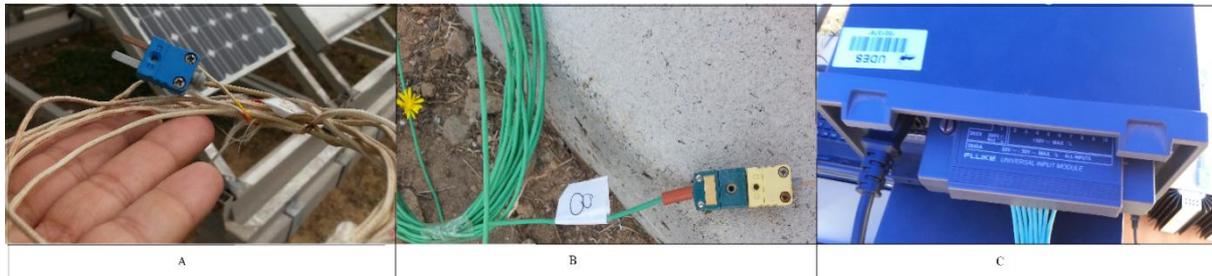


Figure IV.6 : Instruments de mesure de températures : A-thermocouple type K ; B-liaison thermocouple-rallonge ; C-liaison rallonge-cassette-acquisition.

La figure IV.7 montre une photo relative à l'emplacement des sondes de thermocouples à la sortie d'air ventilé.



Figure IV.7 : Photo de l'emplacement des sondes des thermocouples à la sortie d'air ventilé.

L'unité est équipée d'une cassette liant cette dernière aux fiches de rallonge des thermocouples, afin de convertir les signaux en données numériques de températures à l'aide d'une carte électronique installée dans l'ordinateur. L'interface *Fluke Hydra Logger* permet l'enregistrement de ces données en fichier *Excel.xlsx* et le tracé rapide des différentes températures durant la durée d'enregistrement de la journée pré-indiquée. La figure IV.8 montre l'interface *Fluke Hydra Logger* et son tracé de graphes.

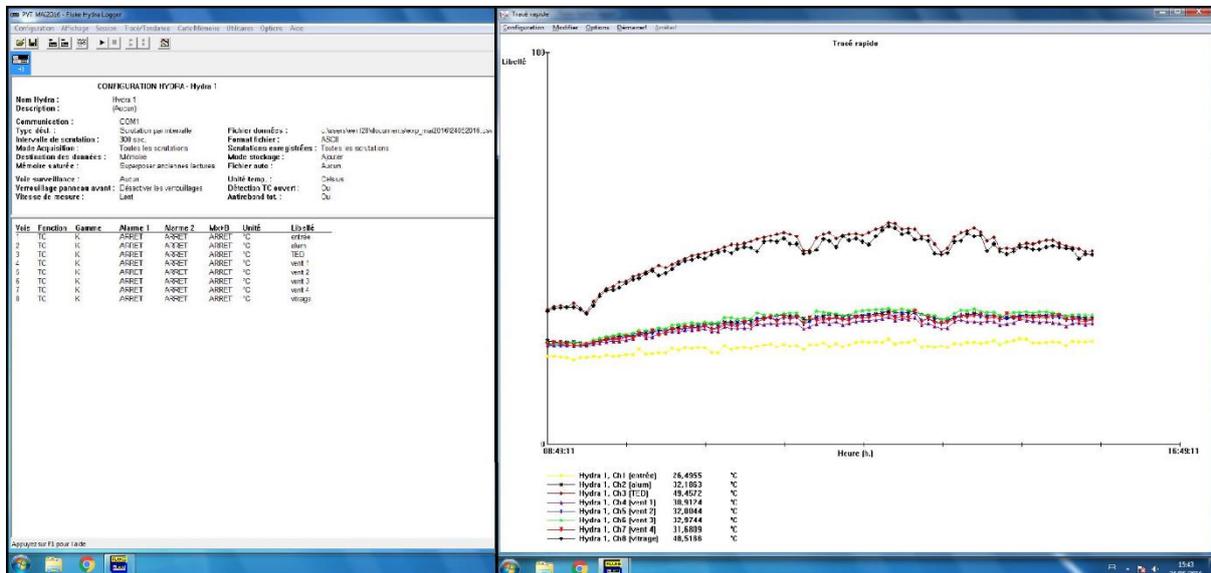


Figure IV.8 : Interface *Fluke Hydra Logger* et son tracé rapide des températures pour la journée du 24 mai 2016.

Le rayonnement global est mesuré par un pyranomètre de type Kipp&Zonen au niveau de la station météorologique de l'UDES.

IV.2.2. Mesure de débit :

Pour mesurer la quantité d'air passant sur la canalisation rectangulaire durant le fonctionnement de l'installation, on a utilisé un anémomètre à fil chaud (Figure IV.9). L'instrument est parfaitement adapté à la mesure de la vitesse du flux d'air et du débit en configurant les dimensions de la section de passage d'air rectangulaire.

Le principe de l'anémométrie à fil chaud est celui du "refroidissement éolien" (windchill en anglais), indication subjective de la température ressentie, parfois donnée dans les bulletins météo. La température ressentie est la puissance dissipée par le corps (c'est-à-dire transférée du corps vers l'extérieur) et le vent, en favorisant ce transfert de chaleur, donne ainsi l'impression d'une température plus basse que la température réelle. Ainsi, le principe de l'anémométrie à fil chaud consiste à mesurer la puissance transférée depuis un fil fin chauffé par effet Joule et refroidi par le passage du fluide. La puissance dissipée par effet joule et captée par le fluide en mouvement donne donc une mesure indirecte de la vitesse de l'écoulement, mais pas de sa direction.

Le thermo-anémomètre numérique, léger et maniable, est particulièrement simple à utiliser. Il est équipé d'un capteur à fil chaud très sensible (thermistance à coefficient de température

négative) pour la mesure de vitesse de vent et de débit et d'une sonde Pt100 classe A pour la mesure de température. Il permet de mesurer simultanément la vitesse et la température de l'air. Le tableau IV.3 donne les spécifications du thermo- anémomètre utilisé.

Tableau IV.3 : Spécifications métrologiques du thermo-anémomètre.

	Plage de mesure	Résolution	Précision	Unités
Vitesses	0.15 à 3 m/s	0.01 m/s	+3%L +-0.05m/s	m/s,km/h
	3.1 à 30 m/s	0.1 m/s	+3%L +-0.2m/s	
Température ambiante	-20 à -80°C	0.1°C	+3%L +-0.25m/s	°C, °F
Débit (cône)	0 à 99999 m ³	1m ³ /s	+3%L +-0.03° Surf.Gaine (cm ²)	m ³ /h, m ³ /s, L/s cfm

La figure IV. 9 montre une photo du thermo-anémomètre CA1226 utilisé dans nos essais expérimentaux.



Figure IV.9 : Photo montrant le thermo-anémomètre mesurant la vitesse en m/s et la température en °C .

IV.2.3. Mesure des paramètres climatiques

Une station météorologique a été utilisée pour la mesure des paramètres météorologiques. Cette station permet de mesurer les paramètres climatiques, les plus importants, tels que : la température ambiante, l'humidité, la pression de l'air ambiant, la direction et la vitesse du vent.

IV.2.4. Distributions de températures dans le capteur

L'utilisation d'une caméra IR (infrarouge) FLIR Série T640, permet de visualiser les distributions de températures dans le capteur (voir figure IV.10).



Figure IV.10 : Camera FLIR T640 utilisée pour voir la distribution de la température au niveau du banc d'essai du capteur hybride PV/T à air.

On pourra ainsi capter et enregistrer une photo thermique montrant la distribution de températures le long du capteur comme le montre la figure IV.11.

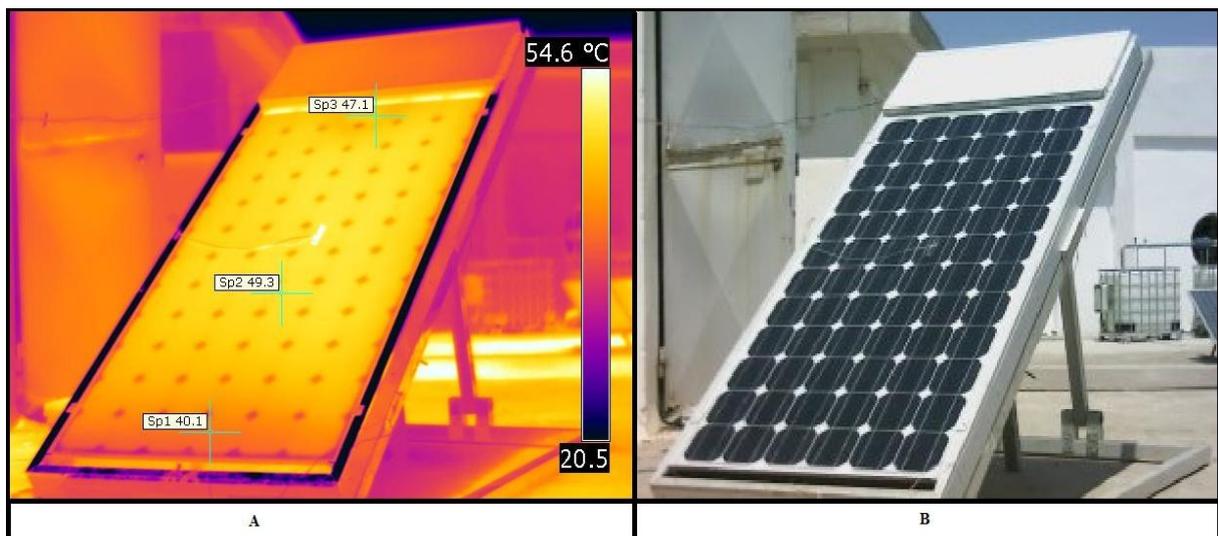


Figure IV.11 : Face avant ; A-image thermique prise par la caméra IR, B-image réelle du capteur hybride PV/T.

Comme le montre la figure IV.11, on peut aisément remarquer que la distribution de températures le long du capteur PV est quasi- uniforme. A la partie basse du capteur la température est moins élevée ($T_b = 40.1^\circ\text{C}$) qu'à son milieu, ceci est dû au fait que cette partie est influencée par l'entrée d'air qui au début de son écoulement est le plus souvent plus froide qu'au milieu suite à son échauffement par convection avec le Tedlar. Au fur et à mesure de son avancement dans la canalisation rectangulaire, la température de l'air augmente. Au milieu de la canalisation, elle atteint $T_m = 49.3^\circ\text{C}$. A la partie haute de la plaque, la température

décroit à $T_h=47.1^\circ\text{C}$. Ceci s'explique par le fait qu'il peut y avoir un échange thermique avec l'extérieur aux niveaux des ventilos.

La figure IV.12 montre les distributions de température à la partie basse du capteur PV/T.

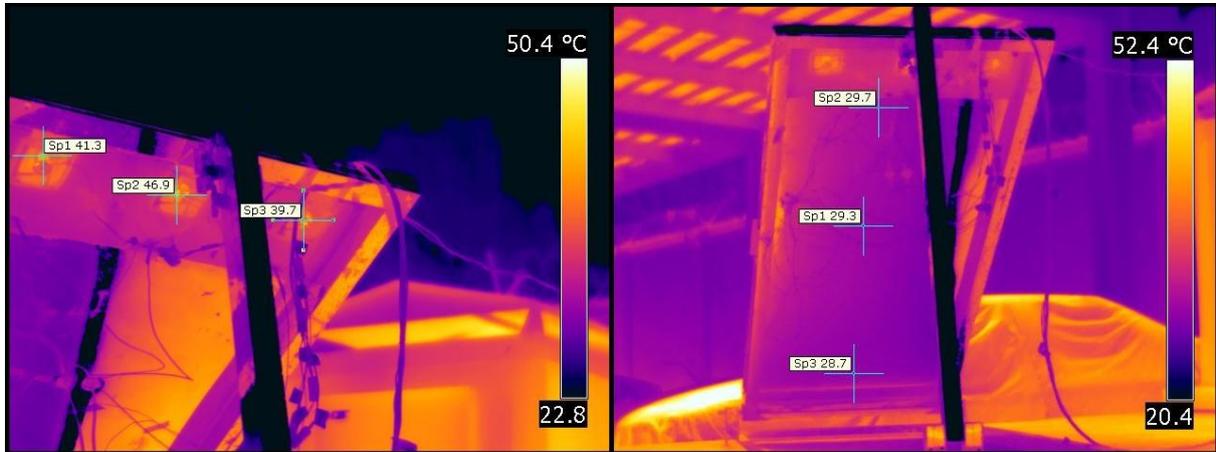


Figure IV.12 : image thermique de la face avant arrière du capteur

Il est à noter que les températures à l'arrière du capteur PV/T augmentent légèrement avec l'avancement de l'écoulement, ceci revient comme c'est mentionné en haut à l'échauffement de l'air en fonction de l'avancement X , on constate son évolution en fonction de X comme suit : $T_{b2}=28.7^\circ\text{C}$; $T_{m2}= 29.3^\circ\text{C}$; $T_{h2}=29.7^\circ\text{C}$.

IV.3. Description et objectifs des essais expérimentaux :

Il faut garder à l'esprit que l'étude expérimentale a pour but de déterminer en premier lieu les distributions de températures dans le capteur hybride et de voir son influence sur la puissance électrique produite par le capteur. A cet effet, un capteur PV de puissance de 185W a été monté sur une structure afin de réaliser le système hybride objet de l'étude et du test de son comportement. Les conditions de références utilisées sont relatives à un rayonnement, $G=1000 \text{ W/m}^2$, et à une température ambiante, $T_c=25^\circ\text{C}$. Ces données sont utilisées pour le capteur hybride dans le cas de cette étude.

A l'aide de tous les instruments de mesures décrits, on a effectué plusieurs tests expérimentaux sur plusieurs journées, en essayant d'adapter le débit au rayonnement solaire journalier. En faisant varier le débit, on enregistre les mesures des températures en fonction de la vitesse du vent.

Ce travail expérimental a pour but de voir le comportement thermique du capteur hybride PV/T à air réalisé au niveau du laboratoire EAS de l'unité de développement des équipements solaires, et de valider les résultats théoriques relatifs à la modélisation mathématique des transferts thermiques dans le capteur.

L'enregistrement des mesures des températures se fait chaque 5 min le long de la journée à l'aide du système d'acquisition de données relié à son système soft *Fluke Hydra Logger* installé sur l'ordinateur.

La figure IV.10 montre le système installé en mode de fonctionnement durant les essais expérimentaux.



Figure VI.13 : Installation expérimentale en mode opératoire.

Les résultats de l'expérimentation seront présentés dans le chapitre suivant et comparés aux résultats de simulation du fonctionnement de ce capteur hybride PV/T à air.

Chapitre V
Résultats et discussions

Résultats et discussions

Dans ce chapitre, sont présentés les résultats expérimentaux et théoriques de simulation. A cet effet, un programme itératif de calcul en code de langage MATLAB a été élaboré. Les résultats concernent essentiellement les distributions spatio-temporelles de température (expérimentales et numériques) dans les différentes couches du capteur, l'irradiation globale, la température ambiante, les rendements électrique et thermique du capteur et les puissances électriques et thermiques produites par un capteur hybride. dans l'expérimental et le théorique en simulation de la variation des différentes températures au cours du temps. Les calculs ont été effectués à partir d'une condition initiale, $t = t_0$, pour un intervalle de 5 min, jusqu'au temps final, $t = t_f$.

V.1. Variation de quelques paramètres climatiques en fonction du temps

V.1.1. Eclairement solaire :

L'éclairement solaire étant le paramètre le plus influant sur le bon fonctionnement du système. Le graphe V.1 montre le tracé de l'éclairement solaire le long de la journée du 25/05/2016. Cet éclairement est mesuré expérimentalement, au site de l'UDES, moyennant l'utilisation d'un pyranomètre.

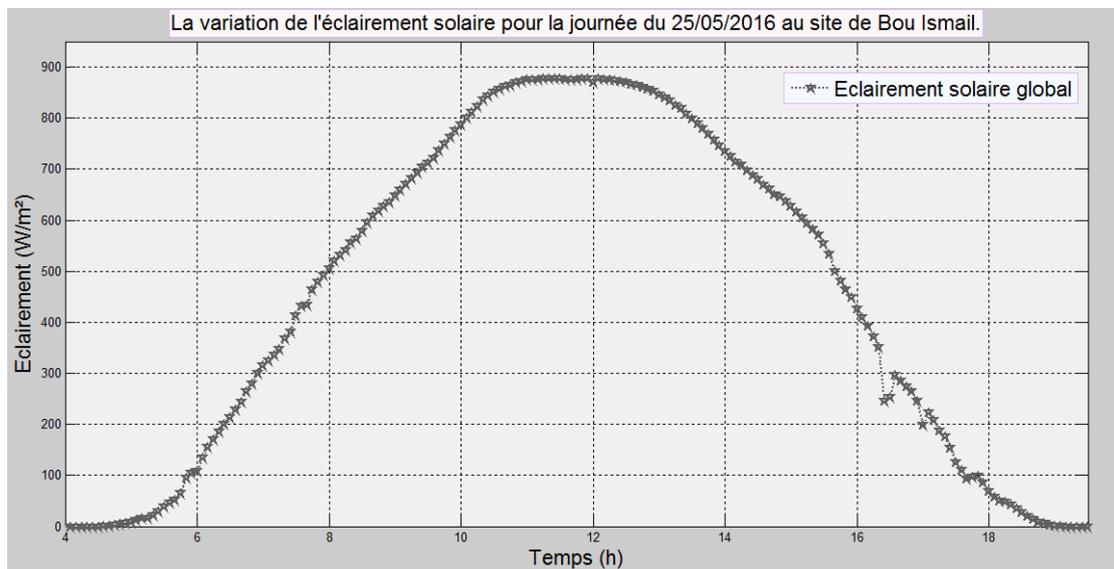


Figure V.1 : Variation de l'éclairement solaire global au cours du temps.

La figure montre que l'évolution du rayonnement solaire global au cours du temps est sous la forme d'une cloche avec un maximum qui se situe entre 11h et 13h. Le minimum est situé, bien évidemment au coucher (vers 19h) et au lever du soleil (5h 30).

Il est à noter qu'on distingue quatre formes de rayonnements mesurés sur le site de Bou Ismail au niveau de la station météorologique : le rayonnement direct, le rayonnement

global, le rayonnement diffus et le rayonnement à surface inclinée. La figure V.2 illustre leurs tracés pour la même journée à la période de fonctionnement entre 8h et 15h30.

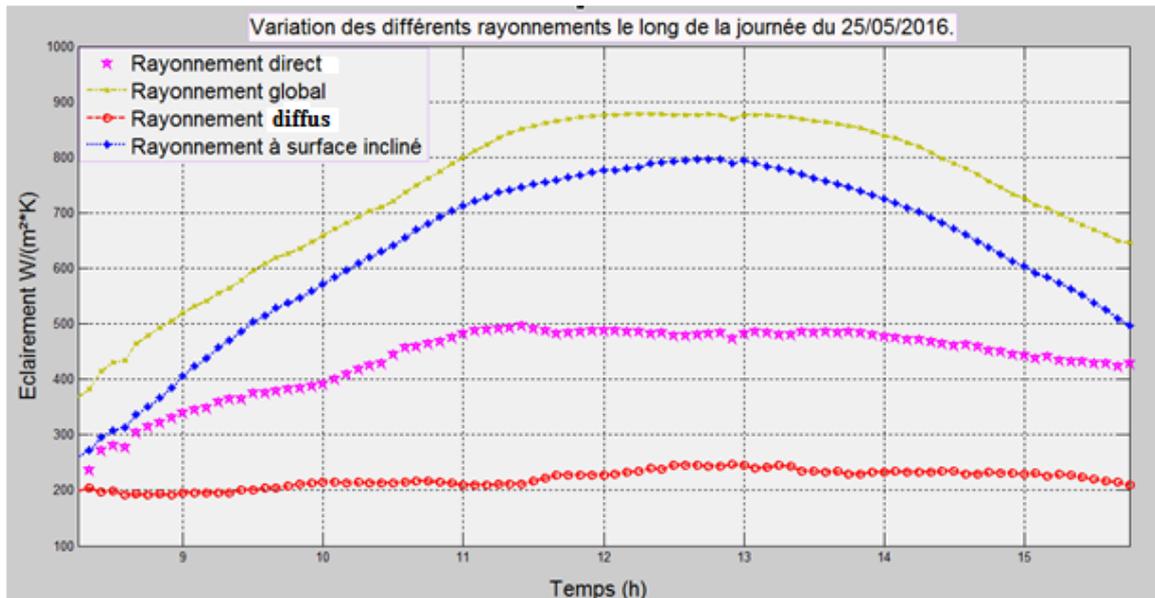


Figure V.2 : Evolution des différents rayonnements en fonction du temps.

La figure montre que le rayonnement diffus a la plus petite intensité ne dépassant pas les 250W/m², par contre le rayonnement global peut atteindre jusqu'à 877.405 W/m² à 12h15.

V.1.2. Température ambiante :

La température ambiante varie légèrement le long de la journée du 25/05/2016 comme le montre la figure V.3. L'écart total entre les deux extrêmes journaliers de température est inférieur à 3°C.

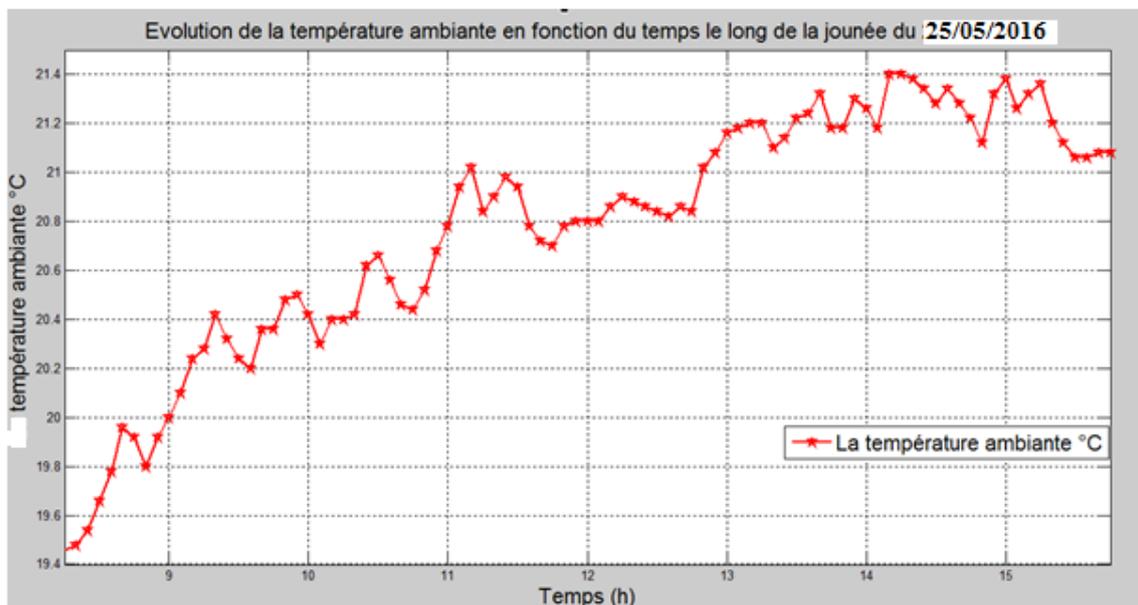


Figure V.3 : Evolution de la température ambiante moyenne au cours du temps.

V.1.3. Vitesse du vent :

La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre où les mesures sont effectuées chaque 5 min. Elle est représentée par la figure V.4 où l'on note des fluctuations relativement importantes à cause du phénomène d'intermittence du vent.

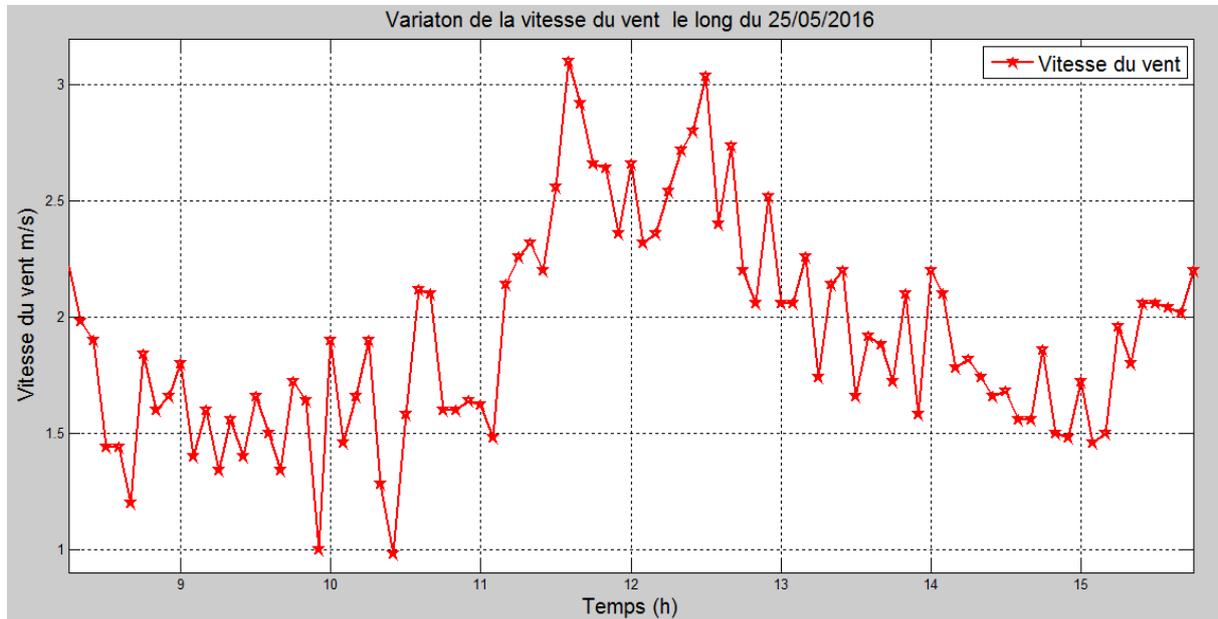


Figure V.4 : Variation de la vitesse du vent le long de la journée du 25/05/2016.

L'analyse de cette courbe nous permet de conclure que la vitesse du vent n'est pas stable, mais varie autour d'une valeur moyenne pour chaque pas de temps. La valeur maximale est autour de 3 m/s.

V.2. Etude expérimentale

Lors des essais expérimentaux effectués sur le banc d'essai, le débit d'air a été adapté aux conditions climatiques : lorsqu'on observe que le climat est chaud, on augmente le débit d'air dans la canalisation afin de garder la température des cellules à un niveau donné permettant d'avoir un bon rendement électrique.

Selon le contrôle du débit, on réalise un système de chauffage intégrable aux bâtiments ou un système de refroidissement des modules PV selon la valeur de la quantité d'air passant sur le canal.

La figure V.5 montre la variation du rayonnement solaire au cours du temps durant les journées où les essais expérimentaux ont été faits.

Le tableau V.1 donne les valeurs moyennes des données climatiques ainsi que le débit d'air maintenu le long des journées d'essais (24 et 25 Mai 2016, 1 et 2 Juin 2016).

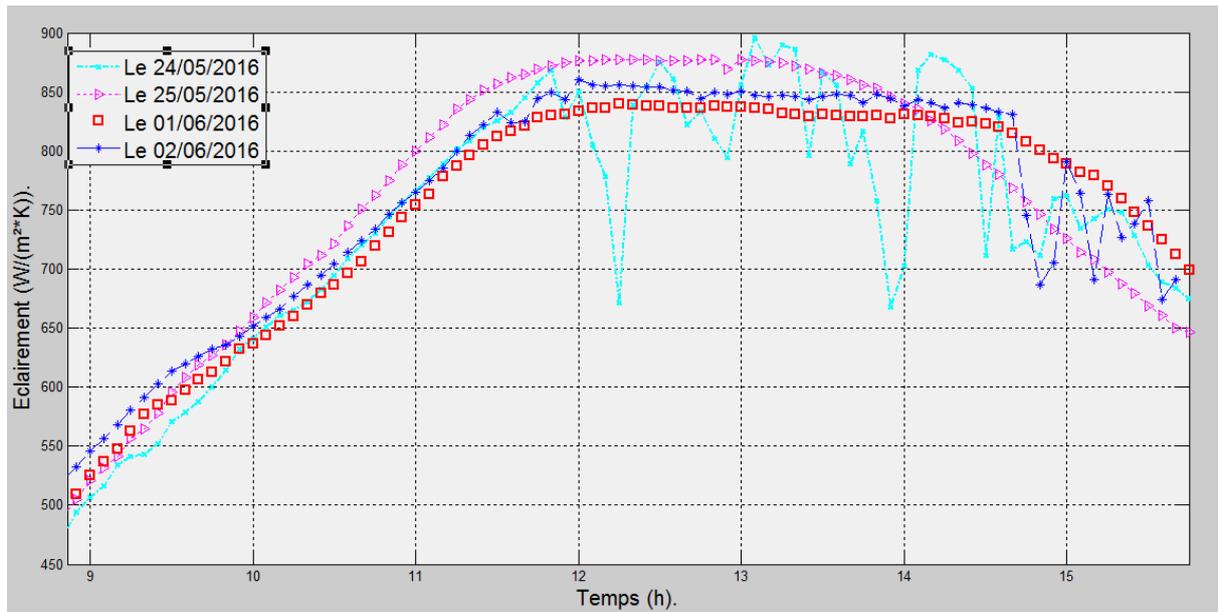


Figure V.5 : Variation du rayonnement solaire le long des journées d'essais.

Tableau V.1. Valeurs moyennes des données climatiques et de débit d'air le long des journées d'essais.

Variable \ Jour	24 Mai 2016	25 Mai 2016	01 Juin 2016	02 Juin 2016
T _{amb} en (°C)	21,586666667	20,748913	20,9680851	23,05
V _{vent} en (m/s)	2,35955681	1,92565217	2,32404255	2,94785714
Débit d'air entrant le canal en (kg/s)	0,03836281391	0,05113689	0,03607331	0,024879302

V.2.1. Etude thermique et variation des températures des couches du capteur :

A l'aide des instruments de mesure décrits au chapitre IV, nous avons mesuré, pendant plusieurs journées, les températures de chaque couche du capteur PV/T. L'enregistrement des données de mesure nous a permis d'analyser le comportement thermique du capteur pour la journée du 25 mai 2016.

La figure V.6 montre les distributions de températures des différentes couches constituant le capteur le long de la journée du 25/05/2016. On note que la température de tedlar est légèrement supérieure à la température de la vitre, leurs évolutions est très similaires et relatives à la variation de l'éclairement solaire. Soulignons qu'aux environs de 12h30, elles atteignent leurs valeurs maximales (T_{tedmax} = 58.7 °C, T_{vmax} = 57.8 °C). Concernant les températures de sortie d'air et de côté interne de l'isolation, elles sont très proches et augmentent de façon similaire de T_{fs} = 22.7 °C et T_{alum} = 23.2°C à l'instant initial à 8h10 jusqu'à atteindre leurs valeurs maximales vers 13h15 respectivement de 33.7 °C et 34.3°C,

suivant une allure descendante jusqu'à la fin de la journée. La température d'entrée d'air est légèrement supérieure à la température ambiante et continue à augmenter du début de la manipulation à partir de T_{fe} initiale = 21.1 °C, jusqu'à midi où elle se stabilise à une température proche de 25°C.

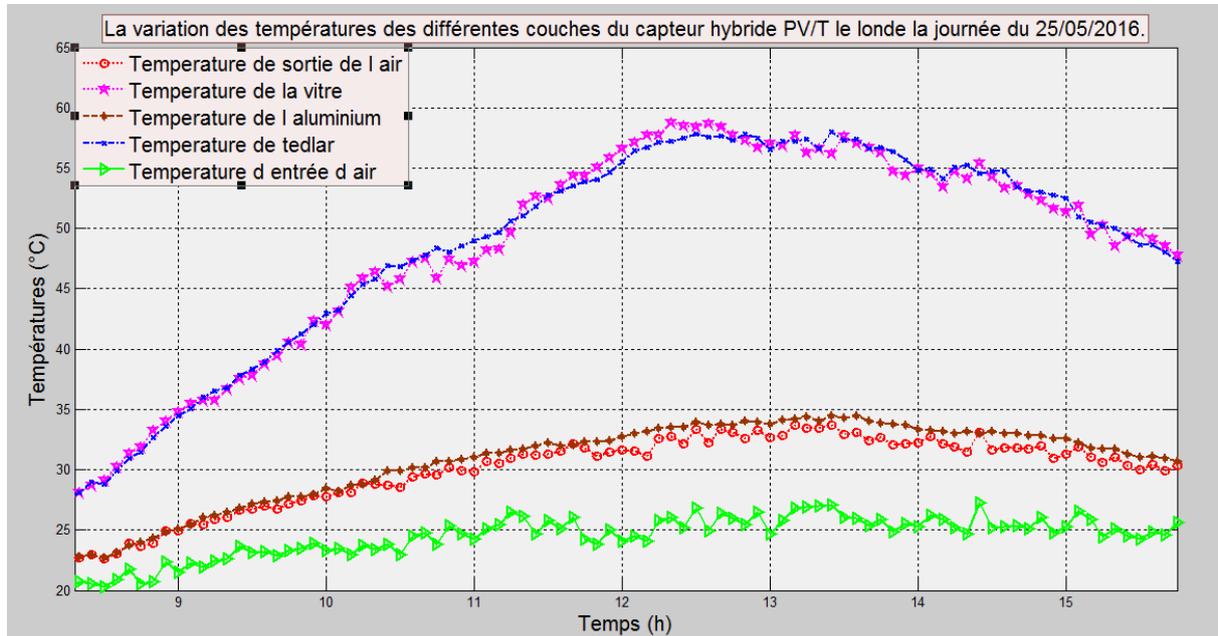


Figure V.6 : Variation des températures des différentes couches du capteur hybride PV/T le long de la journée du 25/05/2016.

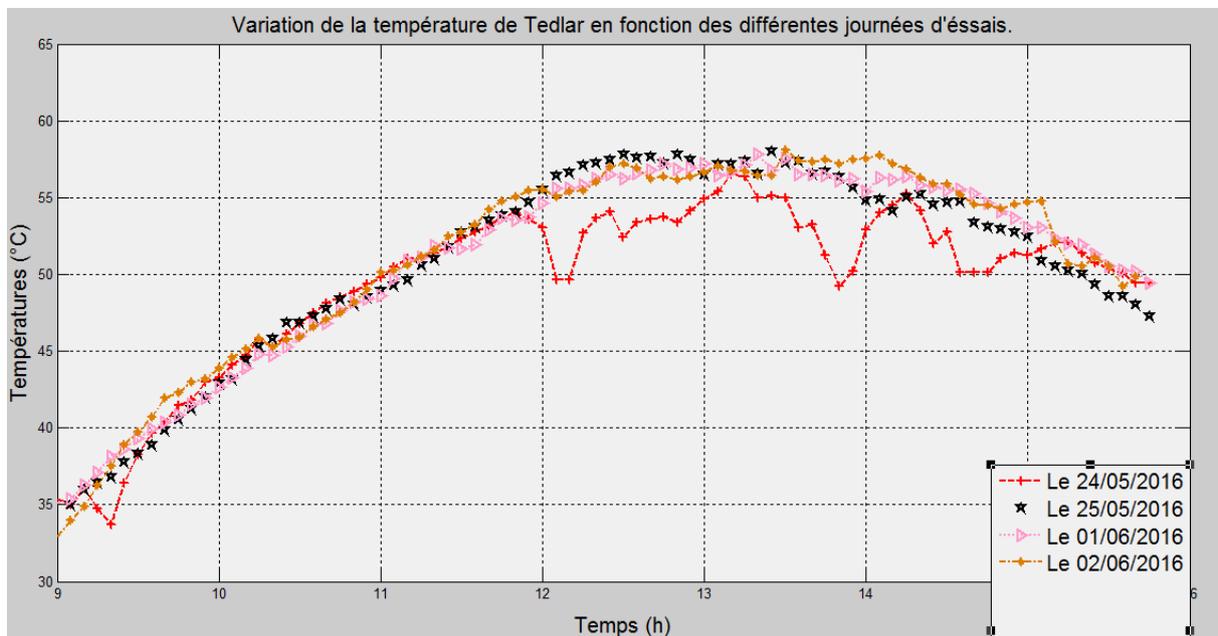


Figure V.7 : Variation de la température du Tedlar, T_{ted} , en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

Il est à souligner que les températures de la vitre protectrice et du tedlar sont très sensibles au rayonnement solaire journalier et ils suivent presque la même forme de cloche.

Le même résultat est obtenu pour la température d'entrée d'air relativement à la température ambiante. Les températures de sortie d'air et de la face intérieure de l'isolation (en aluminium) sont en entre les deux courbes relativement à l'ensemble des résistances thermiques des différentes couches et matériaux constituant le capteur.

La figure V.7 montre l'évolution des températures du Tedlar, T_{ted} , au cours du temps pour les différents essais effectués sur plusieurs journées. Il est à noter que les écarts entre les différents essais sont relativement faibles, exception faite pour la journée du 24/05/2016 entre 12h et 15h, à cause des fluctuations du rayonnement global pour cette journée, particulièrement entre 12h et 15h. Les figures 5.8 et 5.9 montrent respectivement, l'évolution des températures de vitrage, T_v , et de la couche protectrice en aluminium, T_{alum} , en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

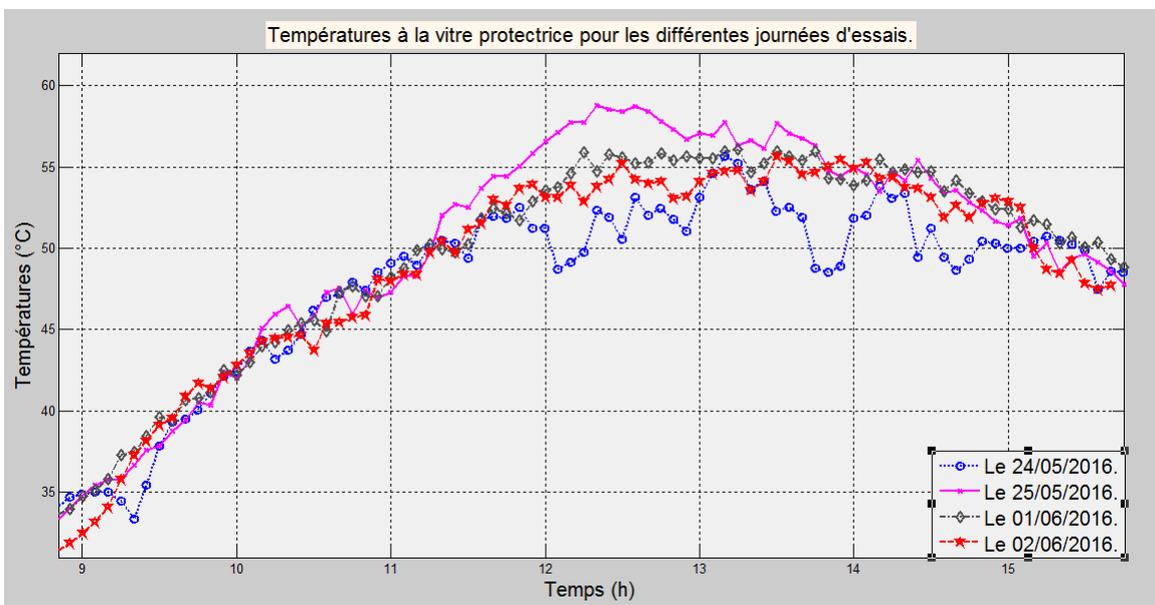


Figure V.8 : Variation de T_v en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

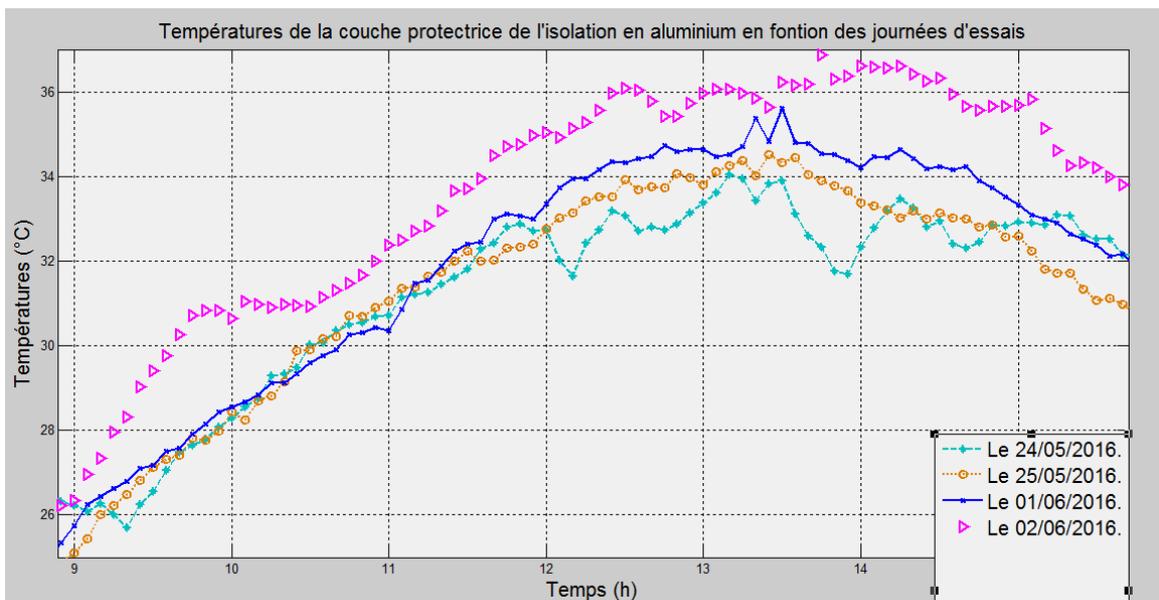


Figure V.9 : Variation de T_{alum} en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

Les figures V.10 et V.11 montrent respectivement, l'évolution des températures du fluide à l'entrée, T_{fe} , et à la sortie, T_{fs} , du canal rectangulaire, en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

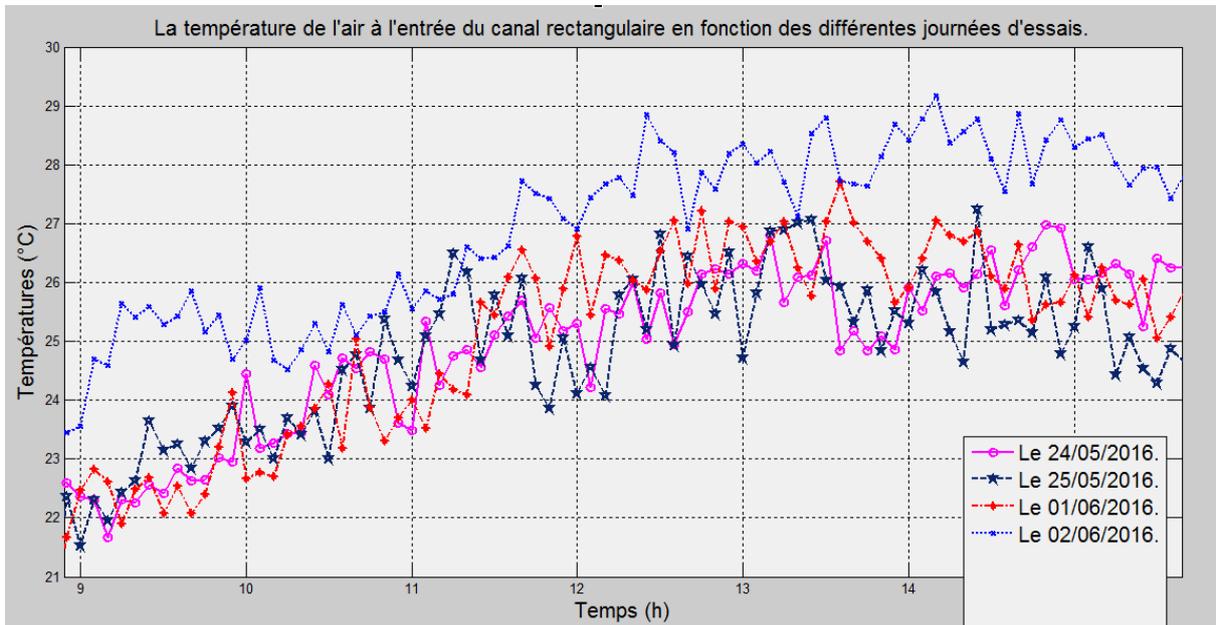


Figure V.10 : Variation de T_{fe} en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

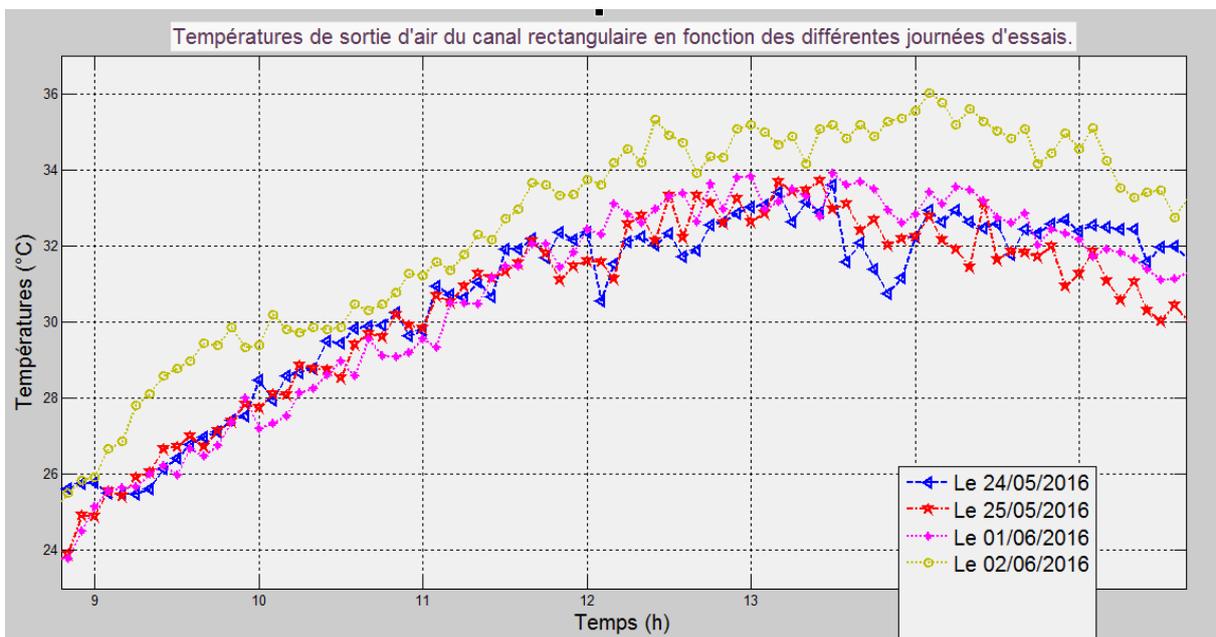


Figure V.11 : Variation de T_{fs} en fonction du temps pour les différentes journées d'essais.

Nous avons ainsi déterminé la variation de la température au niveau de chaque couche constituant le capteur hybride photovoltaïque thermique à air pour les différentes journées d'essais avec prise en charge de la différence sur les paramètres climatiques et sur le débit d'air introduit.

Nous observons que les allures des courbes des variations temporelles des évolutions de températures est pratiquement de la même forme à une légère différence près pouvant arriver jusqu'à 6 °C de différence. En outre il est aisé de voir que pour les températures de la vitre et du tedlar, la température du 24/05/2016 est la plus faible avec une courbe représentant plusieurs piques, cela revient à son éclairage correspondant qui est très intermittent par rapport à ceux des autres journées. Notons de plus, que les courbes de température pour la journée du 25/05/2016 sont les plus élevées, stables et continues, de valeur légèrement supérieure à celles des autres journées jusqu'à 14h exactement comme pour les températures Tted et Tv où elles sont dépassées par les autres valeurs des courbes du 01 et 02 Juin.

Le tracé des courbes de la température d'entrée et de sortie d'air montre que la température ambiante est un facteur très influant telle qu'elles suivent pratiquement la même courbe que celle de la température ambiante avec un ordre similaire. Notons que pour la journée du 24 Mai, nous enregistrons l'effet d'intermittence du rayonnement sur la courbe de température de sortie d'air.

Ainsi, nous pouvons conclure que pour les températures Tted, Tv, Tfe et Tfs, la valeur de l'éclairage E est un paramètre essentiel et responsable de leur évolution. La vitesse du vent est également un paramètre influant compte tenu du coefficient d'échange convectif et des échanges thermiques qu'elle peut induire entre la vitre protectrice et le milieu extérieur influant d'une façon indirecte sur les valeurs des températures du système. La température ambiante est de même un facteur déterminant selon la valeur du rayonnement global de la valeur de la température d'entrée d'air.

V.2.2. Etude de la production d'énergie électrique et thermique du capteur et de sa variation :

Après avoir tracé les différentes courbes des différentes températures et d'éclairage correspondant, le restant des paramètres est une déduction des résultats obtenus. Ce qui fait de la première étape, la détermination des valeurs de température est l'étape la plus importante du comportement thermique et électrique du système.

Il est important de noter que le système reçoit une puissance beaucoup plus importante que celle qu'il produit. Cela peut s'expliquer par plusieurs phénomènes, dont nous citons : les pertes de charge et les paramètres externes climatiques (vitesse du vent et la température ambiante) et d'autres sont aussi responsables.

La figure V.12 montre l'évolution de la puissance thermique produite, de la puissance électrique maximale que peut produire le module PV ainsi que la puissance absorbée par le capteur PV. La figure V.13 donne l'évolution de la puissance thermique produite au cours du temps pour les journées d'essais (24 et 25 Mai, 1 et 2 Juin 2016).

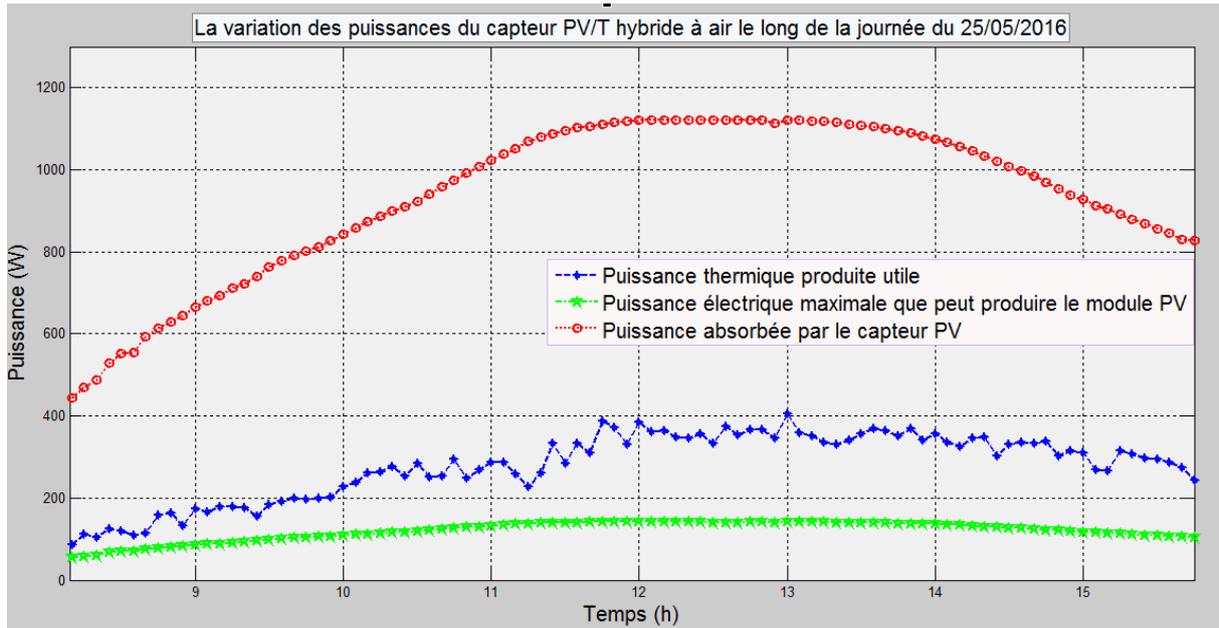


Figure V.12 : Variation des puissances P_{elec} , P_{th} et P_{abs} du capteur PV/T hybride durant la journée du 25/05/2016.

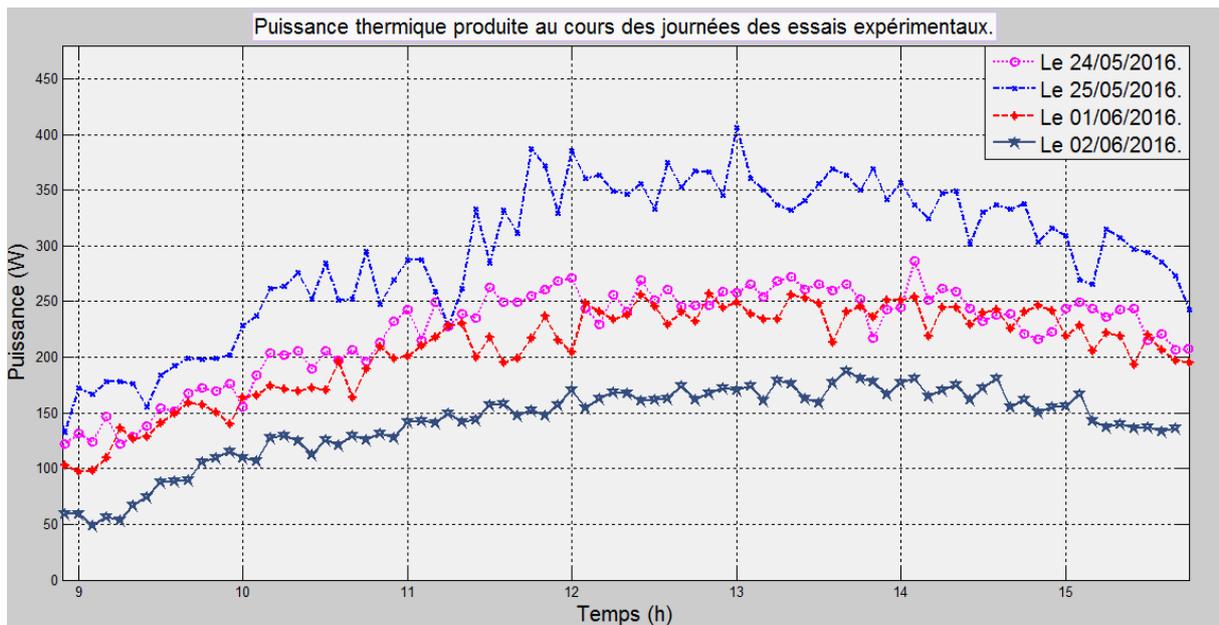


Figure V.13 : Puissance thermique produite au cours des journées d’essais expérimentaux.

Il est à noter que la variation de la puissance absorbée par le système est directement proportionnelle au rayonnement solaire, ce qui a généré des courbes relatives proportionnelles à celles des éclairagements solaires.

La variation des puissances thermiques produites par le système est liée à la différence de température d’entrée et de sortie du fluide caloporteur (air) et du débit introduit. Notons que le débit d’air est un facteur influant directement sur cette grandeur.

La figure V.14 montre l’évolution de la puissance électrique maximale, P_{mp} , au cours du temps pour les journées d’essais (24 et 25 Mai, 1 et 2 Juin 2016). La figure V.15 donne les

variations de la puissance absorbée par le module PV durant les mêmes journées d'expérimentations.

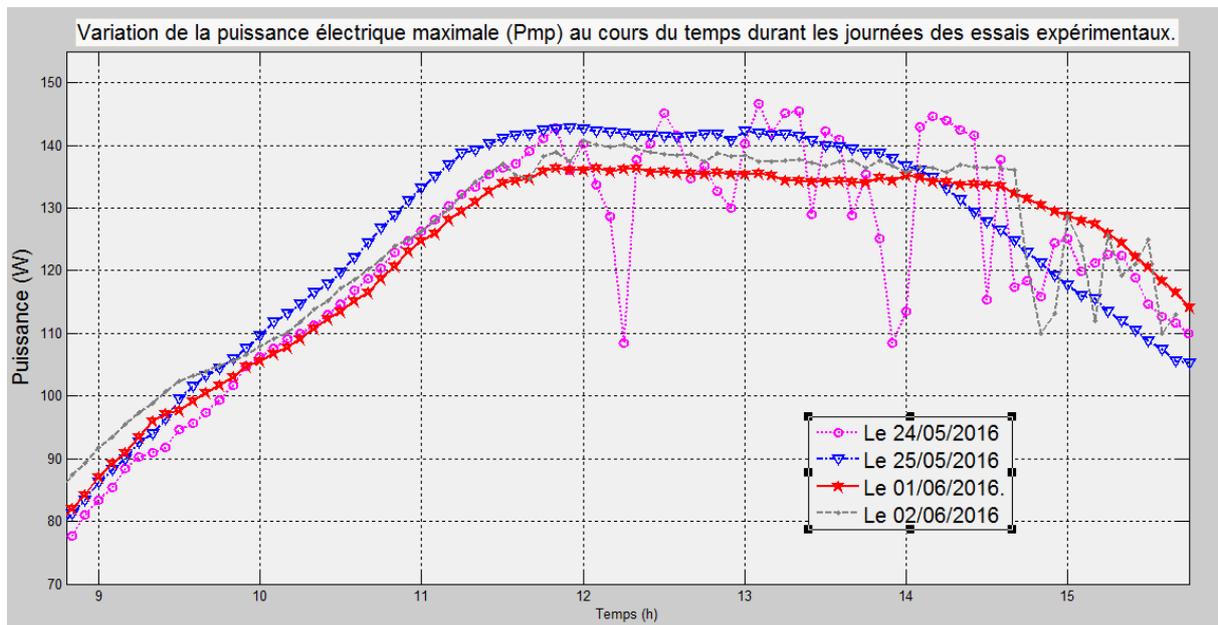


Figure V.14 : Variation de la puissance électrique maximale Pmp pendant les journées d'essais expérimentaux.

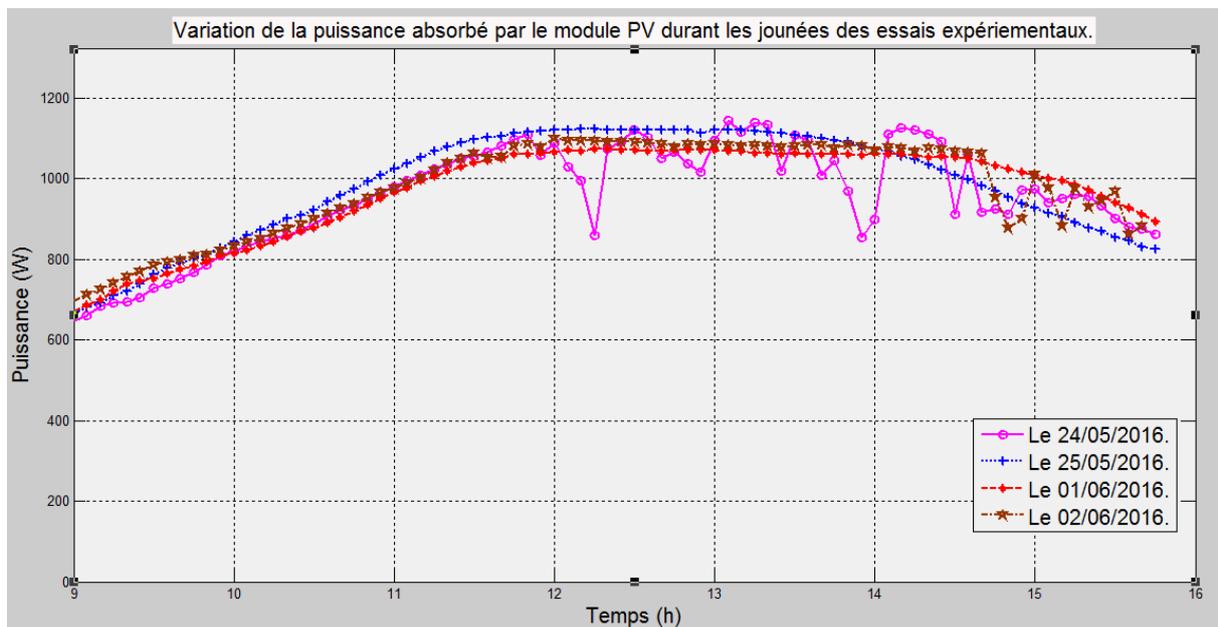


Figure V.15 : Variation de la puissance absorbée par le module PV Pendant les journées d'essais expérimentaux.

L'analyse des figures V.14 et V.15 montre que la puissance électrique produite est très sensible à la valeur de l'éclairement solaire globale incident au capteur hybride PV/T à air. La journée du 24 mai montre que des pics de puissance très similaire à ceux du rayonnement solaire et les courbes relatives sont pratiquement proportionnelles aux courbes de l'éclairement solaire global introduit au système.

V.2.3. Etude des performances du capteur PV/T et de leurs variations :

Le tracé des différentes courbes de puissances nous permet de déduire par la suite la courbe des rendements thermiques et électriques représentant les performances du système.

La figure V.16 montre l'évolution au cours du temps, du rendement thermique, du rendement électrique et du rendement global pour la journée d'expérimentation du 25 mai 2016. La figure V.17 donne l'évolution du rendement électrique au cours du temps durant la journée d'expérimentation du 25 mai 2016.

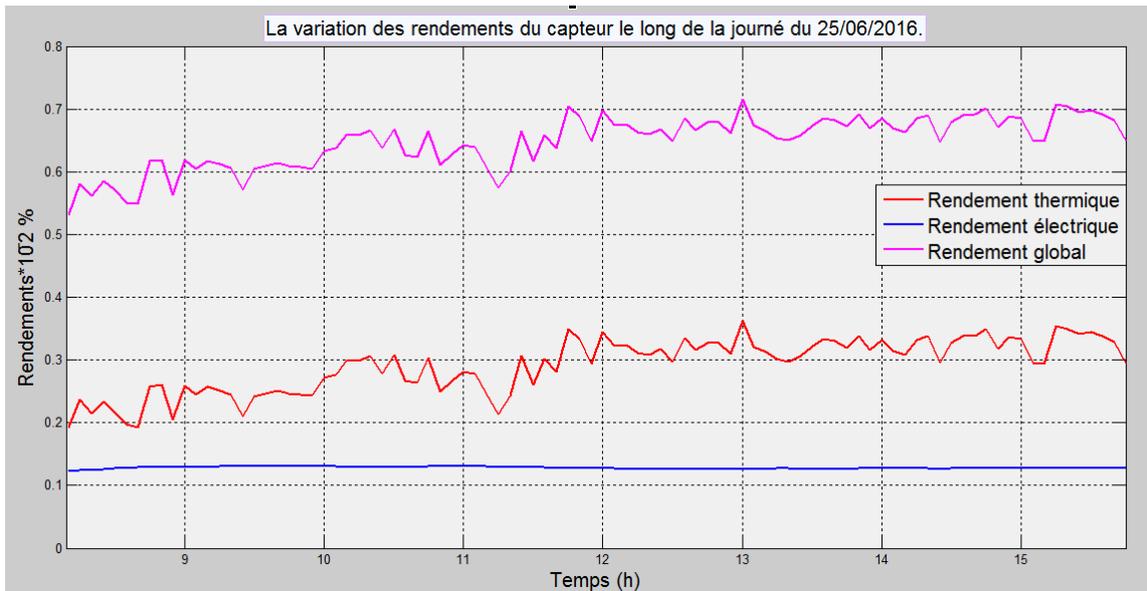


Figure V.16 : Variation des rendements du capteur durant la journée d'expérimentation du 25/05/2016.

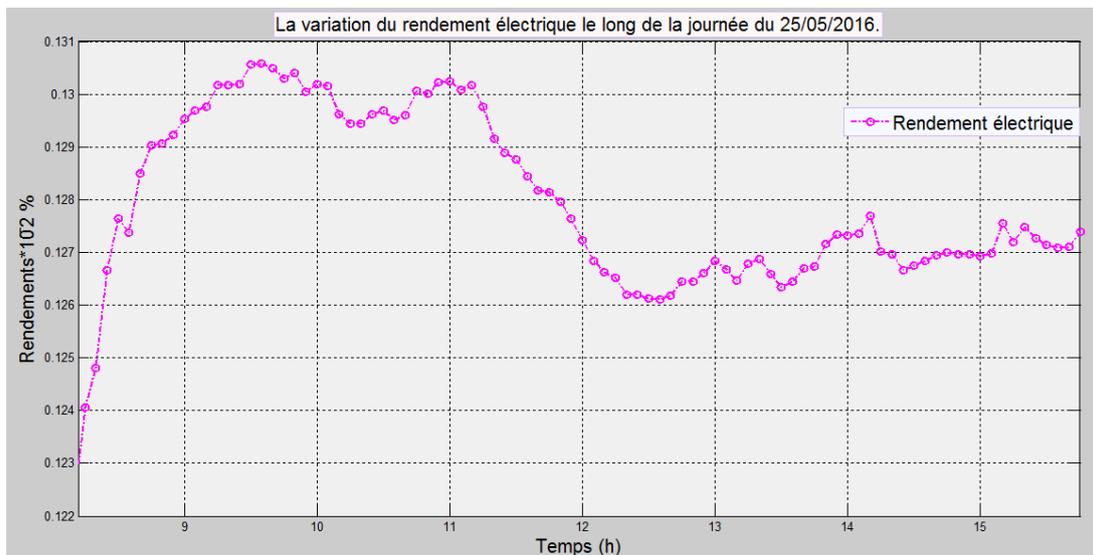


Figure V.17 : Zoom dans la plage du rendement électrique de 0.123 à 0.131 pour montrer la courbe du rendement électrique.

A grande échelle, la variation du rendement électrique est presque négligeable durant le régime permanent de fonctionnement du système. Le rendement thermique est autour de deux fois et parfois plus grand que le rendement électrique.

Nous notons également que le rendement thermique a une plage de variation de 19% à 36% le long de la journée du 25/05/2016 alors que la quantité du rendement électrique varie entre 12.3% et 13.06%

Le rendement global du capteur est un résultat déduit des deux autres rendements du système. Grâce à la stabilité du rendement électrique qu'il suit une allure très similaire à celle du rendement thermique du capteur hybride.

Les figures ci- après représentent les variations des différents rendements du système le long des jours d'essais : 24 et 25 Mai, 01 et 02 Juin 2016.

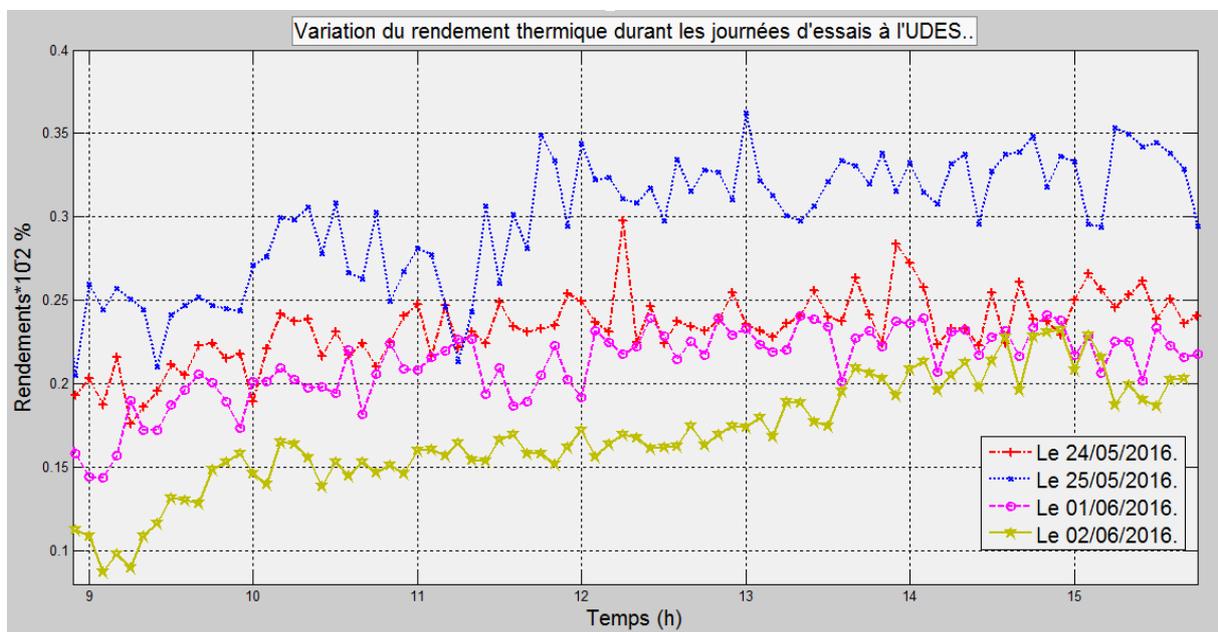


Figure V.18 : Variation du rendement thermique durant les journées d'essais à l'UDES.

La variation des rendements thermiques du système est liée à la puissance thermique et à la puissance absorbée, il représente leur rapport, ce qui explique l'influence de la différence de températures, d'entrée et de sortie de l'air, du débit introduit, et de l'éclairement solaire global.

Pour le rendement électrique, l'écart entre les résultats des différentes journées d'essais ne dépasse 0.4%. Notons que le rendement électrique est très sensible à la valeur de l'éclairement solaire globale incident au capteur hybride. La journée du 24 montre que des pics sur le rendement électrique sont similaires à ceux du rayonnement, ce qui constitue une similarité entre les courbes de l'éclairement, de la puissance électrique maximale qui peut être produite et du rendement électrique du système.

La variation du rendement électrique intermittent du 24/05/2016 n'a pas eu son effet sur le tracé de la courbe du rendement global du système. Nous pouvons ainsi dire que ce tracé représente généralement une translation d'une valeur presque constante durant une journée donnée du tracé de la courbe du rendement thermique.

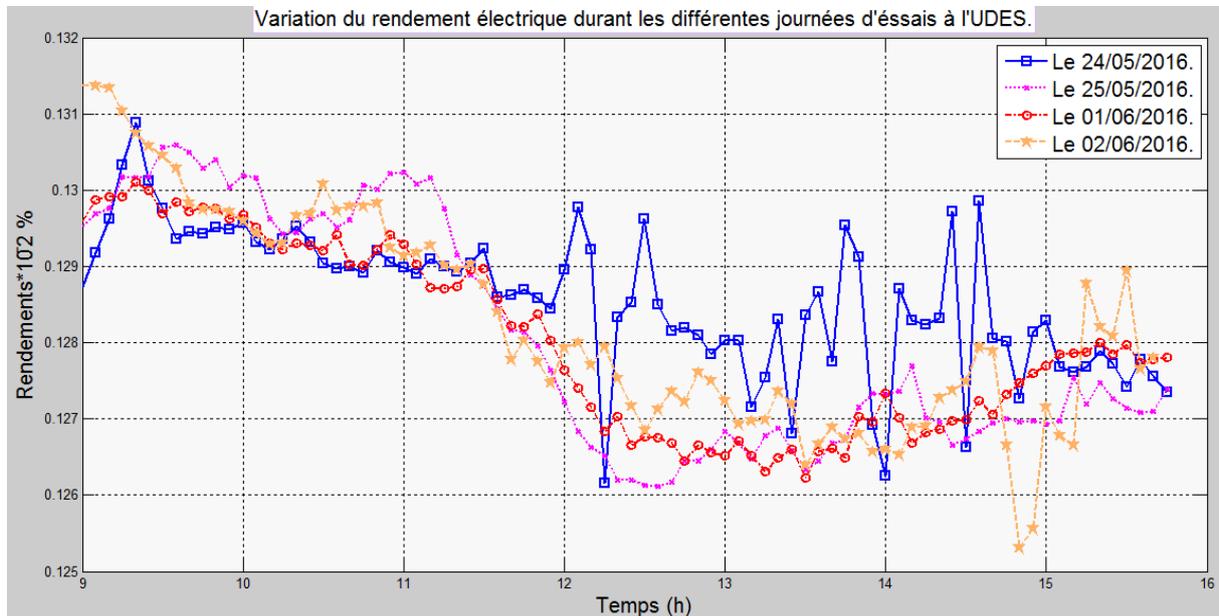


Figure V.19 : Variation du rendement électrique durant les jours d'essais à l'UDES.

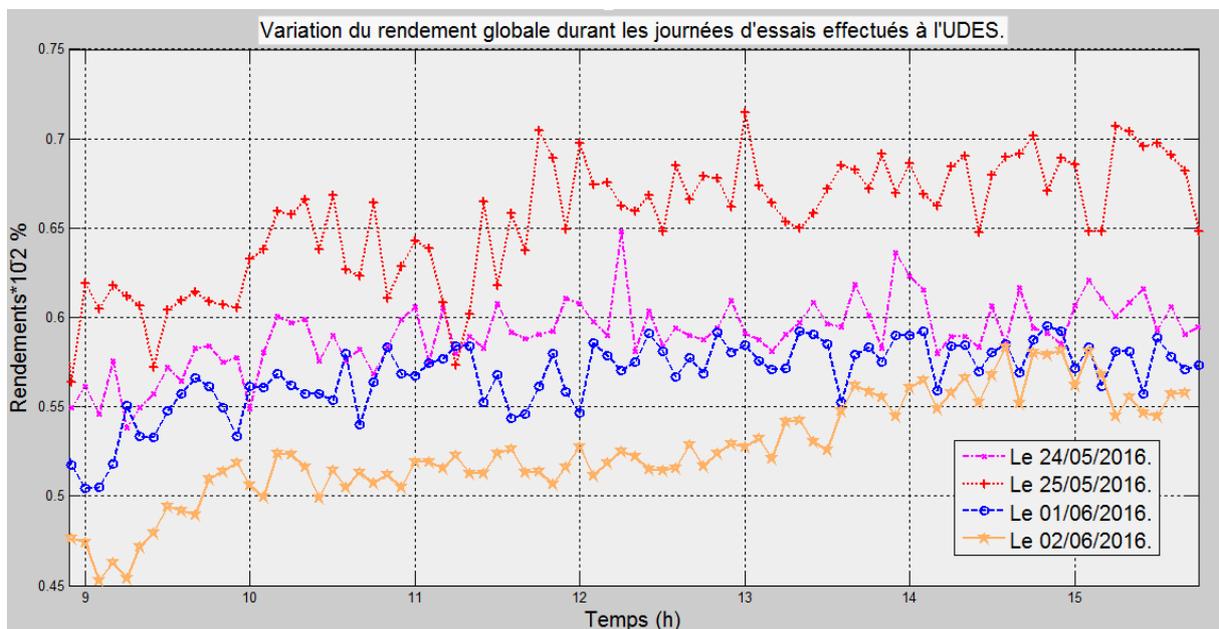


Figure V.20 : Variation du rendement global durant les jours d'essais effectués à l'UDES.

V.3. Résultats théoriques de simulation

Les résultats de simulation sont issus de la compilation du programme sous Matlab, élaboré dans le cadre de cette étude, en utilisant les données météorologiques du 01/06/2016. Les résultats obtenus sont montrés dans les figures ci-dessus.

V.3.1 Variation des températures du capteur :

La figure 5.21 montre les résultats de la simulation numérique relative à la journée du 01/06/2016. Ils correspondent aux distributions de température, à la sortie, à la vitre et au tedlar. La figure 5.22 donne les variations des températures du capteur (entrée et sortie d'air, tedlar, vitrage, isolation côté conduite) pour la même journée.

Globalement et qualitativement parlant, les courbes de températures simulées ont la même forme et le même ordre de grandeur que celle obtenues expérimentalement.

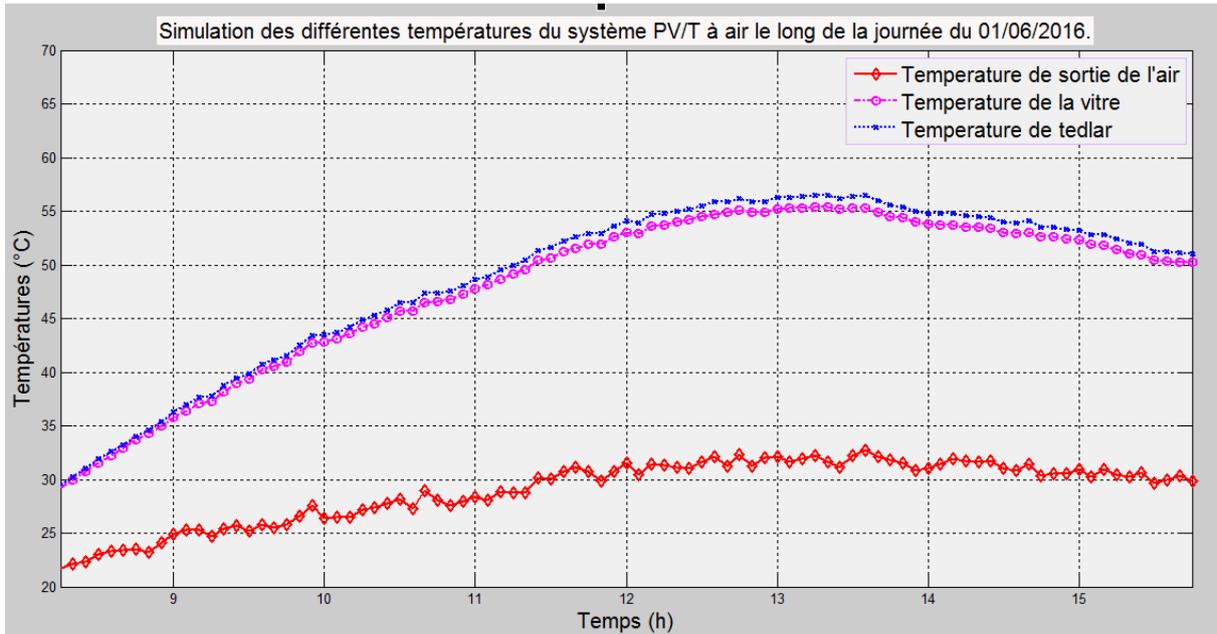


Figure V.21 : Résultats de la simulation numérique de Tfs, Tv et Tted pour le 01/06/2016.

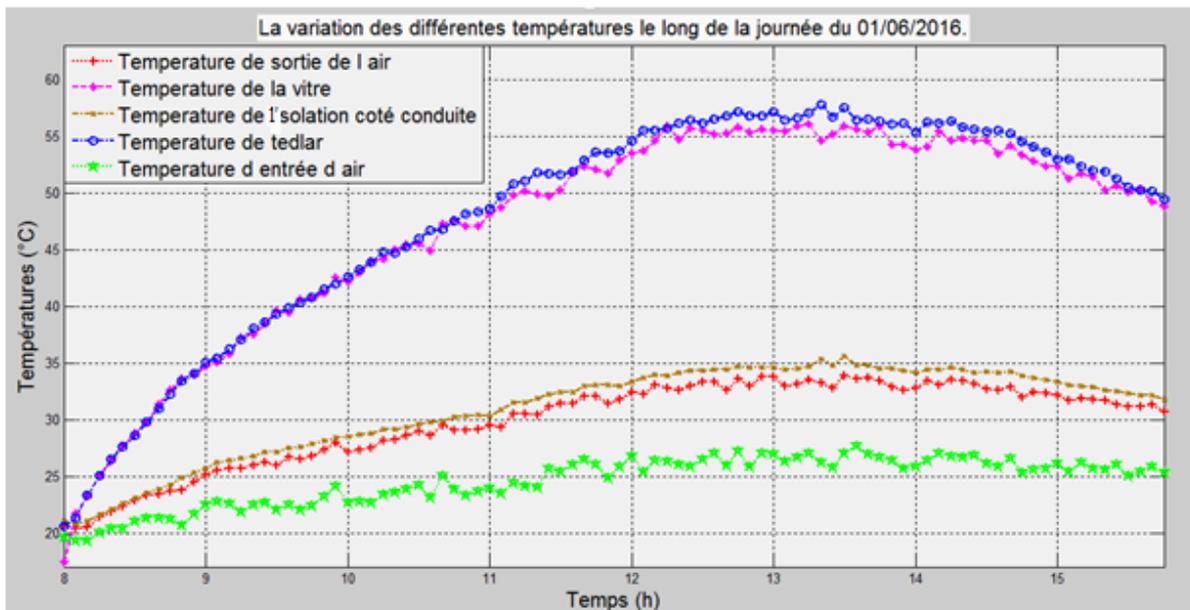


Figure V.22 : Distributions de température durant la journée du 01/06/2016.

V.3.2. Variations des rendements du capteur :

La figure V.23 montre l'évolution des rendements (thermique, électrique et global) issus de la simulation numérique pour la journée du 01 juin 2016. La figure V.24 donne l'évolution des rendements obtenus expérimentalement.

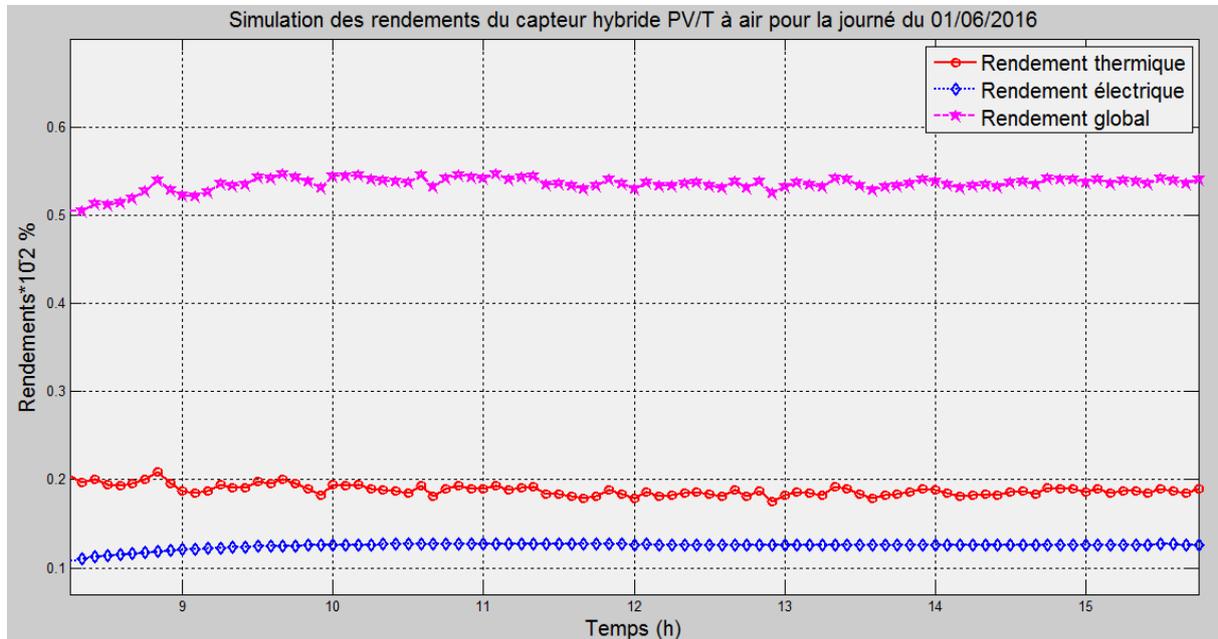


Figure V.23 : Résultats de simulation des performances thermoélectriques pour le 01/06/2016.

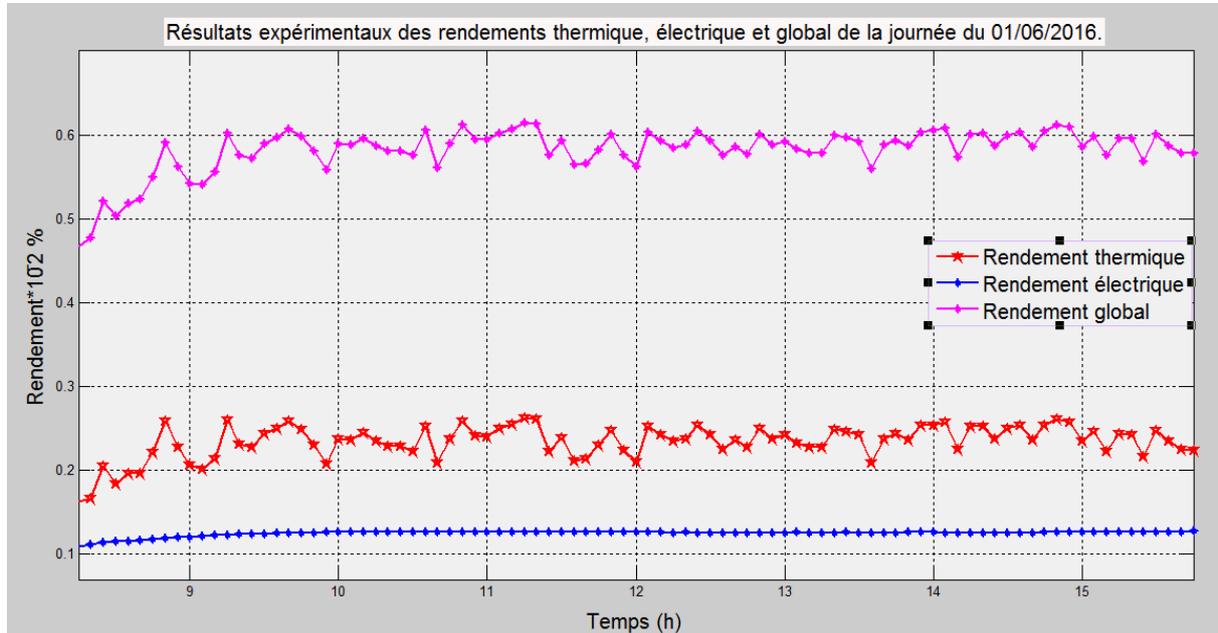


Figure V.24 : Résultats expérimentaux des performances thermoélectriques de la journée du 01/06/2016.

Il est à souligner que pour les graphes des rendements, les courbes obtenues par simulation numériques sont de même forme et de même ordre de grandeur que celles obtenus expérimentalement.

V.4. Comparaison et validation :

La figure V.25 montre la comparaison entre les températures obtenues numériquement et celles obtenues expérimentalement. La figure V.26 montre les résultats de comparaison relatifs aux rendements.

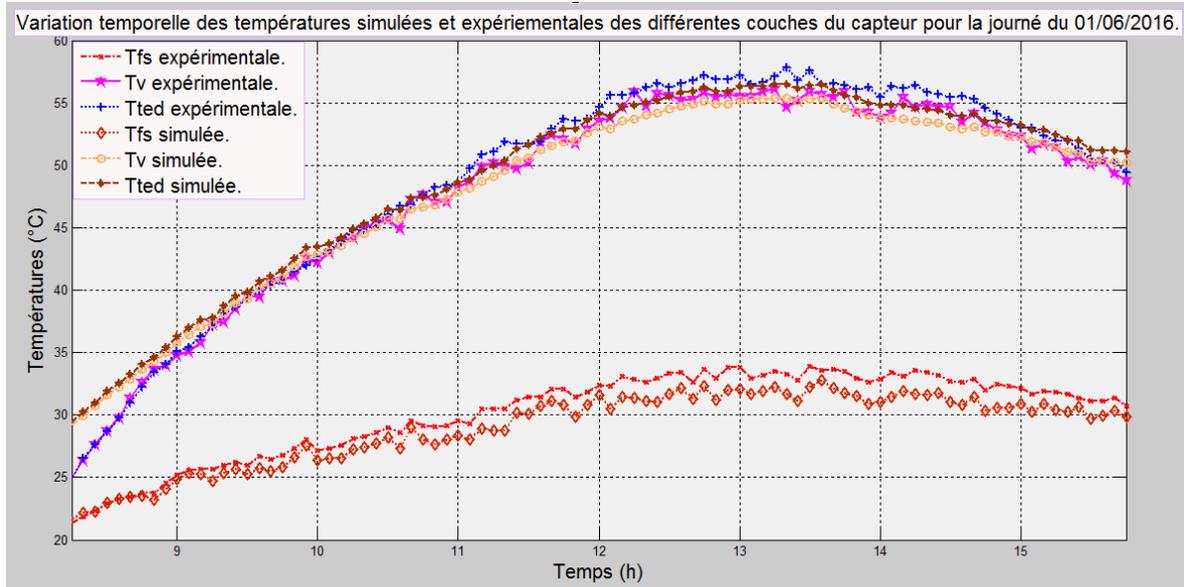


Figure V.25 : Comparaison des résultats entre les températures simulées numériquement et celles obtenues expérimentalement.

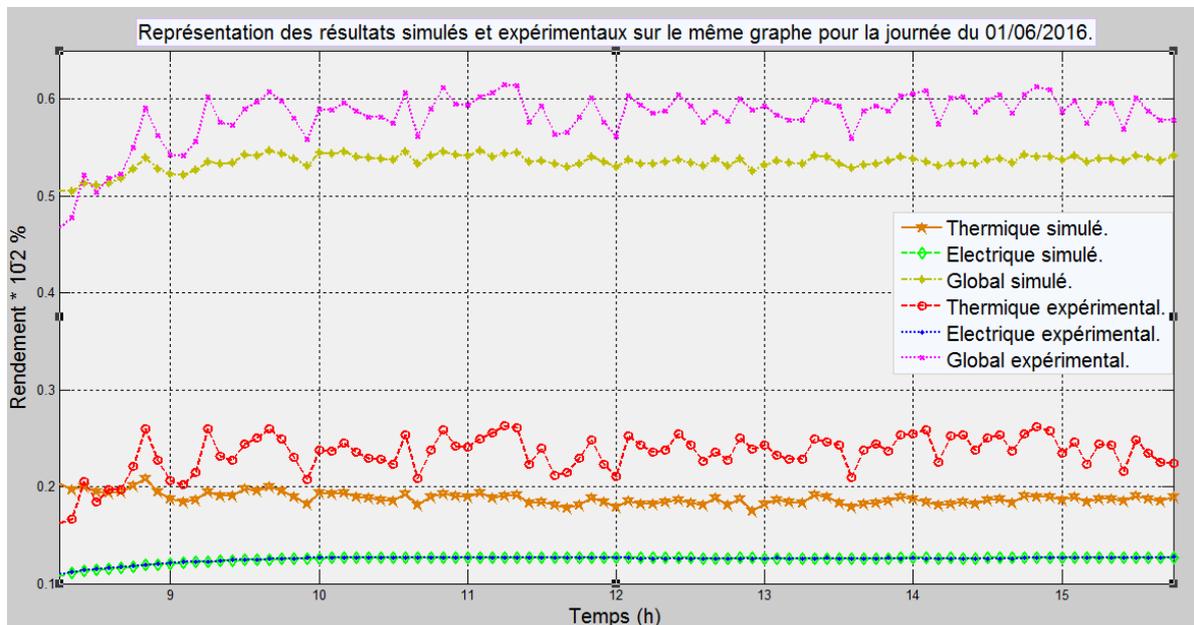


Figure V.26 : Comparaison des résultats entre les rendements simulés numériquement et ceux obtenus expérimentalement.

Il est à noter que la température de sortie d'air obtenue expérimentalement est très proche de celle obtenue par simulation numérique. La différence peut atteindre jusqu'à 3 °C, ce qui reste une assez légère différence. Pour les autres températures (Tted et Tv), nous observons de même une différence entre les valeurs simulées et expérimentales pouvant

atteindre comme pour la température de sortie d'air une différence de 2 à 3°C. On remarque également qu'au début de la manipulation on enregistre une différence plus grande atteignant les 5°C à 6°C, cela s'explique par le fait du régime transitoire non pris en considération dans cette simulation.

De même, on relève que le rendement thermique obtenu expérimentalement a presque la même courbe que celui obtenu par simulation. La différence entre les rendements thermiques (simulé et expérimental) peut atteindre jusqu'à 7 à 8%. Le tracé du rendement global obtenu est, comme nous avons mentionné déjà avant une translation du tracé de la courbe du rendement thermique relatif, ce qui génère une faible différence entre la simulation et la pratique.

En faisant la comparaison, entre les résultats de simulation et ceux obtenus expérimentalement, nous pouvons noter que les résultats théoriques sont assez proches des résultats réels obtenus expérimentalement. Par conséquent nous pouvons dire que les résultats trouvés expérimentalement concordent bien avec le modèle mathématique utilisé, ce qui permet ainsi de valider le modèle de simulation régissant le système hybride photovoltaïque thermique à air.

V.5. Conclusion

De façon générale, les résultats obtenus pour ce type de capteur solaire hybride nous permettent de dire qu'il est très intéressant de recourir à ce type de capteur permettant la récupération de la chaleur ayant un effet négatif sur le comportement électrique du module PV. Cette récupération permet au capteur d'avoir de hautes performances et un rendement global pouvant aller jusqu'au 60 %. Ce qui représente une valeur assez grande comparée aux rendements globaux des capteurs simples. De plus, cette cogénération permet d'économiser aussi bien de l'énergie que de l'espace en produisant plus d'énergie et en combinant la production d'énergie électrique et thermique sur une même surface.

Conclusion Générale

Conclusion générale

En régime opératoire de fonctionnement des capteurs photovoltaïques, une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques n'est pas convertie en électricité et provoque une augmentation de leur température en réduisant leur efficacité électrique. La température de ces capteurs peut être réduite par évacuation de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. Cette chaleur extraite peut aussi être utilisée pour des besoins industriels tel que le séchage des produits agro-alimentaire (PV/T à air) ou pour le chauffage domestique (PV/T à eau ou à air).

Le projet rentrant dans le cadre de ce mémoire de fin d'études est relatif à une étude thermoélectrique d'un capteur hybride sous les aspects, théorique et expérimental. Nous nous sommes intéressés à la distribution de températures dans les différentes parties du capteur hybride photovoltaïque- thermique ainsi que dans ses différentes couches en fonction du temps. Notons que cette distribution de température est le facteur déterminant des performances thermoélectriques du capteur hybride PV/T à air.

L'étude théorique sur le capteur hybride a consisté en une modélisation des caractéristiques thermiques et électriques à travers la détermination du profil de température dans les différentes couches du capteur. La simulation a consisté en la distribution des températures et ses performances thermiques et électriques du capteur hybride PV/T à air. Le modèle théorique a été validé par une étude expérimentale, entamée dans le cadre de ce projet, par l'utilisation d'un prototype de nouveau capteur réalisé au laboratoire EAS (Equipements et Applications Solaires à l'Unité de Développement des Equipements Solaires de Bou Ismail). Les résultats expérimentaux ont été en bonne concordance avec ceux de la simulation numérique.

Les résultats obtenus permettent de penser que les systèmes de cogénération à base des nouveaux capteurs hybrides PV/T peuvent constituer une source énergétique complète pour l'alimentation en énergie électrique et thermique les locaux d'habitation.

Ces systèmes de cogénération peuvent offrir deux avantages majeurs : le premier est d'augmenter le rendement des cellules photovoltaïques (en silicium monocristallin génératrices du courant électrique) en abaissant leur température et le deuxième consiste à

économiser de l'espace en combinant la production électrique et thermique sur une même surface. En résumé, les avantages de combiner un collecteur thermique avec un panneau PV dans l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts seront ainsi réduits comparativement aux systèmes classiques (photovoltaïques et thermiques) séparément installés.

Ce travail nous a permis d'étudier en détail le capteur hybride, en déterminant ses performances thermiques et électriques. Les résultats obtenus permettent de penser qu'il constitue une bonne alternative aux capteurs photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés.

L'eau peut être utilisée en remplacement de l'air, le capteur ainsi obtenu sera un capteur hybride à eau. De l'eau circule au-dessous du tedlar dans des conduites tubulaires est utilisée pour le chauffage de l'espace des habitations. Il est ainsi préférable de placer les capteurs sur les toits. Des pompes peuvent être utilisées pour contrôler et accroître le débit de l'eau chauffée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] LAUGIER A., ROGER J. A. Les photopiles solaires : du matériau au dispositif, du dispositif aux applications. Technique et documentation, 1981, Paris, France.
- [2] PRI CNRS, Projet de Recherche Intégré 6.2. Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques au bâti. Rapport final. Lyon, France, 52 p, 2004.
- [3] TSELEPIS S., TRIPANAGONOSTOPOULOS Y. Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. In: Proceedings of the International conference PV in Europe, Rome, Italy, 2002.
- [4] RADZIEMSKA E. Thermal performance of Si and Ga As based solar cells and modules: a review. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 29, N° 5, pp. 407- 424, 2003.
- [5] EPIA, IEA-PVPS, EPVTP. Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities. Eds. Bruxelles, Belgique : EPIA, IEAPVPS, EPVTP, 2006.
- [6] POLA O., CHIANESE D., BERNASCONI A. Flat roof integration of a-Si triple junction modules laminated together with flexible polyolefin membranes. Solar Energy, Vol. 81, pp.1144-1158, 2007.
- [7] KALOGIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, pp. 231-295, 2004.
- [8] BAKKER M., ZONDAG H. A., ELSWIJK M. J. Performance and costs of a roof-sized PV/Thermal array combined with a ground coupled heat pump. Solar Energy, Vol. 78, pp. 331-339, 2009.
- [9] MEDVED S., ARKAR C., CERNE B. A large-panel unglazed roof-integrated liquid solar collector-energy and economic evaluation. Solar Energy, Vol. 75, pp. 455-467, 2003.
- [10] ABABSA D. Optimisation du rendement d'un capteur solaire par minimisation des pertes convectives. Mémoire de magistère en Physique Energétique, Université de Batna, Algérie, 2010.
- [11] ASSOA B. Y., Performances de capteurs solaires PV/T hybrides bi-fluides intégrables à l'enveloppe des bâtiments. Etude expérimentale et modélisation adaptée, Thèse de Doctorat CETHIL, INSA Lyon, France, 2008.
- [12] BEN CHEIKH H., and MARIR-ENABBAS M. Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT. Revue des Energies Renouvelables, Vol. 16, N°2, pp. 257 – 268, 2013.
- [13] CALSOL, [En ligne] <<http://ines.solaire.free.fr/solth/page36.html>>, visité en Avril 2016.
- [14] KALOGIROU S. A. Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 30, N° 3, pp. 231-295, 2004.

- [15] ABENE. A., DUBOIS V., LE RAY M., OUAGUED A. Study of a solar air flat plate collector: use of obstacles and application for the drying of grape. *Journal of Food Engineering*, Vol. 65, pp.15–22, 2004.
- [16] MARWA M., HASSAN Y., VANBELIVEA U. Design, construction and performance prediction of integrated solar roof collectors using finite element analysis. *Construction and Building Materials*, Vol. 21, pp. 1069–1078. 2007.
- [17] PAISARN N. Effect of porous media on the performance of the double-pass flat plate solar air heater. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol 32, pp. 140–150. 2005.
- [18] BARGACHA M. N., TADILI A.R., DAHMANB A.S., BOUKALLOUCHC M. Comparison of the performance of two solar heating systems used to improve the microclimate of agricultural greenhouses in Morocco. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1073–1083. 2004.
- [19] HOA C. D, YEHA C. W., HSIEHB S. M. Improvement in device performance of multi-pass flat plate solar air heaters with external recycle. *Renewable Energy*, Vol. 30, pp. 1601–1621. 2005.
- [20] AUGUSTUS. M. L, KUMAR.S. Mathematical modeling and thermal performance analysis of unglazed transpired solar collectors. *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 62–75. 2007.
- [21] AHMAD. N.T. Agricultural solar air collector made from low cost plastic packing film. *Renewable Energy*, Vol. 23, pp. 663–671. 2001.
- [22] BEN YELLES F, BENENABADJI. B, BOUMEDIENE.Z BENYOUCEF. Z. Comparaison entre un capteur an aérogel de silice et d'autres capteurs plans. 13^{èmes} Journées Internationales de Thermique, du 28 au 30 Août 2007, Albi, France.
- [23] GUENERHAN H., HEPBASLI A. Determination of the optimum tilt angle of solar collectors for building applications. *Building and Environment*, Vol. 42, pp. 779–783. 2007.
- [24] TURGUT O., ONUR N. Three- dimensional numerical and experimental study of forced convection heat transfer on solar collector surface. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, DOI: 10.1016 heat mass transfer.10.017. 2008
- [25] CHARLES. L'énergie solaire dans les bâtiments, nouveau tirage, Edition Eyrolles, Paris, France, 1981.
- [26] MOKHTARI F., SEMMAR D. Etude Expérimentale d'un Capteur Solaire à Air. *Revue des Energies Renouvelables*, pp. 243-246. 1999.
- [27] KARSLI S. Performance analysis of new-design solar air collectors for drying applications. *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1645–1660, 2007.

- [28] RUNSHENG T., ZHIGUO S., ZHIMIN L., YAMEI Y. , HOA Z., CHAOFENG X. Experimental investigation on thermal performance of flat plate collectors at night. *Energy Conversion and Management*, Vol. 49, pp. 2642–2646, 2008.
- [29] RAJENDRA K., NITIN K., ROHIT M., AGARWALC P.C. Effect of flow mal distribution on thermal performance of a solar air heater array with sub collectors in parallel. *Energy*, Vol. 32, pp. 1260–1270, 2007.
- [30] MOUMMIN., YUCEF-ALI S., MOUMMI A., DESMONS J.Y. Energy analysis of a solar air collector withrows of fins. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 2053–2064, 2004.
- [31] YUCEF-ALI S., DESMONS J. Y. Numerical and experimental study of a solar equipped with offset rectangular plate fin absorber plate. *Renewable Energy*, Vol.31, pp. 2063–2075, 2006.
- [32] ELNASHAR A.M. Heat loss through the piping of a large solar collector field. *Energy*, Vol. 31, pp. 2020–2035, 2006.
- [33] ONG K.S. Thermal performance of solar air heaters: Mathematical model and solution procedure. *Solar Energy*, Vol. 55, pp. 93-109, 1995.
- [34] BENKHELIF A. A. Optimisation d'un Capteur Solaire Plan. *Revue des Energies Renouvelables : Physique Energétique*, Vol. 5, pp. 13-18, 1998.
- [35] ERNANI S., Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces. *Solar Energy*, Vol. 80, pp. 1063–1071, 2006.
- [36] TURHAN K. Performance of various design of solar air heaters for crop drying applications. *Renewable Energy*, Vol.31, pp. 1073–1088, 2006.
- [37] DONATIEN N, Etude théorique du comportement thermique d'un capteur solaire plan à air à couverture combinée plastique-vitre. *Revue Générale de Thermique*, Vol.37, pp. 973-980, 1998.
- [38] HO-MING Y. and TONG-TSHIEN L. The effect of collectors aspect ratio on the collectors efficiency of flat-plate solar air. *Energy*, Vol. 20, pp. 1041-1047. 1995.
- [39] UCAR A., INALLO M. Thermal and exergy analysis of solar air collectors with passive augmentation techniques. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 33, pp. 1281–1290. 2006.
- [40] ESEN H. Experimental energy and exergy analysis of a double-flow solar air heater having different obstacles on absorber plates. *Building and Environment*, Vol. 43, pp. 1046–1054. 2008.
- [41] TSCHARNER R., CURTINS H., HÄRING J.P., SCHWARZ R. and SHAH L.W. Low Temperature Liquid PV/T Collector. In: *Proceedings of the 5th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference*, CEC, Athen, Greece, 1983.

- [42] LALOVIC B., PAVLOVIC T., KISS Z. AND VAN DINE J. The Application of Hybrid a-Si:H PV and Thermal Collectors for Different Usages. In: Proceedings of the 8th E.C. Photovoltaic Solar Energy Conference, (CEC), pp. 280 - 283, 1988.
- [43] SUDHAKAR S.W., and SHARON M. Fabrication and Performance Evaluation of a Photovoltaic/Thermal Hybrid System. SESI Journal, Vol. 4, N°1, pp. 1 - 7, 1994.
- [44] FLORSCHUETZ L.W. Extension of the Hottel- Whillier Model to the Analysis of Combined Photovoltaic/Thermal Flat Plate Collectors. Solar Energy, Vol. 22, N°4, pp. 361 - 366, 1979.
- [45] TAKASHIMA T. New Proposal for Photovoltaic/Thermal Solar Energy Utilization Method. Solar Energy, Vol. 52, N°3, pp. 241 - 245, 1994.
- [46] BERGENE T. and LOVVIK O.M. Model Calculations on a Flat-Plate Solar Heat Collector with Integrated Solar Cells. Solar Energy, Vol. 55, N°6, pp. 453 - 462, 1995.
- [47] CHOW T.T. A review on photovoltaic/thermal hybrid. Solar technology, Vol. 87, N° 2, pp 365-379, 2010.
- [48] COX C.H. and RAGHURAMAN P. Design considerations for flat-plate photovoltaic/thermal collectors. Solar Energy, Vol. 35, N°3, pp. 227–241, 1985.
- [49] LALOVI C.B, KISS. Z and WEAKLIEM H. A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. Solar Cells, Vol. 19, N° 2, pp. 131–138, 1986.
- [50] WOLF M. Performance analysis of combined heating and photovoltaic power systems for residences. Energy Conversion and Management, Vol. 16, pp. 79–90, 1976.
- [51] DUFFIE J. A. and BECKMAN W.A. Solar Energy Thermal Process. Wiley-Inter-Science Edition, New York, USA, 1974.
- [52] SOPIAN K., YIGIT K.S, LIU H.Y., KAKAC S. and VEZIROGLU T. N. Performance analysis of photovoltaic thermal air heaters. Energy Conversion and Management, Vol. 37, N°11, pp:1657–70, 1996.
- [53] PRAKASH J. Transient analysis of a photovoltaic thermal solar collector for cogeneration of electricity & hot air/water. Energy Conversion and Management, Vol. 35, N° 11, pp. 967–972, 1996.
- [54] BERGENE T., LOVVIK O.M. Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. Solar Energy, Vol. 55, pp. 453–62, 1995.
- [55] AL HARBI Y., EUGENIO N.N, AL ZAHRANI S. Photovoltaic-thermal solar energy experiment in Saudi Arabia. Renewable Energy, Vol. 15, pp. 483–488, 1998.
- [56] ROCKENDORF G., SILLMANN R., PODLOWSKI L., LITZENBURGER B. PV-hybrid and thermoelectric collectors. Solar Energy, Vol. 67, pp. 227–237, 1999.
- [57] ZONDAG H.A. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol 12, pp. 891-959, 2005.

- [58] TRIPAGNOSTOPOULOS Y. Aspects and Improvements of Hybrid Photovoltaic / Thermal Solar Energy Systems. *Solar Energy*, Vol. 81, N°9, pp. 1117 – 1131, 2007.
- [59] EBRAHIM M., ALFEGI A., KAMARUZZAMAN S., YUSOF HJ M. O. and BIN YATIM B. Mathematical Model of Double Pass Photovoltaic Thermal Air Collector with Fins. *American Journal of Environmental Sciences*, Vol. 5, N°5, pp. 592 - 598, 2009.
- [60] CHOW T.T., HE W, JI J. and CHAN A.L.S. Performance Evaluation of Photovoltaic – Thermosyphon System for Subtropical Climate Application. *Solar Energy*, Vol. 81, N°1, pp. 123 –130, 2007.
- [61] TOUAFEK K., MALEK A. ET HADDADI M. Etude Expérimentale du Capteur Hybride Photovoltaïque Thermique. *Revue des Energies Renouvelables*, Vol. 9, N°3, pp. 143 – 154, 2006.
- [62] TOUAFEK K., HADDADI M. and MALEK A. Experimental Study on a New Hybrid Photovoltaic Thermal Collector. *Applied Solar Energy*, Vol. 45, N°3, pp. 181 – 186, 2009.
- [63] SANDBERG M., MOSHFEGH B. Ventilated-solar roof airflow and heat transfer investigation. *Renewable Energy*, Vol. 15, N° 4, pp. 287-292, 1998.
- [64] MOSHFEGH B., SANDBERG M. Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 2, N° 3, pp. 287-301, 1998.
- [65] GARG H. P., ADHIKARI R. S. System performance studies on a photovoltaic / thermal (PV/T) air-heating collector. *Renewable Energy*, Vol. 16, N°1, pp. 725-730, 1999.
- [66] HEGAZY A. A. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and management*, Vol. 41, N° 8, pp. 861-881, 2000.
- [67] HEGAZY A. A. Performance of flat solar air heaters with optimum channel geometry for constant/variable flow operation. *Energy Conversion and management*, Vol. 41, N° 4, pp. 401-417, 2000.
- [68] HEGAZY A. A. Technical note: Optimizing the thermo-hydraulic performance of flat-plate solar air heaters operating with fixed/variable pumping power. *Renewable Energy*, Vol. 18, N° 2, pp. 283-304, 1999.
- [69] MEI L., INFIELD D., EICKER U. Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade. *Energy and buildings*, Vol. 35, pp. 605-617, 2003.
- [70] LLORET A. Lessons learned in the electrical system design, installation and operation of the Mataro Public Library. In: *Proceedings of the 14th European PV Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 1997.

- [71] CARTMELL B.P., SHANKLAND N.J., FIALA D. A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: Application, simulation and initial monitoring feedback. *Solar Energy*, Vol. 76, pp. 45-53, 2004.
- [72] TIWARI A., SODHA M. S., CHANDRA A. Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 90, N°2, pp. 175-189, 2006.
- [73] TIWARI A., SODHA M. S. Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91, N°1, pp. 17-28, 2007.
- [74] TRIPANAGNOSTOPOULOS Y., TZAVELLAS D. Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In: *Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference*, Munich, Germany, 2001.
- [75] OTHMAN M. Y., YATIM B., SOPIAN K. Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, Vol. 209, N°3, pp. 43-49, 2007.
- [76] TRIPANAGNOSTOPOULOS.Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic / thermal solar energy systems. *Solar Energy*, Vol. 81, N° 9, pp. 1117 – 1131, 2007.
- [77] KHELIFA.A, Etude numérique et modélisation d'un capteur hybride PV/T. Mémoire de magister en physique option : énergies renouvelables, Université EL-HADJ LAKHDAR-BATNA, Laboratoire de Physique Energétique Appliquée, 2011.
- [78] FUJISAWA.T, TANI T. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 47, N°4, pp. 135-148, 1997.
- [79] SANDBERG.M, MOSHFEGH B. Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules. *Building and Environment*, Vol. 37, N° 3, pp. 211-218, 2002.
- [80] CHOW T. T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, Vol. 75, pp. 143-152, 2003.
- [81] FRAISSE G., MENEZO C., JOHANNES K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combined systems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, Vol. 81, N°11, pp. 1426-1438, 2003.
- [82] CHOW T.T, HE W., JI J. Performance evaluation of photovoltaic thermos syphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, Vol. 81, pp. 123-130, 2007.
- [83] KALOGIROU S. A, TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 27, N°8-9, pp. 1259 – 1270, 2007.

- [84] ZONDAG H. A., BAKKER M., HELDEN W. G. J. PV/T Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Rapport EU-Project PV - Catapult. 2005.
- [85] AHARWALA.K. R, GANDHIB.B. K, SAINIB.J. S. Experimental investigation on heat-transfer enhancement due to a gap in an inclined continuous rib arrangement in a rectangular duct of solar air heater. *Renewable Energy*, Vol.33 pp. 585–596. (2008),
- [86] BENSELLAMA E. H., Modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique. Mémoire de fin d'étude, Université de Blida, 2006-2007.
- [87] TOUAFEK K., HADDADI M., MALEK A., Modeling and experimental Validation of a New Hybrid Photovoltaic Thermal Collector. *IEEE Transaction on energy conversion* DOI: 10.1109/TEC.2010.2043951, 2010.
- [88] ZONDAG H.A., Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, pp. 891–959, 2008.
- [89] SARHADD F., FARAHAHAT S, AJAM H., BEHZADMEHR A., MAHDAVIADELI M., An improved thermal and electrical model for a solar photovoltaic–thermal (PV/T) air collector. *Applied Energy*, Vol. 87, pp. 2328–39, 2010.
- [90] JOSHI A.S., Tiwari A., Tiwari G.N, Dincer I., Reddy B.V., Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal PV/T (glass-to-glass) system. *International Journal of Thermal Science*, Vol. 48, pp. 154–64, 2009.
- [91] DUFFIE J.A., BECKMAN W.A. *Solar engineering thermal processes*. 3rd Edition, John Wiley & Sons Inc., USA, 2006.
- [92] GOH L.J, IBRAHIM A., CHEAN Y. K., DAGHIGH R., RUSLAN H. Evaluation of single-pass photovoltaic–thermal air collector with rectangle tunnel absorber. *American Journal of Applied Science*, Vol. 7, pp. 277–82, 2010.
- [93] STEPHENSON G. *Mathematical methods for science students*. 2nd Edition, Longman, UK, 1973.
- [94] HOLMAN J.P. *Heat transfer*. 9th Edition, McGraw-Hill, USA, 2008.
- [95] ALFEGI E.M.A, SOPIAN K., OTHMAN M.Y.H., YATIM B.B. Mathematical model of double pass photovoltaic thermal air collector with fins. *American Journal of Environmental Science*, Vol. 5, pp. 592–8, 2009.
- [96] MATLAB version 7.7.0 (R2008b).