

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 Master

pour l'obtention du diplôme de Master en Énergétique

# **Simulation Numérique des Echanges Thermiques dans un Capteur Hybride PV/T air par une Etude de Sensibilité aux Paramètres**

**Oussama BOUFENARA**

**Sous la direction du Professeur Salah LARBI**

**et du chargé de recherche Rabah SELLAMI.**

**Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2016.**

## **Composition du Jury :**

Président	Bouzid BENKOUSSAS	Maître de Conférence- 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 Master

pour l'obtention du diplôme de Master en Énergétique

# **Simulation Numérique des Echanges Thermiques dans un Capteur Hybride PV/T air par une Etude de Sensibilité aux Paramètres**

**Oussama BOUFENARA**

**Sous la direction du Professeur Salah LARBI**

**et du chargé de recherche Rabah SELLAMI.**

**Présenté et soutenu publiquement le 19 juin 2016.**

## **Composition du Jury :**

Président	Bouzid BENKOUSSAS	Maître de Conférence- 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.

**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 تفريغ حرارتها باستخدام سائل متحرك طبيعياً أو باستخدام محرك خارجي مناسب. العمل المقدم في هذه المذكرة يتمثل في دراسة نظرية للاقط ثنائي الاستعمال كهروضوئي حراري هوائي. الدراسة النظرية للاقط الثنائي الاستعمال تمثلت في نمذجة خصائصها الحرارية والكهربائية عن طريق تحديد منط درجة حرارة مختلف طبقات الاقط. أقيمت في إطار هذا المشروع، النتائج المدلل عليها تبين أن تشير النتائج إلى أن الجهاز هو بديل جيد للواقط كهروضوئية والحرارية التقليدية المركبة بشكل منفصل. **الكلمات المفتاحية:** (الواقط الشمسية، كهروضوئية، الحرارية، المردود، هجين درجة الحرارة، نموذج، الطاقات المتجددة).

**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. 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, Efficiency, Hybrid, Temperature, Prototype, Renewable Energy.

**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. 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, Rendement, Hybride, Température, Prototype, Energies Renouvelables.

*«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 Benkousas, 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 TASSOULT Houda, Mlle CHEKROUNI Rym et toute l'équipe EAH ainsi. Mes remerciements vont à Mesdames CHEKIRED 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

<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>05.</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>06.</b>
<b>Liste des symboles.....</b>	<b>07.</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>13.</b>
<b>Chapitre I : Les capteurs photovoltaïques.....</b>	<b>16.</b>
I.1 Introduction.....	16.
I.2 Les capteurs photovoltaïques.....	16.
I.3 La cellule photovoltaïque.....	16.
I.4 Orientation des capteurs photovoltaïques .....	18.
I.5 Systèmes photovoltaïques .....	19.
I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	19.
I.6.1 Avantages .....	19.
I.6.2 Inconvénients .....	19.
1.7 Secteurs d'applications.....	20.
<b>Chapitre II : Les capteurs thermiques.....</b>	<b>23.</b>
II.1 L'absorbeur .....	24.
II.2 Système de refroidissement par le fluide caloporteur .....	25.
II.3 Isolation et vitrage .....	25.
II.4 Avantages et inconvénients de l'énergie thermique .....	26.
II.4.1 Avantages.....	26.
II.4.2 Inconvénients.....	26.

<b>Chapitre III : Capteur hybride PV/T.....</b>	<b>28.</b>
III.1 Historique et état de l'art .....	28.
III.3 Partie électrique.....	32.
III.4 Simulation numérique.....	32.
<b>Chapitre IV : Résultats Discussions et interprétations.....</b>	<b>35.</b>
IV.1- Sensibilité à l'éclairement solaire.....	35.
IV.2 Sensibilité à la vitesse du vent.....	40.
IV.3 Sensibilité au débit d'air introduit.....	43.
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>47.</b>
<b>Références Bibliographiques.....</b>	<b>50.</b>



# Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Conductivités thermiques de quelques matériaux.....	24.
---	-----

# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Silicium monocristallin.....	17.
<b>Figure I.2</b> : Silicium poly cristallin. ....	18.
<b>Figure II.1</b> : Vue en coupe des éléments d'un capteur plat vitré.....	23.
<b>Figure IV.1</b> : Variation de l'éclairement solaire durant une journée. ....	35.
<b>Figure IV.2</b> : Variation de la température du tedlar durant une journée. ....	36.
<b>Figure IV.3</b> : variation de la température de sortie d'air en fonction de la variation de l'éclairement solaire. ....	36.
<b>Figure IV.4</b> : variation de la puissance thermique utile produite par le capteur hybride en fonction de la variation du rayonnement solaire. ....	37.
<b>Figure IV.5</b> : Variation du rendement thermique en fonction de la variation du rayonnement solaire pendant une journée. ....	38.
<b>Figure IV.6</b> : Variation du rendement électrique en fonction de la variation du rayonnement solaire. ....	39.
<b>Figure IV.7</b> : Variation de la vitesse du vent durant la journée. ....	40.
<b>Figure IV.8</b> : variation de la température de tedlar en fonction de la variation de la vitesse du vent. ....	41.
<b>Figure IV.9</b> : variation de la température de sortie d'air en fonction de la vitesse du vent. ....	41.
<b>Figure IV.10</b> : rendement électrique en fonction de la variation de la vitesse du vent.....	42.
<b>Figure IV.11</b> : Variation du rendement global en fonction de la variation du rayonnement solaire. ....	42.
<b>Figure IV.12</b> : Variation de la température de sortie en fonction de la variation du débit.....	43.
<b>Figure IV.13</b> : variation des températures en fonction du débit d'air introduit. ....	44.
<b>Figure IV.14</b> : variation de la puissance en fonction du débit d'air introduit. ....	44.
<b>Figure IV.15</b> : variation du rendement électrique en fonction du débit d'air introduit.....	45.
<b>Figure IV.16</b> : variation du rendement thermique en fonction du débit d'air introduit.....	45.

## *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 :**

$\alpha$ : Mouillabilité, coefficient de température actuelle, (A / K) ;

$\beta$  : Coefficient de température de la tension, (V / K) ;

$\beta_c$  : Facteur d'emballage de cellules solaires ;

$\delta$  : Profondeur de conduit, (m) ;

$\Delta$ : Différence ;

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

$\varepsilon$  : Emissivité ;

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

$\eta$  : Efficacité ;

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

$\tau$  : Transmittivité ;

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

## **Indices :**

a : Air ;

amb : Ambient ;

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 Générale***

*Sans énergie, notre monde ne pourrait fonctionner. En effet, l'homme, les machines ont en tous besoin. La demande totale d'énergie dans le monde s'accroît proportionnellement à la croissance démographique, à la disponibilité limitée des sources d'énergies et aux coûts sociaux et environnementaux des approvisionnements.*

*Durant la conversion photovoltaïque du capteur solaire une chaleur est générée ce qui augmentera la température de la cellule photovoltaïque et causera une chute de son rendement. Ce phénomène est dû à la partie du rayonnement solaire non absorbée par les cellules et qui sera à l'origine de son échauffement.*

*Cet échauffement a été considéré comme néfaste pour le rendement des capteurs solaires photovoltaïque et plusieurs efforts ont été consentis pour évacuer cette chaleur. Il y'a eu aussi l'idée d'exploiter ce phénomène par la combinaison du système photovoltaïque avec un système thermique pour former le capteur hybride PVT qui va générer en même temps de l'électricité et de la chaleur.*

*Le rendement électrique du capteur hybride PVT pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur du capteur photovoltaïque, ce qui va le refroidir en même temps.*

*Le meilleur rendement des capteurs photovoltaïques ne dépasse généralement pas les 15%. Avec les recherches en cours de développement il peut augmenter de 2 à 3% dans les cinq prochaines années, mais avec un coût considérablement plus élevé.*

*Cependant, ce rendement dépend en grande partie de la température de fonctionnement. Typiquement la perte peut atteindre 15-20% si aucun refroidissement du capteur n'est prévu. Il a alors un double-but : augmenter le rendement électrique du capteur et exploiter deux types d'énergies : électrique et thermique.*

*L'objectif de notre travail est la simulation numérique d'un prototype de capteur hybride existant à l'UDES pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Nous avons commencé notre travail par un modèle mathématique réduit sur le capteur hybride ensuite nous avons entamé l'étude numérique à travers la simulation par MATLAB en utilisant un programme dont les résultats sont déjà validés dans le mémoire du PFE comportant une*

*étude thermoélectrique du capteur hybride photovoltaïque thermique à air. L'utilisation de ce programme a comme avantage par rapport à l'étude expérimental, le fait de pouvoir varier les paramètres du capteur un par un, par contre dans l'expérimental on ne peut contrôler les paramètres climatiques et météorologiques. Ensuite nous avons exploité notre programme pour voir l'influences des différents paramètres externes et internes dans la variation des résultats de distribution des températures et des performances thermiques et électriques de notre système, à travers cette étude de variation des paramètres un par un en gardant les reste des paramètres constants, nous avons pu déterminer la sensibilité de notre système de capteur hybride PV/T à air à ces différents facteurs.*



*Chapitre I*  
*Capteurs Photovoltaïques*

## **Les capteurs photovoltaïques**

### **I.1 Introduction**

Le soleil fournit une énergie colossale à la Terre (10.000 fois l'énergie nécessaire) sous forme lumineuse. Mais le problème réside en ce que la forme sous laquelle nous la recevons n'est pas nécessairement celle sous laquelle elle est utilisable. C'est pourquoi, nous devons utiliser des processus de conversion. Par exemple, les cellules solaires photovoltaïques permettent de convertir l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

L'appauvrissement des sources énergétiques traditionnelles (pétrole...) due à une utilisation accrue de celles-ci et l'augmentation considérable du prix du pétrole, ... entraînent que l'étude des énergies renouvelables revêt une importance cruciale pour les années à venir. Les énergies renouvelables utilisables actuellement sont l'énergie hydraulique, le chauffage solaire actif, l'énergie éolienne, la géothermie, l'énergie photovoltaïque, la biomasse ...etc

Les capteurs photovoltaïques et les capteurs thermiques permettent de transformer directement le rayonnement solaire en énergie électrique continue et en énergie thermique sous forme de chaleur et ceci respectivement à travers des panneaux photovoltaïques et des capteurs plans.

### **I.2 Les capteurs photovoltaïques**

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par A. Becquerel en 1839.

### **I.3 La cellule photovoltaïque**

L'utilisation des cellules solaires débute dans les années quarante dans le domaine spatial. Les recherches ont permis d'améliorer leurs performances et leur taille mais il faudra attendre la crise énergétique de 1973 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque et ses applications terrestres. La cellule photovoltaïque est

composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique [1]. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux.

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du " band gap ",  $E_g$ , en électronvolt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe [1].

Le rayonnement arrivant sur la cellule solaire sera en partie réfléchi, une autre partie sera absorbée et le reste passera au travers de l'épaisseur de la cellule. Les photons absorbés dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite vont libérer un électron négatif, laissant un " trou " positif. Pour séparer cette paire de charges électriques de signes opposés et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique,  $E$ , de part et d'autre de la cellule.

Il existe trois principaux types de cellules :

Les cellules au silicium monocristallin

- Première génération de photopiles.
- Un taux de rendement excellent de 15 % et jusqu'à 24 % en laboratoire.



Figure I.1 : Silicium monocristallin

- Méthode de production laborieuse et difficile, et donc, très chère.
- Il faut une grande quantité d'énergie pour obtenir un cristal pur

Les cellules au silicium poly cristallin

- Coût de production moins élevé.
- Procédé moins gourmand en énergie.
- Rendement de 13 % et jusqu'à 20 % en labo.



Figure I.2 : silicium poly cristallin.

Les cellules amorphes

- Coût de production bien plus bas.
- Rendement de seulement 6 % par module et de 14 % en labo.

#### **I.4 Orientation des capteurs photovoltaïques**

L'installation des capteurs peut se faire sur un toit si son orientation et son inclinaison sont bonnes ou sur le sol pour peu que l'endroit soit bien dégagé, aéré (10 cm d'espace sous les modules est vivement conseillé) et protégé.

L'inclinaison des capteurs n'est pas critique. On la prend en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15°. La hauteur maximale du soleil varie au cours de l'année, on choisira une inclinaison supérieure ou inférieure à la latitude suivant que les besoins sont les plus importants lorsque la course du soleil est basse (éclairage,...) ou haute (irrigation...). Toutefois, l'inclinaison des capteurs devrait rester supérieure à 10° pour assurer un auto nettoyage lors des pluies.

Il existe aussi des structures beaucoup plus complexes qui suivent le soleil dans son mouvement quotidien pour augmenter l'énergie captée, mais la présence de pièces mobiles réduit la fiabilité et entraîne des coûts supplémentaires élevés. De plus, les moteurs permettant le suivi du soleil demandent aussi de l'énergie, d'où coûts additionnels. Ces structures sont surtout utilisées pour des systèmes photovoltaïques à concentration où seul le rayonnement direct est concentré sur la surface active. Quelle qu'elles soient, ces structures seront solidement ancrées pour résister aux éventuelles tornades, ouragans, cyclones, ... etc.

### **I.5 Systèmes photovoltaïques**

Un capteur photovoltaïque se compose de petites cellules qui produisent une très faible puissance électrique (quelques 3 W) avec une tension continue de moins 1 V. Ces cellules sont disposées en série pour former un module ou panneau permettant de produire une puissance plus élevée. Les panneaux sont finalement interconnectés entre eux (en série et/ou en parallèle) pour obtenir un champ photovoltaïque.

### **I.6 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque**

#### **I.6.1 Avantages**

L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits.

La technologie photovoltaïque est une technologie renouvelable et n'affecte en rien l'environnement à l'inverse des autres énergies fossiles. Le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions, ça se qui lui donne le nom d'énergie propre.

#### **I.6.2 Inconvénients**

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergies en régions isolées. Sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m<sup>2</sup>, 12 m<sup>2</sup> de capteurs PV sont nécessaires pour fournir 1 kWc, ce qui induit un coût élevé du watt crête.

Tributaire des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du système est accru.

Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes.

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste étant dissipé sous forme de chaleur.

C'est cette chaleur qui peut donc être exploitée et nous pouvons augmenter ainsi le rendement global (électrique et thermique des capteurs photovoltaïques).

### **I.7 Secteurs d'applications**

**Domaine spatial :** les premières utilisations de cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,...) remontent aux années soixante.

**Télécommunications :** Téléphonie rurale, faisceaux de relais hertziens,...

**Sites isolés :** Parcs nationaux, forêts, régions isolées, Pompage de l'eau : Bétail, irrigation, domiciles, villages ...

#### **Bâtiments et toits**

**Acquisition de données :** L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie,

la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longue durée de vie des équipements. (25 ans)

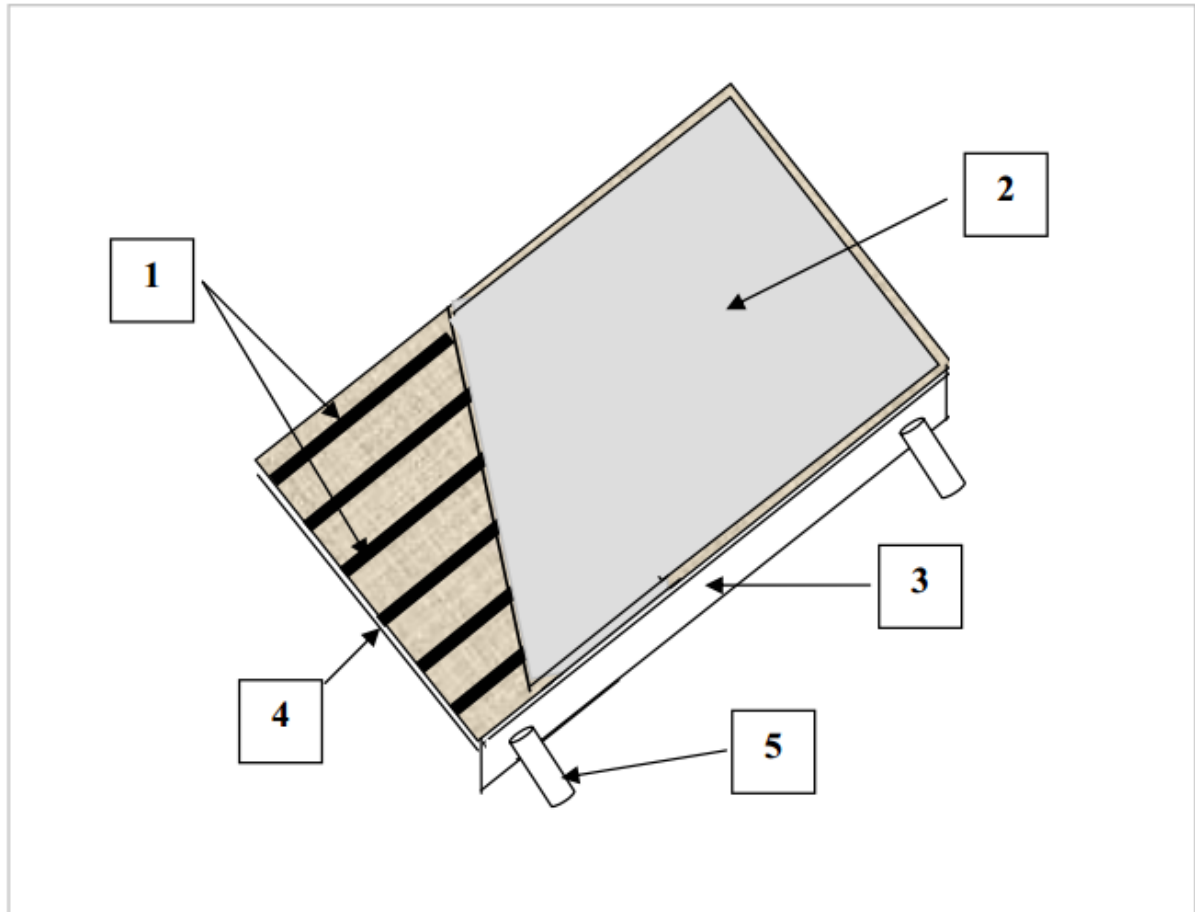
**Domaine du transport :** Lampadaires, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire.

*Chapitre II*  
*Capteurs Thermiques*



## Les capteurs thermiques

La figure II.1 montre une vue en coupe des éléments d'un capteur thermique plat vitré.



**Figure II.1** : Vue en coupe des éléments d'un capteur plat vitré

Avec :

1. Absorbeur métallique
2. Vitrage
3. Boîtier
4. Isolant
5. Entrée du fluide caloporteur

Nous notons que dans le cas où le fluide fonctionnel est de l'air la conduite de passage est dans ce cas rectangulaire, par contre pour l'eau, elle est cylindrique.

## II.1 L'absorbeur

C'est l'élément essentiel du capteur thermique, il a pour rôle d'absorber le rayonnement solaire, ensuite le transformer en chaleur et enfin transmettre cette chaleur au fluide caloporteur.

Pour absorber au maximum l'énergie rayonnée du soleil, il suffit d'une surface plane placée de façon judicieuse (étude de l'inclinaison et de l'orientation). Cette surface doit être douée du coefficient d'absorption de la couche superficielle le plus élevé possible. Les meilleurs coefficients sont de l'ordre de 0,95. Seules les couleurs foncées permettent d'obtenir des valeurs aussi élevées, l'idéal étant le noir évidemment. Par ailleurs, il vaut mieux que cette couleur ait été obtenue par un traitement (chimique ou autre) plutôt que par une couche de peinture (celle-ci étant toujours plus ou moins isolante).

Pour limiter les pertes par réémission de rayonnement infra-rouge, il importe que l'absorbeur possède aussi la propriété d'émissivité superficielle la plus faible possible (valeur inférieure à 0,15). Dans ce cas, l'absorbeur sera qualifié de sélectif.

Après transformation du rayonnement en chaleur sur la face superficielle exposée, il y a lieu de transmettre cette chaleur au fluide. Pour ce faire, la plaque doit être métallique car seuls les métaux ont de bons coefficients de conduction de la chaleur (cuivre: 300 - aluminium: 200 - acier: 60).

**Tableau II.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux**

<b>METAUX ET ALLIAGES (à la température ambiante)</b>			
Aluminium à 99,9 %	<b>228</b>	Zinc	<b>111</b>
Aluminium à 99 %	<b>203</b>	Acier doux (1 % de C)	<b>46</b>
Cuivre à 99,9 %	<b>386</b>	Acier inox (Cr 18 % - Ni 8 %)	<b>16</b>
Etain	<b>61</b>	Alliage (Al 92 % - Mg 8 %)	<b>104</b>
Fer pur	<b>85</b>	Laiton (Cu 70 % - Zn 30 %)	<b>99</b>
Nickel pur	<b>61</b>	Titane	<b>21</b>
Plomb pur	<b>35</b>		
<b>SOLIDES NON METALLIQUES (à la température ambiante)</b>			
Amiante (feuilles)	<b>0,162</b>	Liège	<b>0,046</b>
Béton plein	<b>1,7</b>	Matières plastiques phénoplastes	<b>0,046</b>
Briques de terre cuite pleines	<b>1,16</b>	Matières plastiques polyester	<b>0,209</b>

Plaque de fibrociment	<b>0,74</b>	Matières plastiques polyvinyles	<b>0,162</b>
Verre courant	<b>0,70</b>	Porcelaine	<b>0,928</b>
Verre pyrex	<b>1,16</b>	Laine de verre	<b>0,046</b>
Electrographite	<b>116</b>		
<b>LIQUIDES</b>		<b>GAZ (à 0°C et sous la pression normale)</b>	
Eau à 20°C	<b>0,59</b>	Air	<b>0,024</b>
Eau à 100°C	<b>0,67</b>	Azote	<b>0,024</b>

## II.2 Système de refroidissement par le fluide caloporteur

Quel que soit le système, le contact entre les tuyaux véhiculant le fluide et la plaque absorbante doit être très intime : soit par emboutissage, soit par soudure. De même, l'espacement entre les tuyaux devra être rigoureusement calculé en fonction du diamètre du tuyau, de l'épaisseur de la plaque et des matériaux employés.

## II.3 Isolation et vitrage

Le capteur devant recevoir le rayonnement solaire. Il doit être nécessairement en contact avec le milieu extérieur, les conditions de température et de climat risquent de perturber considérablement son bon fonctionnement.

Limiter les pertes par transmission vers l'extérieur du capteur est primordial si on cherche à optimiser les performances de ce dernier. Nombreux sont les produits isolants qui peuvent convenir pour l'isolation arrière et latérale.

Vers l'avant, comme le rayonnement solaire doit arriver par l'absorbeur, on ne peut utiliser que des matériaux transparents : verre en simple ou double vitrage, trempé ou non, ou certains matériaux plastiques ayant la propriété de réaliser l'effet de serre (c'est le cas de matériaux comme le polycarbonate, le métacrylate et le tedlar). Les inconvénients du verre sont sa fragilité, son poids et son prix élevé en double vitrage. L'inconvénient principal des matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

Les pertes par transmission peuvent également être éliminées en plaçant l'absorbeur sous vide, ce qui permet d'obtenir un rendement élevé même à hautes températures. Ce type de capteur est d'ailleurs surtout utilisé pour certaines applications demandant des températures plus élevées du fluide caloporteur (jusqu'à 150°C).

## **II.4 Avantages et inconvénients de l'énergie thermique :**

### **II.4.1 Avantages**

L'utilisation thermique de l'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses avantages propres, à savoir :

- Les technologies à mettre en œuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel de chauffage, Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.

- Les frais de maintenance sont réduits. Si l'entretien des installations ne doit pas être négligé, les frais de maintenance et donc de fonctionnement sont cependant relativement faibles.

### **II.4.2 Inconvénients**

- Elle est variable dans le temps. Sous les climats tempérés, cette variation est surtout importante en fonction des saisons. Ceci entraîne une nécessité de stocker cette énergie, ce qui augmente considérablement le coût des installations.

- La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée ; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple). - Le chauffe-eau solaire ne permet pas une production d'électricité

# *Chapitre III*

## *Capteurs Photovoltaïques/Thermiques*

## **Capteur hybride PV/T**

La combinaison d'un capteur thermique et d'un panneau photovoltaïque dans un seul capteur permet l'augmentation de l'efficacité de la conversion totale de l'énergie solaire. Un effet de synergie peut être obtenu dans une structure associant ces deux dispositifs de façon judicieuse à ceux du système photovoltaïque et thermique séparément installés.

La production de l'énergie totale (électrique et thermique) du capteur PV/T hybride dépend de l'entrée c'est-à-dire l'énergie du rayonnement solaire, la température ambiante et la vitesse du vent et de la sortie qui est la température de fonctionnement du système. Cette production dépend aussi du mode de l'extraction de la chaleur.

### **III.1 Historique et état de l'art**

Le capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) convertit l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique et un panneau PV dans un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïque et thermique) séparément installés.

Plusieurs instituts et centres de recherches de par le monde ont étudié les capteurs hybrides. Les capteurs hybrides utilisant de l'air et de l'eau avec absorbeur ont été évalués expérimentalement [2] [3] [4] [5] [6], analytiquement [7] [8] [9] et économiquement. Des travaux ont été menés pendant trois ans au Massachusetts Institute of Technology [10]. 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.

Kern et Russell, 1978 [11], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Hendrie, 1979 [12], présente un modèle théorique sur les systèmes PV/T qui utilisent des techniques du capteur plan thermique conventionnel.

Bhargava et al 1991 [13] et Prakash 1994 [14] 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 été étudiés par Sopian et al en 1995 et en 1996 [15]. Dans les travaux précités le rendement thermique de ces systèmes PV/T était dans la gamme de 45% à 65%.

Bergene et Lovvik, 1995 [9], ont analysé le transfert de l'énergie entre les différents composants du système hybride PV/T utilisant du liquide comme fluide caloporteur. Une étude paramétrique pour l'habitat a été présentée par Brinkworth et al, 1997 [16]. Garg et Adhikari, 1999 [17] ont étudié le system PV/T utilisant de l'air pour le chauffage en simple et en doubles vitrages.

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 Hauser et Rogash, 2000 [18]. Le capteur hybride PV/T avec réservoir de l'eau chaude a été proposé par Huang et al, 2001 [19] et une autre conception des système PV/T a été incluse récemment par Zondag et al, 2002 et 2003 [20] [21].

H.A. Zondag et al [22] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride

On peut considérer pour les capteurs hybrides un rendement total de conversion qui est la somme du rendement thermique et du rendement électrique.

Y. Tripanagnostopoulos a appliqué le système basé sur le refroidissement des capteurs photovoltaïque aux capteurs hybrides à concentrateurs [23].

Récemment (fin 2004), dans les applications stationnaires, un modèle simplifié permettant d'étudier le comportement énergétique global d'un prototype de toiture d'une habitation (6 m<sup>2</sup> de capteurs hybrides photovoltaïque thermiques) a été développé [24].

### **III.2 Modèle réduit utilisé pour la simulation du capteur hybride PV/T :**

$T_c$  : 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 :

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

$$T_c = \frac{q_{th} + U_t T_{amb} + U_T T_{ted}}{U_t + U_T} \quad (1)$$

$$T_{ted} = \frac{U_T T_c + h_1 T_f + h_{rc} T_{alum}}{U_T + h_1 + h_{rc}} \quad (2)$$

$$T_{alum} = \frac{U_b T_{amb} + h_2 T_f + h_{rc} T_{ted}}{U_b + h_2 + h_{rc}} \quad (3)$$

$$T_f(x) = \left( T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) e^{\frac{-w}{\dot{m} C_p} (h_1 + h_2) x} + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \quad (4)$$

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx = -\frac{1}{L} \frac{\dot{m} C_p}{(h_1 + h_2)} \left( T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) \left( e^{\frac{-w}{\dot{m} C_p} (h_1 + h_2) L} - 1 \right) + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} L \quad (5)$$

$\dot{m}$  : 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/m<sup>2</sup>K) ;  $h_2$  : le coefficient de transfert de chaleur convectif de la surface intérieure du matériau d'isolation au fluide en mouvement (W/m<sup>2</sup> K) ;  $h_{rc}$  : le coefficient de transfert de chaleur radiatif entre le module surface arrière et la surface intérieure de l'isolation (W/m<sup>2</sup>K) ;  $q_{th}$  : le flux d'énergie thermique absorbé par unité de surface (W/m<sup>2</sup>) ;  $T_{amb}$  : 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 / m<sup>2</sup> K) ;  $U_t$  : le coefficient de perte global supérieure de la cellule solaire à couvercle en verre (W / m<sup>2</sup> K) ;  $U_T$  : le coefficient de transfert de chaleur par conduction à travers cellule solaire et tedlar (W / m<sup>2</sup> 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 (1), (2), (3) dans l'équation. (4) donne une équation différentielle linéaire à coefficients constants, qui peut être résolu analytiquement [28] en considérant la condition aux limites de  $T_f = T_{fin}$  en  $x = 0$ .

$$q_u = q_{th} - U_t(T_c - T_{amb}) + U_b(T_{alum} - T_{amb}) \quad (6)$$

$$q_{th} = S - E_c \quad (7)$$

$$S = (\tau\alpha)_{eff} G \quad (8)$$

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau_g \alpha_c \beta_c + \tau_g \alpha_T (1 - \beta_c) \quad (10)$$

$$E_c = \tau_g \beta_c \eta_e G \quad (11)$$

$$T_{ted} = \frac{U_T T_c + h_1 T_f + h_{rc} T_{alum}}{U_T + h_1 + h_{rc}} \quad (12)$$

$$T_{alum} = \frac{U_b T_{amb} + h_2 T_f + h_{rc} T_{ted}}{U_b + h_2 + h_{rc}} \quad (13)$$

$$T_f(x) = \left( T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) e^{\frac{-w}{\dot{m} C_p} (h_1 + h_2) x} + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \quad (14)$$

$$\bar{T}_f = \frac{1}{L} \int_0^L T_f dx = -\frac{1}{L} \frac{\dot{m} C_p}{(h_1 + h_2)} \left( T_{fe} - \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} \right) \left( e^{\frac{-w}{\dot{m} C_p} (h_1 + h_2) L} - 1 \right) + \frac{h_1 T_{ted} + h_2 T_i}{h_1 + h_2} L \quad (15)$$

$$q_u = q_{th} - U_t(T_c - T_{amb}) + U_b(T_{alum} - T_{amb}) \quad (16)$$

$$q_{th} = S - E_c \quad (17)$$



$$S = (\tau\alpha)_{eff}G \quad (18)$$

$$(\tau\alpha)_{eff} = \tau_g\alpha_c\beta_c + \tau_g\alpha_T(1 - \beta_c) \quad (19)$$

$$E_c = \tau_g\beta_c\eta_eG \quad (20)$$

Les coefficients de transfert de chaleur par les équations :

$$U_T = \left[ \frac{e_c}{k_c} + \frac{e_T}{k_T} \right]^{-1} \quad (21)$$

$$U_t = \left[ \frac{e_v}{k_v} + \frac{1}{(h_{rvc}+h_0)} \right]^{-1} \quad (22)$$

$$U_b = \left[ \frac{e_i}{k_i} + \frac{1}{(h_0)} \right]^{-1} \quad (23)$$

$$h_0 = 2.8 + 3V_{vent} \quad (24)$$

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 [29] ou celle de Kays- Crawford pour un écoulement turbulent [27]. Le flux de chaleur est :

$$\dot{Q}_u = \dot{m}C_p(T_{fs} - T_{fe}) \quad (25)$$

Le rendement thermique est donné par :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{Q}_u}{GA} = \frac{\bar{q}_u}{G} \quad (26)$$

$$T_v = T_c - U_t(T_c - T_{amb}) \frac{e_g}{k_g} \quad (27)$$

$$T_{inf} = T_i - U_b(T_{alum} - T_{amb}) \frac{e_i}{k_i} \quad (28)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement,  $h_{rvc}$  de la couverture en verre à la température ambiante est calculée comme suit :

$$h_{rvc} = \sigma\epsilon_g \frac{(T_v+T_{ciel})(T_v^2-T_{ciel}^2)(T_v-T_{ciel})}{(T_v-T_{amb})} \quad (29)$$

$$T_{ciel} = 0.0552 (T_{amb})^{1.5} \quad (30)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement,  $h_{rc}$  :

$$h_{rc} = \sigma \frac{(T_{ted}+T_{alum})(T_{ted}^2+T_{alum}^2)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} \quad (31)$$

Où :  $\epsilon_1$  et  $\epsilon_2$  sont les émissivités des surfaces intérieures du conduit d'air.

### III.3 Partie électrique :

$$(\bar{T}_c - T_{amb}) \quad (32)$$

D'où :

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

$$I = I_L - I_D - I_{sh} = I_L - I_0 \left( e^{\frac{V+IR_S}{a}} - 1 \right) - \frac{V+IR_S}{R_{sh}} \quad (33)$$

$$\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_c} = \beta = \frac{V_{oc}(T_{c,ref} + \Delta T) - V_{oc}(T_{c,ref})}{\Delta T} \quad (34)$$

$$\frac{a}{a_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (35)$$

$$I_L = \frac{S}{S_{ref}} [I_{L,ref} + \alpha(T_c - T_{c,ref})] \quad (36)$$

$$\frac{I_0}{I_{0,ref}} = \left( \frac{T_c}{T_{c,ref}} \right)^3 \exp\left( \frac{E_g}{KT_c} - \frac{E_g}{KT_{c,ref}} \right) \quad (37)$$

$$\frac{E_g}{E_{g,ref}} = 1 - C(T_c - T_{c,ref}) \quad (38)$$

$$\frac{R_{sh}}{R_{sh,ref}} = \frac{S_{ref}}{S} \quad (39)$$

$$R_s = R_{s,ref} \quad (40)$$

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

$$P = IV \quad (41)$$

$$\eta_e = \frac{P_{mp}}{A_m G} = \frac{V_{mp} I_{mp}}{A_m G} \quad (42)$$

### 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*. 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

$$\eta_G = \eta_{th} + \eta_{e,th} = \eta_{th} + \frac{\eta_e}{C_f} \quad (43)$$

Où :  $C_f$  est le facteur de conversion = 0.36 [25,26], Dans le cadre de notre simulation nous avons considéré  $C_f = 0.36$ .

*Chapitre IV*  
*Résultats Discussions et*  
*Interprétations*

## Résultats, Discussions et interprétations

Nous avons effectué notre simulation en utilisant les données météorologiques de la journée du 01 Juin 2016.

### IV.1- Sensibilité à l'éclairement solaire :

Dans ce premier cas nous nous sommes intéressés à l'effet de l'éclairement solaire sur les caractéristiques thermoélectriques du capteur hybride PV/T à air, pour cela nous avons effectué plusieurs simulations en faisant varier le rayonnement solaire par rajout ou soustraction d'une valeur constante durant toute la journée. Les données de l'éclairement utilisées pour les simulations faites sont montrées sur la figure ci-contre :

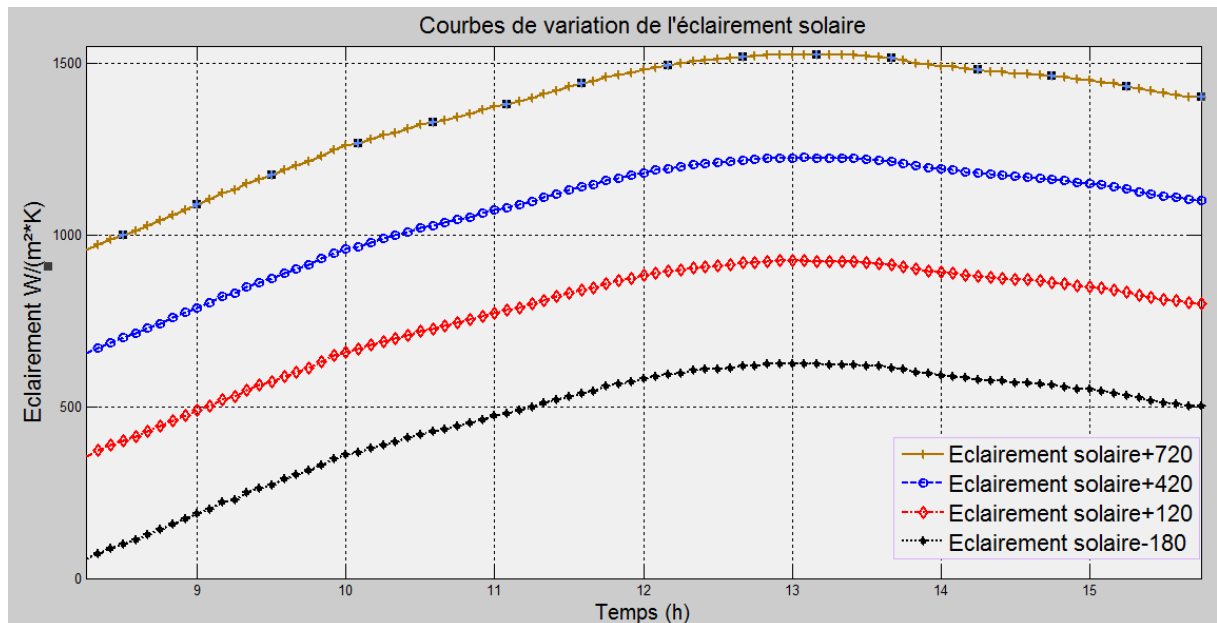


Figure IV.1 : Variation de l'éclairement solaire durant une journée

La figure IV.2 montre la variation de la température de tedlar en fonction de la variation de l'éclairement solaire.

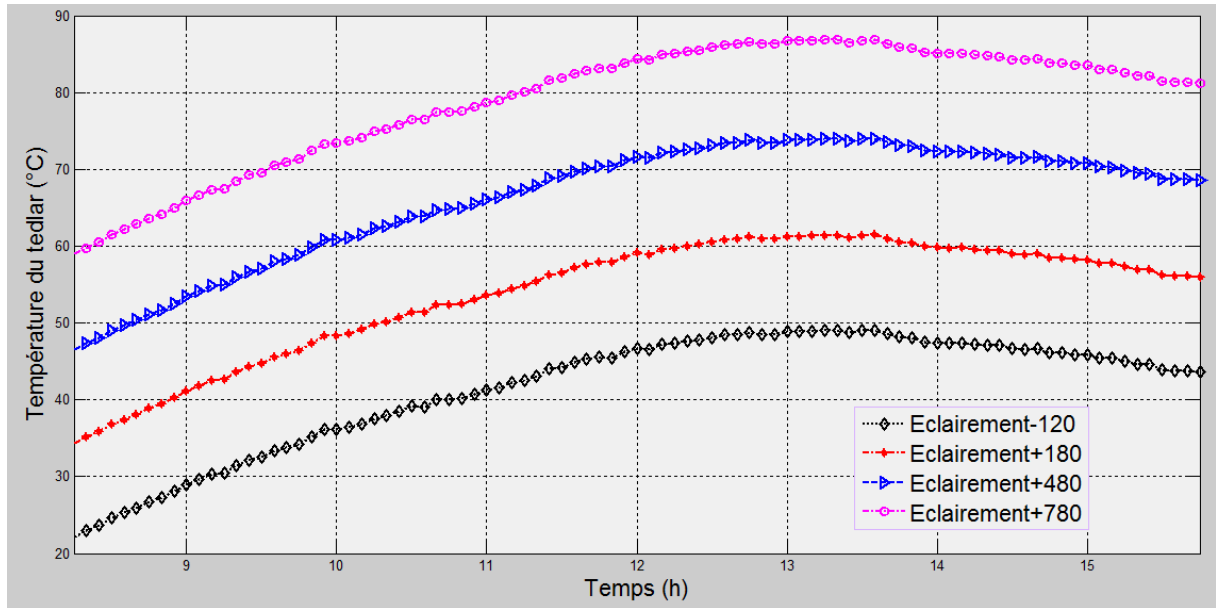


Figure IV.2 : Variation de la température du tedlar durant une journée

Il est facilement remarquable que la variation de la température de tedlar est similaire à la variation de l'éclairage solaire, ce qui fait qu'elle directement proportionnelle à la variation de l'éclairage solaire.

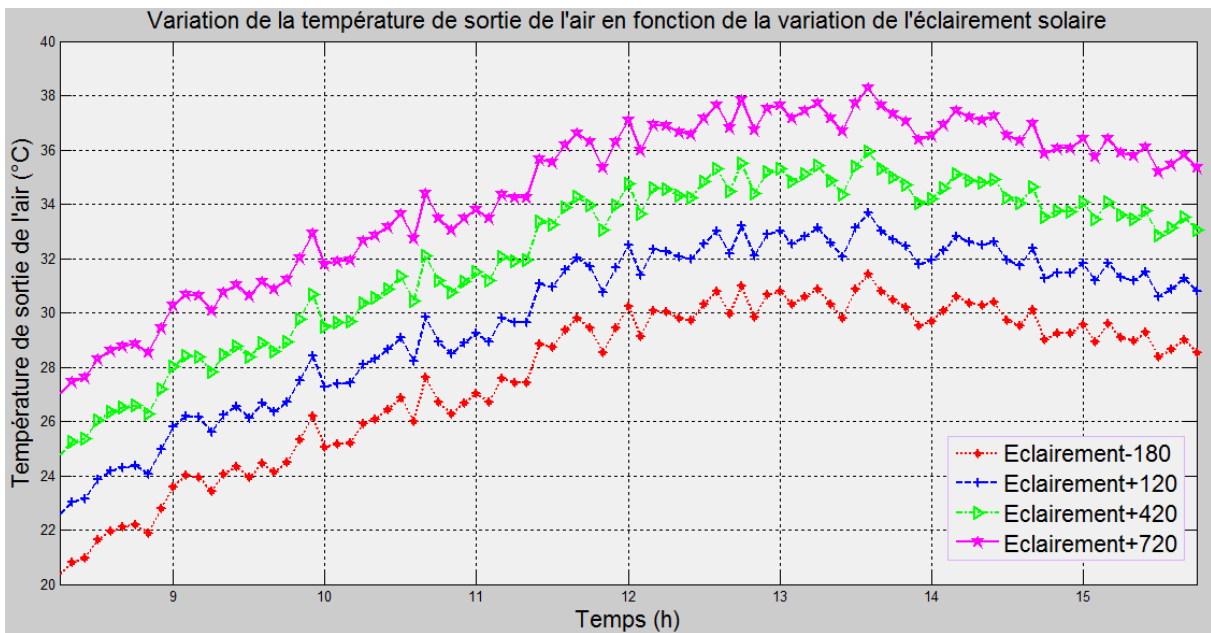


Figure IV.3 : variation de la température de sortie d'air en fonction de la variation de l'éclairage solaire

De même pour la variation de la température de sortie d'air qui est directement proportionnelle à la variation de l'éclairage solaire

Les résultats de l'effet de la variation du rayonnement sur performance du système sont montrés sur les figures ci-après.

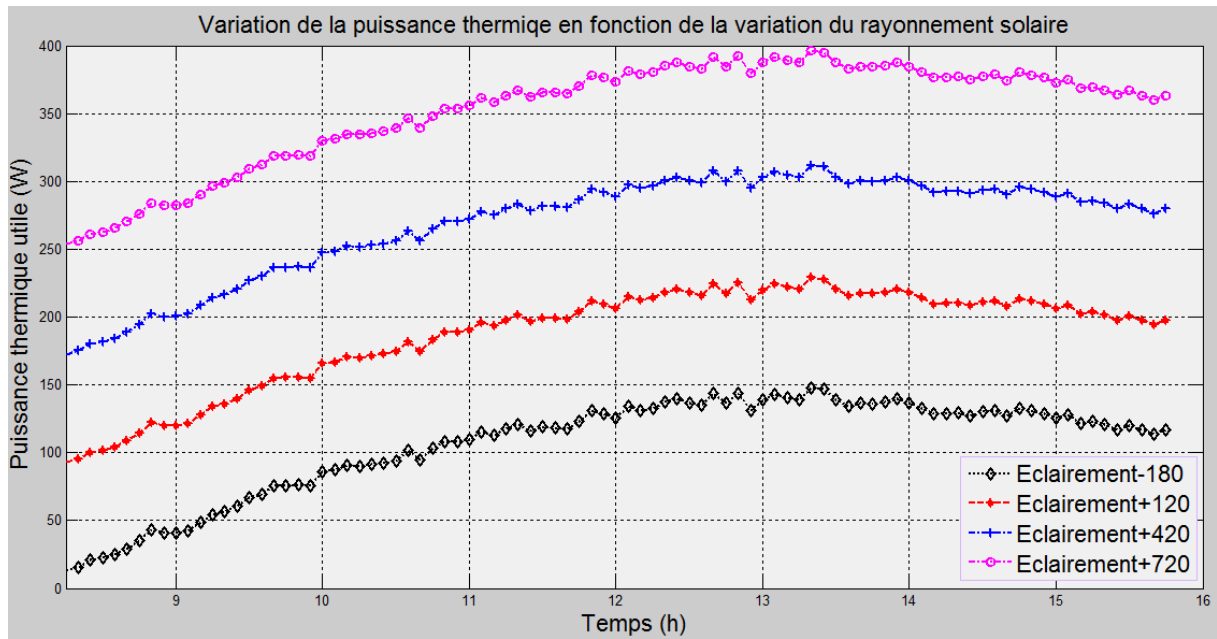


Figure IV.4 : variation de la puissance thermique utile produite par le capteur hybride en fonction de la variation du rayonnement solaire.

Nous constatons que la variation de la puissance thermique utile produite par le capteur hybride est directement proportionnelle à l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire.

Pour le rendement thermique, il est calculé à partir du rapport de la puissance thermique utile produite par le capteur, et du rayonnement solaire incident sur la surface du capteur, le résultat de ce rapport est montré sur la figure suivante :

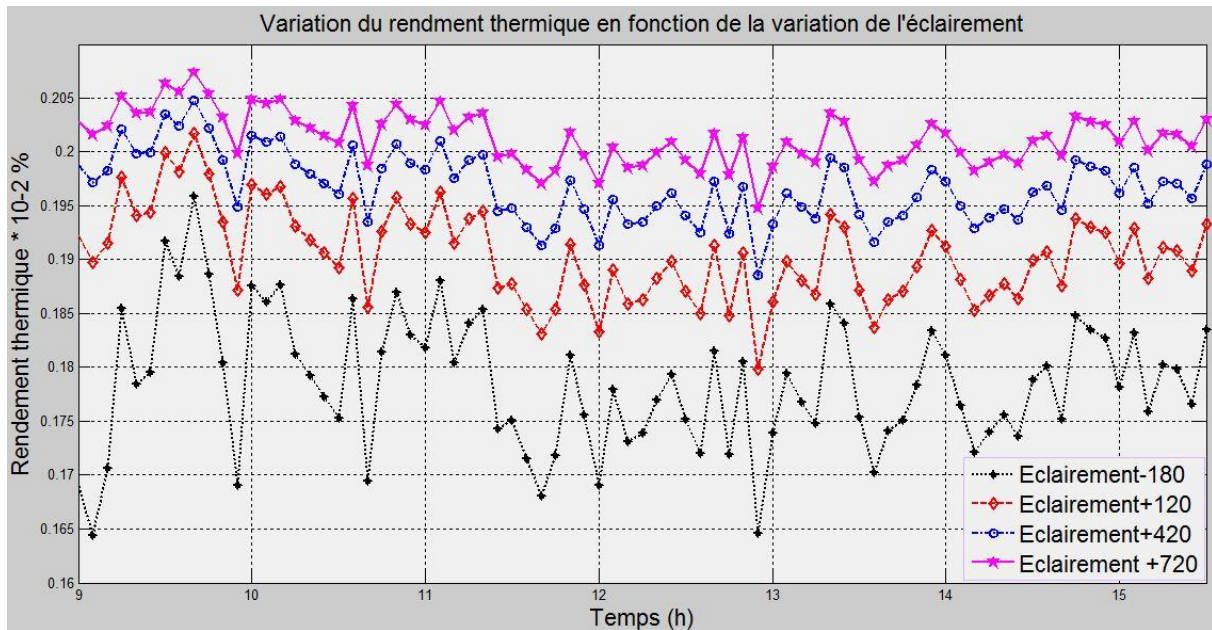


Figure IV.5 : Variation du rendement thermique en fonction de la variation du rayonnement solaire pendant une journée

On peut constater que le rendement thermique est influencé par valeurs rayonnement solaire, tel que pour une variation de pas fixe à  $\Delta G=300\text{W/m}^2$ , nous constatons que la variation de la différence du rendement solaire varie en diminuant avec l'augmentation du rayonnement solaire. Ceci peut nous permettre de supposer qu'il y a une valeur limite de l'éclairement solaire au de la de laquelle le rendement thermique du capteur tend à atteindre sa valeur maximale.

La figure ci-après montre la variation du rendement électrique en fonction de la variation de l'éclairement solaire.



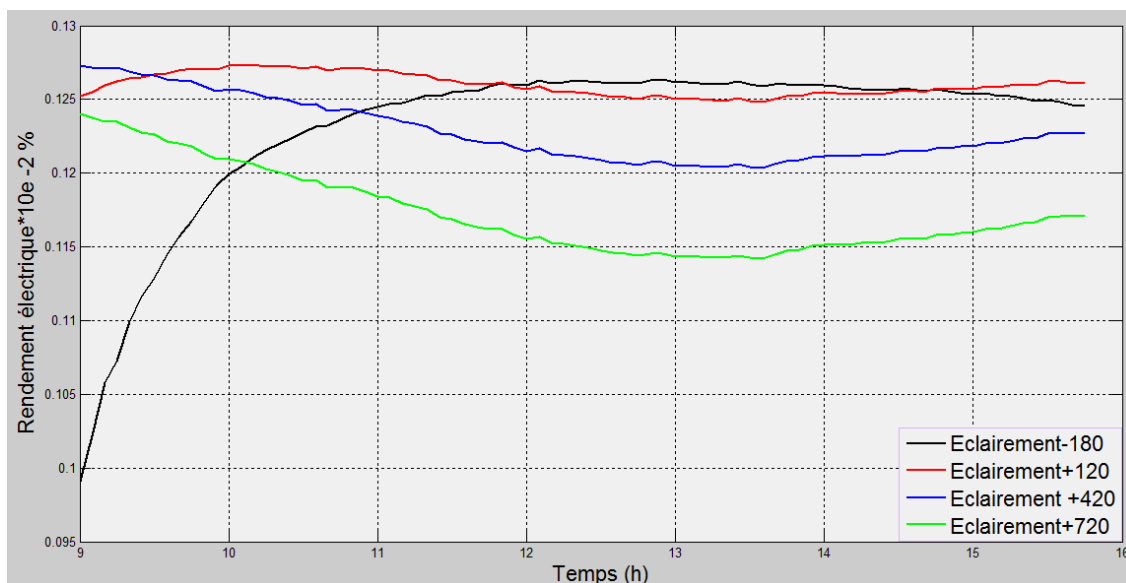


Figure IV.6 : Variation du rendement électrique en fonction de la variation du rayonnement solaire.

Nous pouvons constater que la variation du rendement électrique en fonction de la variation du rayonnement solaire varie en diminuant, cela revient au fait que l'augmentation de l'éclairement solaire engendre une augmentation de la température de tedlar et des cellules photovoltaïques.

Notons que pour les faibles valeurs du rayonnement solaire, le rendement électrique du capteur tend vers une valeur minimale et donc par conséquent, on peut dire que le rendement électrique subit une grande augmentation en lors de l'apparition d'un rayonnement incident, il atteints sa valeur maximale pour laquelle la température des cellules n'est pas beaucoup influencée, ensuite il commence à chuter en fonction de l'augmentation du rayonnement solaire à cause de l'augmentation de l'éclairement solaire.

## IV.2 Sensibilité à la vitesse du vent :

La vitesse du vent est l'un des paramètres les plus importants influençant sur le fonctionnement des capteurs solaire, dans ce qui suit nous allons faire varier la valeur moyenne de cette vitesse durant la journée et nous voyons la variation du comportement thermoélectrique du capteur hybride résultant. La figure ci-après montre les valeurs des vitesses du vent, avec lesquelles notre système va t être testé.

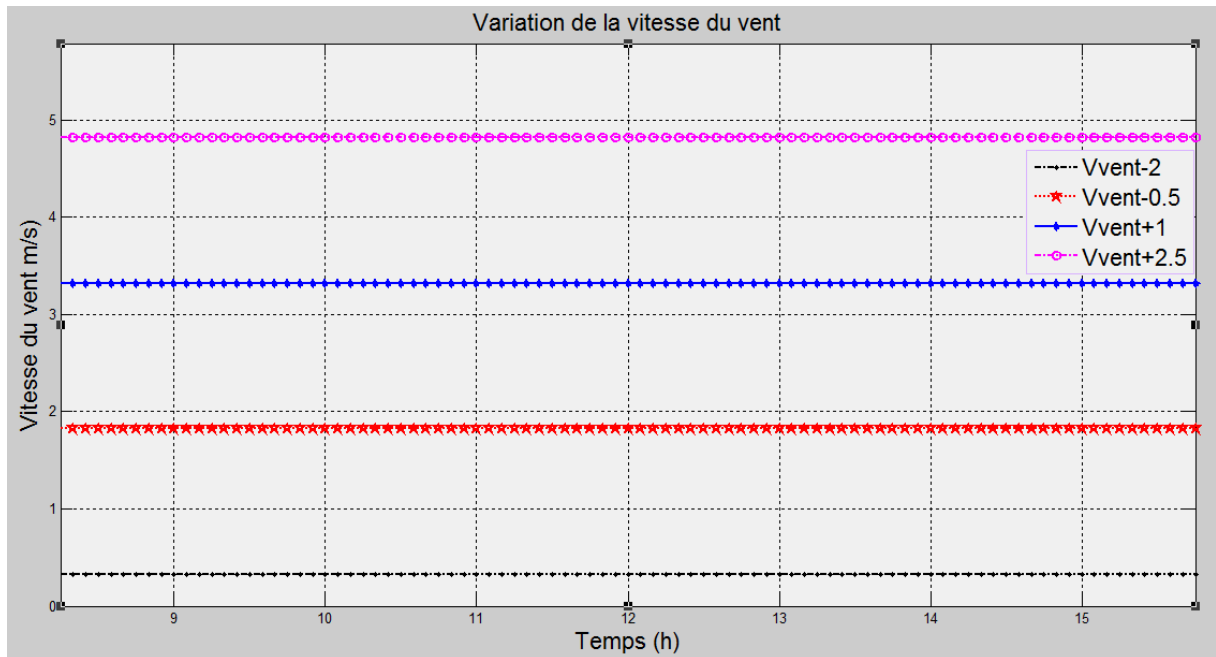


Figure IV.7 : Variation de la vitesse du vent durant la journée

La figure ci-dessous montre la variation de la température de tedlar en fonction de la vitesse du vent.

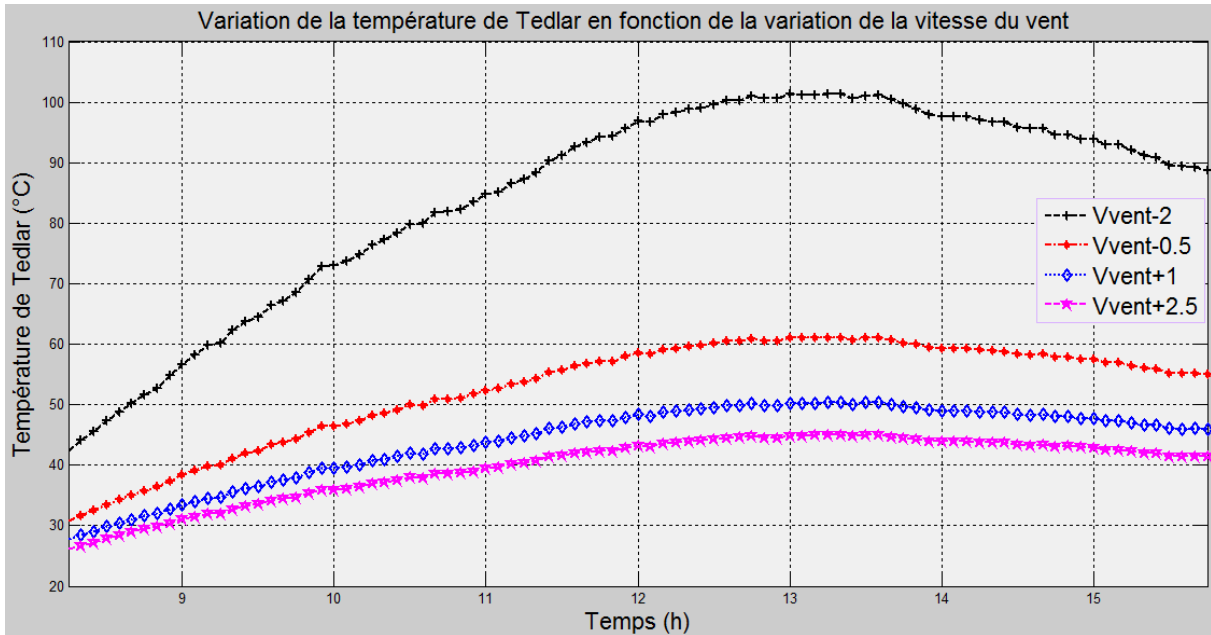


Figure IV.8 : variation de la température de tedlar en fonction de la variation de la vitesse du vent.

Nous constatons que pour les faibles valeurs de  $V_{vent}$  la température de tedlar est très grande pouvant atteindre des valeurs supérieures à  $100^{\circ}\text{C}$ ,

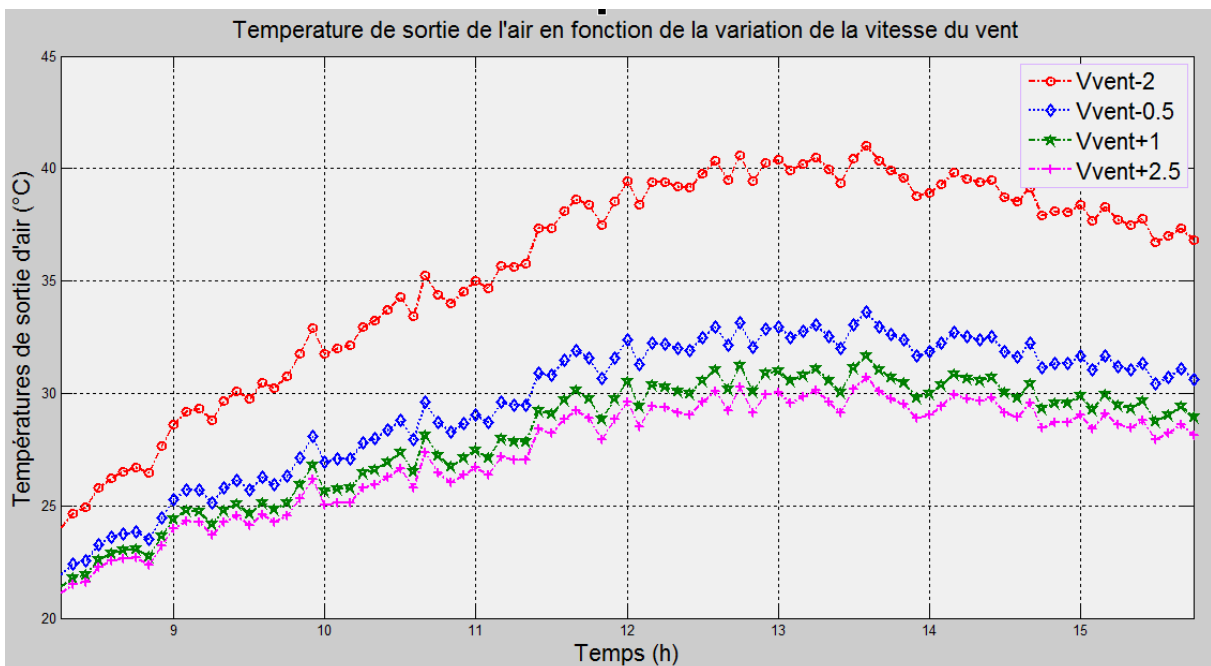


Figure IV.9 : variation de la température de sortie d'air en fonction de la vitesse du vent

On peut aussi remarquer que les températures de tedlar et de sortie d'air tendent à se stagner vers des valeurs limites pour les valeurs des vitesses du vent très élevées, tel que pour une variation de pas fixe à  $\Delta V=1.5$  m/s, nous trouvons que la variation des différences des températures du vent et du tedlar varient en diminuant avec l'augmentation de la vitesse du

vent ( $\Delta T$  diminue). Ceci peut nous permettre de supposer qu'il y a une valeur limite de la vitesse du vent au de la de laquelle les températures du capteur tendent à se stagner vers des valeurs limites.

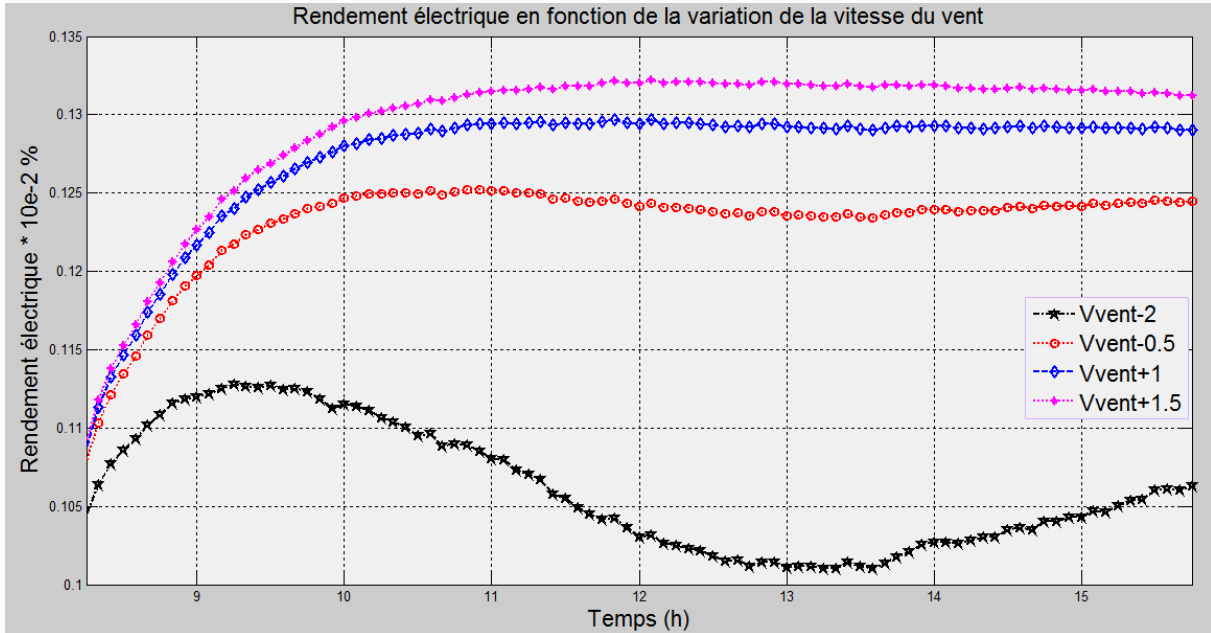


Figure IV.10 : rendement électrique en fonction de la variation de la vitesse du vent

Pour les performances du système nous remarquons que le rendement électrique varie en augmentant avec l'augmentation la vitesse du vent

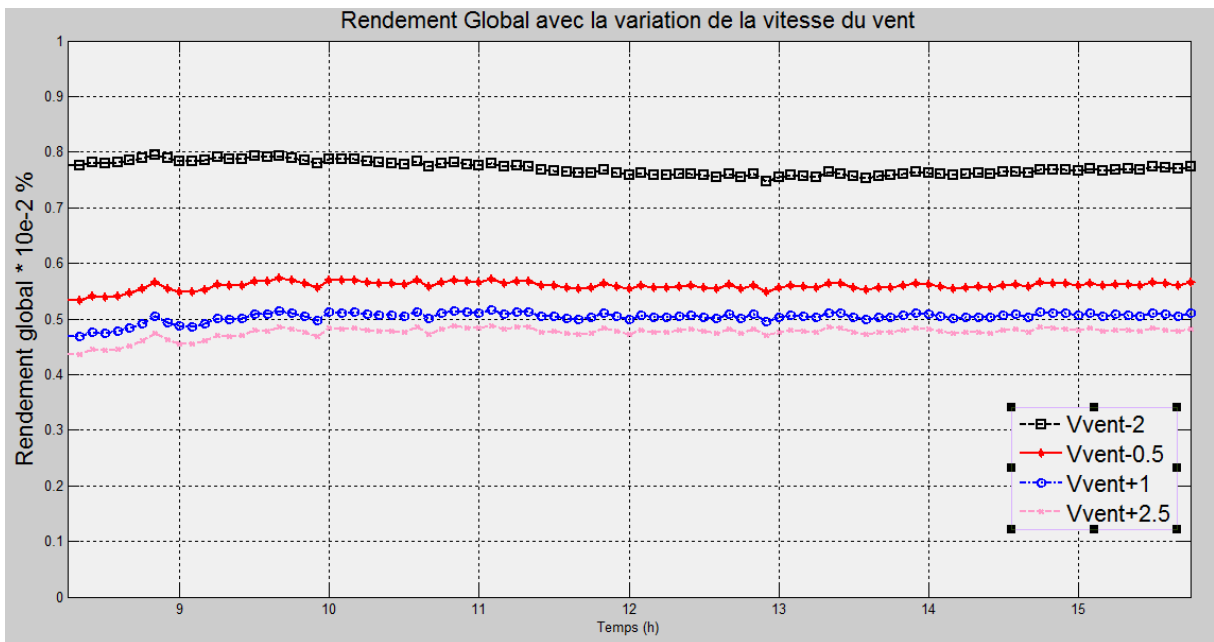


Figure IV.11 : Variation du rendement global en fonction de la variation du rayonnement solaire

Nous pouvons dire que l'augmentation de la vitesse du vent fait diminuer les performances thermiques et augmenter les performances électriques du système vers une valeur limite

### IV.3 Sensibilité au débit d'air introduit :

Le débit d'air est l'un des paramètres les plus importants influençant sur le fonctionnement des capteurs solaire, dans ce qui suit nous allons faire varier la valeur moyenne de ce débit durant la journée et nous voyons la variation du comportement thermoélectrique du capteur hybride résultant.

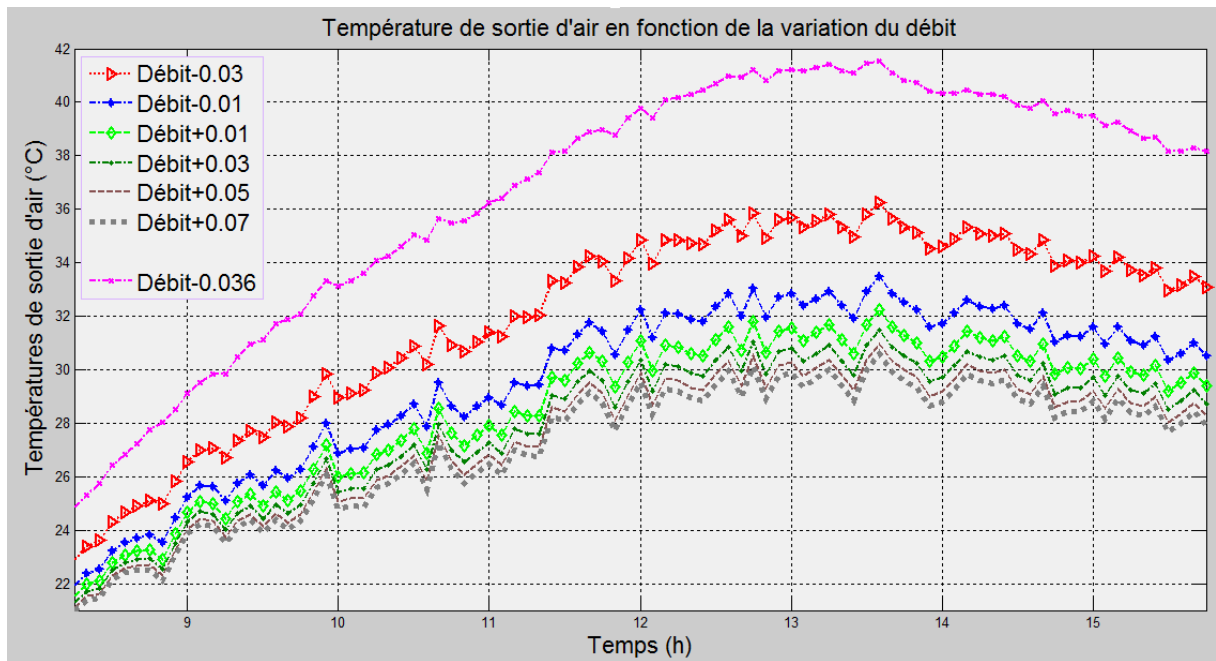


Figure IV.12 : Variation de la température de sortie en fonction de la variation du débit

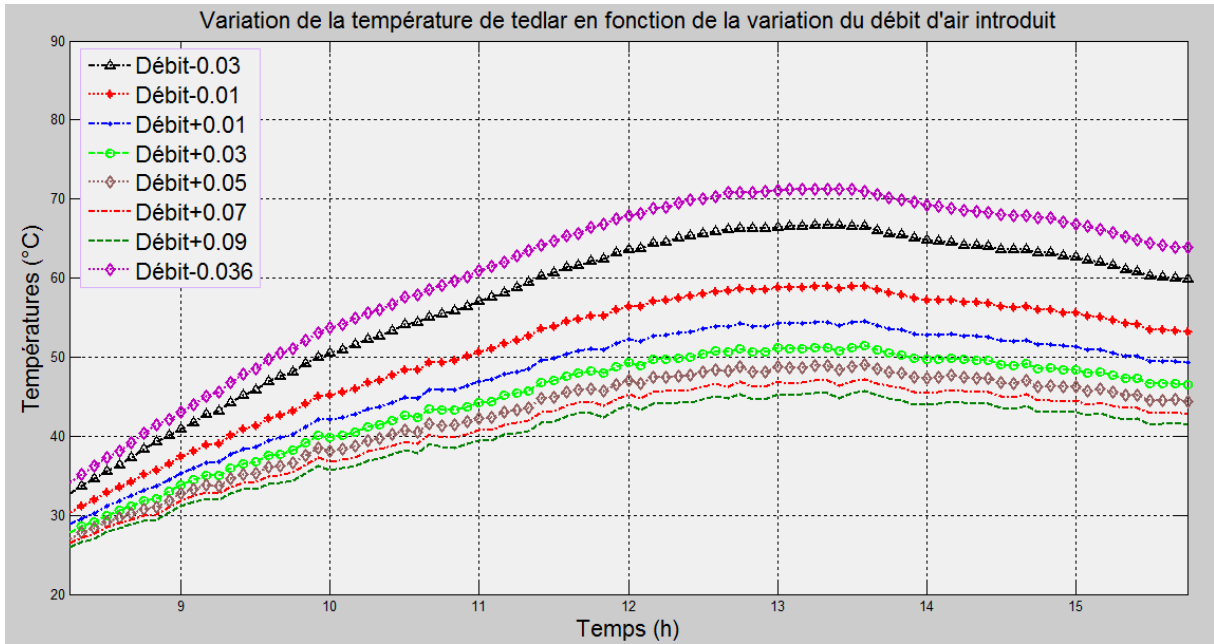


Figure IV.13 : variation des températures en fonction du débit d'air introduit

On peut aussi remarquer que les températures de tedlar et de sortie d'air tendent à se stagner vers des valeurs limites pour les valeurs des débits très élevées, tel que pour une variation de pas fixe à  $\Delta m=1.5$  kg/s, nous trouvons que la variation des différences des températures du vent varient en diminuant avec l'augmentation de la vitesse du vent ( $\Delta T$  diminue). Ceci peut nous permettre de supposer qu'il y a une valeur limite de la vitesse du vent au de la de laquelle les températures du capteur tendent à atteindre leurs valeurs limites.

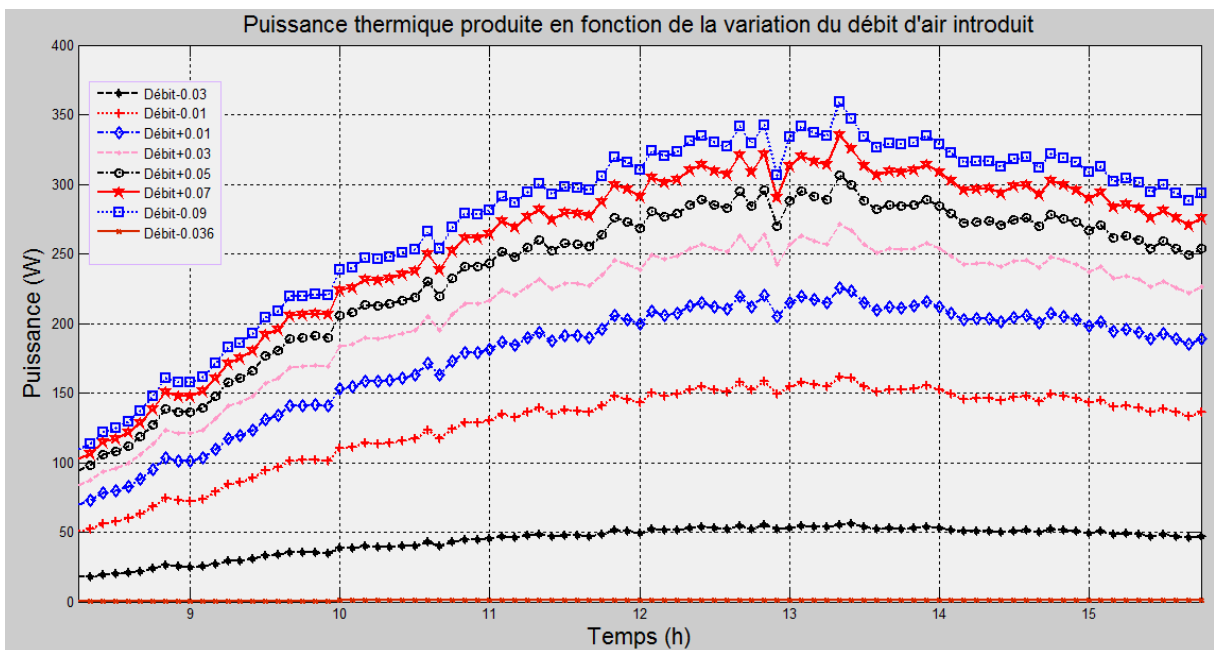


Figure IV.14 : variation de la puissance en fonction du débit d'air introduit

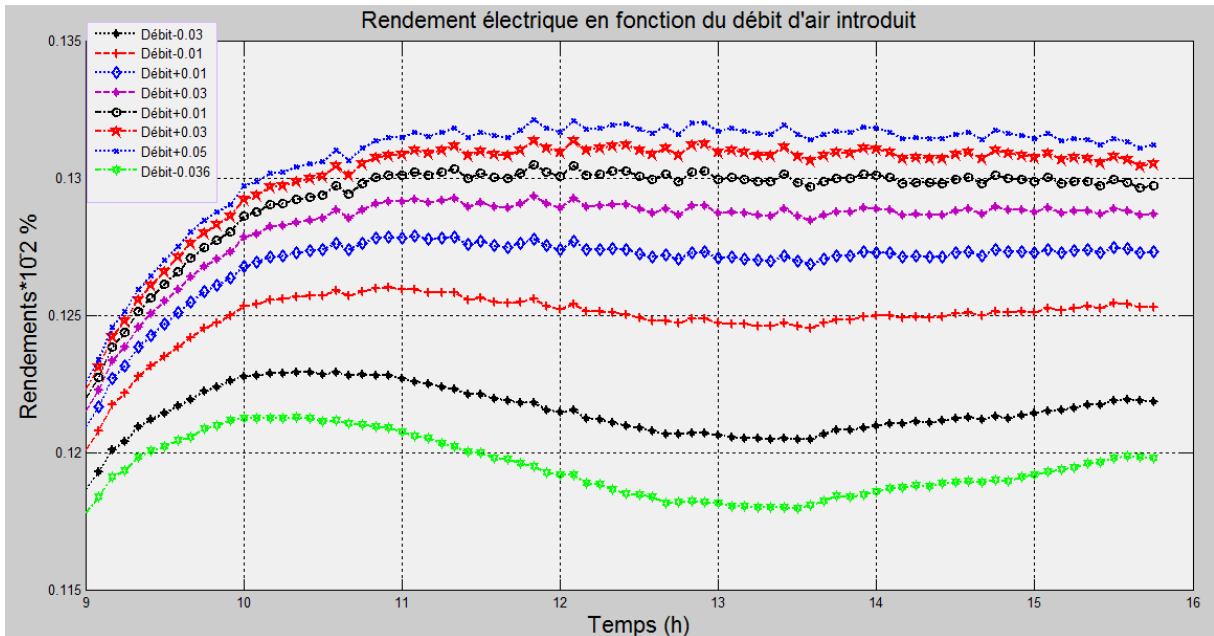


Figure IV.15 : variation du rendement électrique en fonction du débit d'air introduit

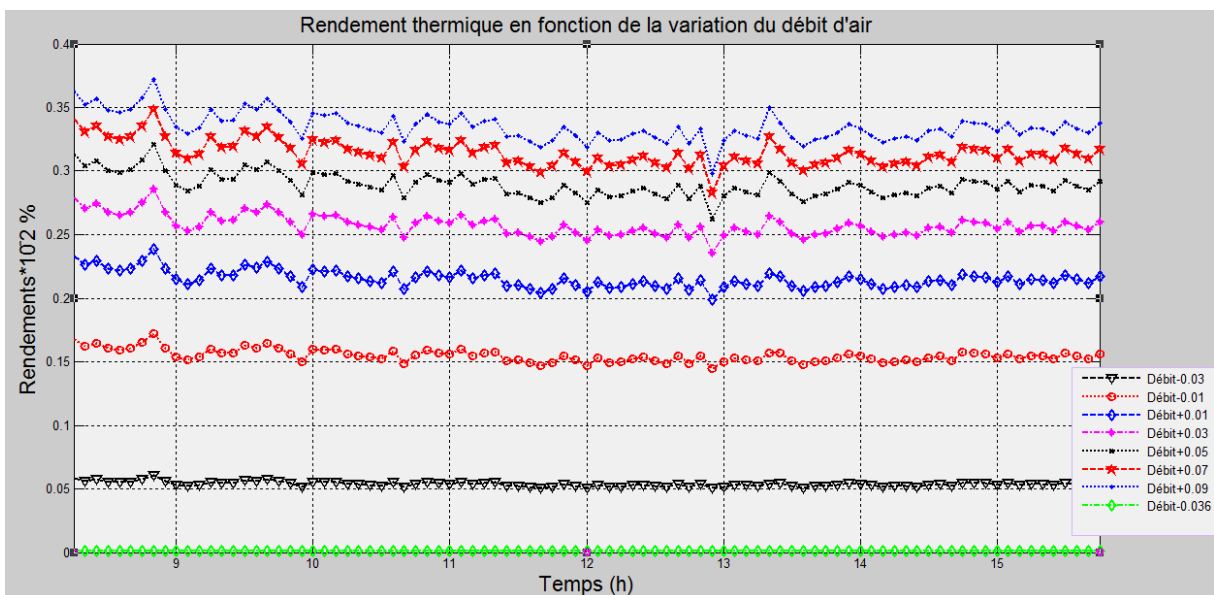


Figure IV.16 : variation du rendement thermique en fonction du débit d'air introduit

Pour les performances du système nous remarquons que le rendement électrique varie en augmentant avec l'augmentation du débit d'air introduit.

Nous pouvons dire que l'augmentation de débit d'air introduit fait augmenter les performances du système vers une valeur limite.

# *Conclusion Générale*



## **Conclusion Générale :**

*Le présent projet introduit dans le cadre de ce mémoire de master une étude thermoélectrique à caractère théorique où nous nous intéressons à la distribution des températures dans les différentes parties du capteur hybride photovoltaïque thermique et dans ses différentes couches en fonction du temps, cette distribution de température est le facteur essentiel déterminant les performances thermoélectriques du capteur hybride PV/T à air.*

*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.*

*A la fin de ce travail nous pouvons conclure que le capteur solaire hybride photovoltaïque thermique peut être influencé par plusieurs paramètres externes et internes, nous notons pour cette étude que sa sensibilité au rayonnement solaire, à la vitesse du vent et au débit d'air introduit est comme suit :*

- *Une augmentation du rayonnement solaire fait augmenter toutes les températures du système tout en gardant un débit d'air fixe, nous obtenons par conséquent une diminution du rendement électrique et une augmentation du rendement thermique.*
- *Une augmentation de la vitesse du vent engendre une diminution de toutes les températures du système tout en gardant un débit d'air fixe, nous obtenons par conséquent une augmentation du rendement électrique et une diminution du rendement thermique.*
- *Une augmentation du débit d'air introduit fait diminuer les températures du système, sa grandeur rentrant sur l'expression du rendement thermique le fait augmenter, par conséquent les deux rendements électrique et thermique augmentent.*

*Nous notons de même que la variation de ces paramètres externes et internes influent sur le comportement thermoélectrique du capteur de façon exponentiel, tel que en gardant un pas de variation des paramètres constant, nous enregistrons une diminution du pas de variation des grandeurs du système.*

*On peut résumer 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 aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïques et thermiques) séparément installés.*

## *Références Bibliographiques*

## *Références Bibliographiques*

- [1] B.Equer, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, volume 1. Ellipses, (1993).
- [2] Suzuki A. and Kitamura S, Combined photovoltaic and thermal hybrid collector. Proceedings of the 1st photovoltaic science and engineering conference in Japan, Japanese journal of applied physics, Volume 19 (1980) supplement 19-2, p79-83, (1979).
- [3] Russell T. E.A, Combined photovoltaic/thermal collector panels of improved design. p990- 996, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p990-996, (1981).
- [4] Tscharnner R. et al., Low temperature liquid PV/T collector, 5th Photovoltaic Solar Energy Conference. (CEC), p560-564, (1983).
- [5] Lalovic B. et al., The application of hybrid a-Si:H PV and Thermal collectors for different usages. 8th Photovoltaic solar energy conference, (CEC), p280-283, (1988).
- [6] Sudhakar S.V. and Sharon M, Fabrication and performance evaluation of a photovoltaic/thermal hybrid system. SESI Journal 4(1): p1-7, (1994).
- [7] Florschuetz L.W, Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. Solar Energy, Vol 22, p361-366, (1979).
- [8] Takashima T, New proposal for photovoltaic/thermal solar energy utilization method. Solar Energy, Vol. 52, p241-245, (1994).
- [9] Bergene T. and Lovvik O.M, Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. Solar Energy, Vol. 55, p453-462, (1995).
- [10] Hendrie S.D, Photovoltaic/thermal collector development program - final report, Lexington, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, (1982).
- [11] Kern Jr. E.C. and Russell M. C., Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. In Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, p1153 - 1157. (1978).
- [12] Hendrie S. D, Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors. In Proc. ISES Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, p1865 – 1869, (1979).
- [13] Bhargava A. K, Garg H. P. and Agarwal R. K., Study of a hybrid solar system - solar air heater combined with solar cells. Energy Convers. Mgmt 31, 471 - 479. (1991). - 132 –
- [14] Prakash J, Transient analysis of a photovoltaic / thermal solar collector for cogeneration of electricity and hot air / water. Energy Convers. Mgmt 35, p 967 – 972, (1994).
- [15] Sopian K., Liu H. T., Yigit K. S., Kakac S. and Veziroglu T. N., An investigation into the performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector. In Proc. ASME Int.

- Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, USA, AES Vol. 35, p 89 – 94. (1995).
- [16] Brinkworth B. J, Cross B. M., Marshall R. H. and Hongxing Yang, Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy* 61, p169-178, (1997).
- [17] Garg H. P. and Adhikari R. S, Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *Int. J. Energy Res.*23, p1295 – 1304, (1999).
- [18] Hauser T., Rogash H, Latent heat storage on photovoltaics. In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol III, p2265 – 2267, (2000).
- [19] Huang B.J, Lin T.H., Hung W.C. and Sun F.S., Performance evaluation of solar photovoltaic / thermal systems. *Solar Energy* 70, p443 – 448, (2001).
- [20] Zondag H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C., Van Steenhoven A.A, The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* Vol. 72, No. 2, p113–128, (2002).
- [21] Zondag H. A., de Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C., Van Steenhoven A.A, The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74, p235-269. (2003).
- [22] H.A. Zondag, M.J. Elswijk, M. Bakker, PV-Thermal collector development – an overview of the lessons learnt. 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June , Paris, France (juin 2004).
- [23] Y. Tripanagnostopoulos, Low concentration hybrid photovoltaic/thermal (pv/t) solar energy systems. IP programme : “ICT Tools : PV systems Teaching and Learning Patra 1st July-10th July, (juillet 2004).
- [24] E. Geslain-Vertut, H. Demasles, D. Blanquet, Y. Lausenaz, Y. Jautard, E. Beluche and Y. Bouzidi, Optimisation of the design of a semi-transparent photovoltaic roof (PV/Thermal modules), 19th European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition, Paris, (juin 2004).
- [25] SARHADD F., FARAHAT 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.
- [26] DUFFIE J.A., BECKMAN W.A. *Solar engineering thermal processes*. 3<sup>rd</sup> Edition, John Wiley & Sons Inc., USA, 2006.
- [27] 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.
- [28] STEPHENSON G. *Mathematical methods for science students*. 2<sup>nd</sup> Edition, Longman, UK, 1973.

[29] HOLMAN J.P. Heat transfer. 9 th Edition, McGraw-Hill, USA, 2008.