

UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

Faculté des Nouvelles Technologies de l'Information et de la communication

Département d'Electronique et des télécommunications



## Mémoire

MASTER PROFESSIONNEL

**Domaine** : Science et Technologie.

**Filière** : Automatique.

**Spécialité** : Instrumentation.

**Présenté par** :

Zahrouna Mohamed Amine

Bouaoune Khmissi

**Thème** :

**Recherche du point maximal de la puissance  
thermique et électrique d'un système PV/T**

**Soutenu publiquement**

**Le : 25/06/2018**

**Devant le jury :**

<u>Nom &amp; Prénom</u>	<u>Grade</u>	<u>fonction</u>	<u>Université</u>
M.RACHEDI Mohamed Yacine	M.A.A	Président	UKM OUARGLA.
M.MELHEGUEG Nacer	M.A.A	Encadreur	UKM OUARGLA.
M.BEN ATMAN Khaled	M.A.A	Examineur	UKM OUARGLA.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2017/2018

# Remerciements

*Tout d'abord, merci Allah Soubhanaho wataalla qui nous a donné la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*Au cours de ce travail, nous avons été encadré par Monsieur MELHEGUEG Nacer, à l'Université Kasdi Merbah Ouargla. Nous tenons à le remercier pour ses nombreux conseils tout au long du développement de notre mémoire, ainsi que pour sa dureté et sa grande disponibilité, malgré ses nombreux engagements.*

*Nous adressons également nos sincères remerciements à Messieurs TAIBI Djamal et M.Zahrouna Djelloul qui mon apporté de précieux conseils et contribue dans la réalisation de notre projet.*

*Nous remercions le président et les membres de la jurée qui ont été honorés d'accepter ce travail : M. RACHEDI Mohamed Yacine, M.BEN ATMAN Khaled.*

*Que toute personne ayant contribué de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail trouve ici le témoignage de notre profonde reconnaissance.*

*Nous remercions tous nos amis (es) qui se tenaient près de nous.*

*Nous aimerions exprimer notre reconnaissance éternelle à nos parents et à notre famille et à leur présence dans les moments difficiles.*

*Merci tout le monde*

# Dédicace

*Au nom du dieu,*

*C'est avec gratitude et développement total que je tiens à dédier ce mémoire. A mon honorable père « Saïd », Ma respectueuse mère qui n'ont jamais cessé de me faire des sacrifices de toutes nature pour me permettre de suivre mes études dans de meilleurs conditions.*

*Merci A mes très chers Sœurs « I », « S », « H » qui se tenait à côté de moi.*

*Pour tous les bons moments passés avec vous*

*« Je vous souhaite une vie joyeuse pleine de succès dans tous les domaines ».*

*A tous mes Amies*

*Pour avoir rempli ces années d'études de souvenirs en tous genres  
Pour avoir toujours été là, dans les bons comme dans les mauvais moments  
« Je n'oublierais jamais les moments que nous avons passés ensemble »  
et Tous mes collègues de l'étude sans exception.*

*A mes Professeurs qui ont déployés tous leurs efforts pour me préparer à affronter la vie professionnelle.*

*A toute ma grande famille « Zahrouna » et « chetti »*

*Mes salutations sincères aux familles Bouaoune et en particulier à Bouaoune Kfmissi qui m'a tenu tête pour présenter ce mémoire*

*Aussi, à tous ceux qui m'ont soutenu par leurs orientations, leurs conseils durant la réalisation de mémoire de fin d'étude, qu'ils trouvent ici l'expression de ma grande reconnaissance et l'assurance de mes profonds respects.*

*Med Amine*

# *Dédicace*

*Au nom du dieu*

*J'ai le grand honneur de dédier ce modeste travail :*

*A l'être le plus cher de ma vie, **ma mère.***

*A celui qui ma fait de moi un homme, **mon père.***

*A mes frères*

*A toute ma grande famille : "**Bouaoun**" et "**Benmaamar**".*

*Mes salutations sincères aux familles **Zahrouna** et on particulier a*

***Zahrouna Med.Amine** qui m'a tenu tête présenter se mémoire*

*A mes **professeurs** qui on déployés tous leurs efforts pour me préparer à  
affronter la vie professionnelle.*

*tous mes amis surtout : promotion de 2eme année master instrument.*

# Table des matières

---

## Table des matières

Remerciements

Dédicace

Table des matières

Table des figures

Liste des symboles

Liste de tableau

Introduction générale 1

CHAPITRE I Etat de l'art sur le PV/T

I.1 Introduction 3

I.2 Énergie solaire photovoltaïque et thermique 3

A. Énergie solaire thermique 3

B. Énergie solaire photovoltaïque 3

I.3 Avantages et inconvénients des panneaux solaires 4

A. Avantages et inconvénients des panneaux solaires thermiques 4

B. Avantages et inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques 4

I.4 Etat de l'art sur le PV/T 5

I.5 capteurs solaires PV/T à air 6

I.6 capteurs solaires hybrides PV/T à eau 10

I.7 Conclusion 12

CHAPITRE II Modélisation du PV/T

II.1 Introduction 14

II.2 Modes de transfert de chaleur 14

II.2.1 Transfert de chaleur par conduction dans les solides 14

II.2.2 Transfert de chaleur par convection 15

II.2.3 Transfert de chaleur par rayonnement 15

II.3 Concept de capteur hybride photovoltaïque/Thermique 15

II.4 Modélisation énergétiques du capteur PV/T 16

# Table des matières

---

CHAPITRE III Simulation et résultats	
III.1 Introduction	21
III.2 Méthode utilisées	21
III.2.1 Méthode de Range-Kutta	21
III.2.2 Traitement informatique	22
III.2.3 Organigramme	23
III.3 Caractéristiques du capteur PV/T	23
III.4 Variation du rayonnement solaire	24
III.5 Variation des puissances P et Q en fonction du débit massique	24
III.6 Variation des puissances P et Q en fonction du rayonnement solaire avec( $T_a=15^{\circ}\text{C}$ )	25
III.7 Variation des puissances P et Q en fonction en fonction de la température ambiante	26
III.8 Interprétation des résultats	26
III.9 Conclusion	27
Conclusion générale	28
Bibliographie	
Résumé	

# Liste des figures

---

## Liste des figures

Figure I.1 : Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV	7
Figure I.2 : Schéma du capteur solaire hybride PV/T à air	7
Figure I.3 : Les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PV/T à air	8
Figure I.4 : Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air	9
Figure I-5 : Modifications du capteur solaire PV/T hybride à air	10
Figure I-6 : Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposées	10
Figure I-7 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor	11
Figure I-8 : Capteur solaire PV/T hybride à eau	12
Figure I.9 : Section du capteur solaire hybride à eau étudié	12
Figure II.1 : Conception du capteur PV/T hybride	16
Figure II.2 : Schéma synoptique d'un système à base du capteur PV/T hybride	16
Figure II.3 : Représentation d'état capteur PV/T hybride	17
Figure III.1 : Variation temporelle du rayonnement	23
Figure III.2 : Variation des puissances thermique et Electrique en fonction du débit massique	24
Figure III.3 : Variation de la puissance du PV/T en fonction du débit massique ( $T_a=15\text{ }^\circ\text{C}$ )	
Et différentes valeurs du rayonnement	25
Figure III.4 : Variation de la puissance du PV/T en fonction du débit massique ( $g_h=1000\text{ W/m}^2$ ) Et différentes valeurs de la Température ambiante	25

## Liste des symboles

---

### Liste des symboles

A	région, m <sup>2</sup> .
A <sub>e</sub>	zone de bordure, m <sup>2</sup> .
c	capacité thermique spécifique, J/ (kg K).
d	diamètre interne du tube, m.
g	constante gravitationnelle, 9.81 m/s <sup>2</sup> .
g <sub>h</sub>	radiation solaire, W/m <sup>2</sup> .
h	coefficient de transfert de chaleur par conduction, W/m <sup>2</sup> K.
h <sub>i</sub>	coefficient de transfert de chaleur par convection, W/m <sup>2</sup> K.
h <sub>r</sub>	coefficient de transfert de chaleur par rayonnement, W/m <sup>2</sup> .
k	conductivité thermique d'isolation, W/m K.
k <sub>l</sub>	conductivité thermique de la plaque, W/m K.
I <sub>sc,sTc</sub>	courant dans des conditions standard, A.
α <sub>sTc</sub>	coefficient de température de court-circuit, mA/ °C.
m	masse, kg.
m <sub>g</sub>	masse du vitrage avant, kg.
ṁ	débit massique, kg/s.
N <sub>u</sub>	numéro de Nusselt, -.
P	puissance électrique, W.
Q	energie thermique, W.
T	température, K.
t	temps, s.
y	distance de voyage, m.
w	vitesse du vent, m/s.

## Liste des symboles

---

### Greeks

$\alpha$	absorptivité, -
$\beta$	angle d'orientation verticale, °
$\beta$	coefficient de température PVG, °C <sup>-1</sup> .
$\varepsilon$	émissivité, - .
$\eta$	efficacité, - .
$\nu$	viscosité cinématique, m <sup>2</sup> /s.
$\lambda$	diffusivité thermique, m <sup>2</sup> /s.
$\sigma$	constante de Stefan, W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> .
T	transmissivité, -

### Superscripts

+	critique
[]'	transposer

### Subscripts

<i>a</i>	air ambiant
<i>c</i>	cellule solaire
<i>f</i>	fluide
<i>g</i>	couvercle en verre
<i>p</i>	plaque absorbante

## Liste tableau

Tableau III.1 : Caractéristique du PV/T

# Introduction générale

Dernièrement un grand développement à petite échelle d'énergies renouvelables telles que les systèmes solaires thermiques ou photovoltaïques, éoliennes, piles à combustibles ...etc a été enregistré. Cela a conduit à une combinaison des systèmes des différentes sources d'énergies ces systèmes sont appelées aussi les systèmes hybrides et ils sont utilisés pour fournir plusieurs besoins énergétiques. Parmi ces différents types de systèmes hybrides en va étudier dans ce travail le système hybride photovoltaïque thermique appelé communément PVT.

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 photovoltaïques 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.

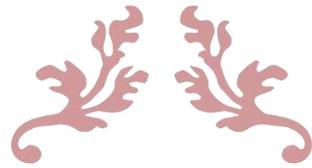
Le rendement électrique du capteur hybride PVT pourrait même s'améliorer avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire si un système est placé pour extraire de la chaleur des cellules solaires, ce qui va le refroidir en même temps.

Compte tenue de l'épuisement des énergies usuelles conventionnelles et leur impact négatif sur l'homme et la nature il devient impératif d'utiliser des énergies propres non polluantes et gratuites comme l'énergie solaire ; on peut utiliser cette énergie pour obtenir de l'eau chaude sanitaire d'une maison solaire. L'objectif de ce projet est d'étudier l'un des ces énergies qui le capteur photovoltaïque thermique PV/T.

Dans le cadre de ce travail, nous allons nous intéresser à la recherche de la puissance électrique et thermique d'un capteur photovoltaïque thermique PV/T. A cet effet, un système d'équation régissant le comportement thermique du capteur et les différents coefficients d'échange thermique est établi. Une simulation mathématique sous MATLAB nous a permis d'obtenir des résultats représentés graphiquement, suivi par une analyse et une discussion.

Le présent travail comporte trois chapitres

- Le premier chapitre est consacré à l'étude théorique du capteur PV/T,
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation du capteur PV/T à eau
- Les principaux résultats obtenus par simulation et leurs interprétations font l'objet du troisième chapitre.



---

# **CHAPITRE I**

## **ETAT DE L'ART SUR LE PV/T**

---



## **I.1. Introduction**

Le capteur hybride photovoltaïque thermique (PV/T) est un module qui produit non seulement de l'électricité mais également de l'énergie thermique. Puisque la demande de la chaleur solaire et l'électricité solaire se complètent souvent, cela semble une idée logique de développer un dispositif qui peut être conforme aux deux demandes. 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 dépend de l'entrée (c'est-à-dire l'énergie du rayonnement solaire, la température ambiante et de 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. Il existe principalement deux types de capteurs hybrides PV/T. Le type liquide et le type air, la différence entre les deux étant le caloporteur qui peut être du liquide ou de l'air. Au cours des années précédentes, une grande quantité de travaux de recherches sur les capteurs PV/T ont été menés. Provenant de plusieurs développements indépendants qui ont tous eu comme conséquence l'idée d'intégrer le photovoltaïque et le flux de chaleur produit dans un seul capteur. Les principaux travaux de recherches et développements visaient les systèmes connectés au réseau et les systèmes autonomes, ainsi que les concentrateurs.

## **I.2.Énergie solaire photovoltaïque et thermique**

### **A. Énergie solaire thermique**

Pour utiliser l'énergie solaire thermique, on doit installer des panneaux solaires sur le toit des habitations. Ces panneaux pourront ainsi réfracter la chaleur des rayons du soleil afin de permettre le réchauffement du fluide porteur de l'information. L'information sera ensuite transmise à un ballon tampon qui permettra l'échange avec les dispositifs de chauffage ou de l'eau chaude sanitaire.

### **B. Énergie solaire photovoltaïque**

L'énergie solaire photovoltaïque a le même principe de fonctionnement que l'énergie solaire thermique, excepter qu'une fois que les rayons du soleil sont capter par les capteurs solaire, l'énergie est dirigée vers un compteur de production par des tubes sous vides en cuivres. L'énergie est ensuite envoyée vers les villes. L'utilisation de cette énergie permet de faire d'importantes économies et ainsi d'alimenter les habitations en électricité. [1]

**I.3. Avantages et inconvénients des panneaux solaires**

Les panneaux solaires ont aussi bien des avantages que des inconvénients. Ces avantages et inconvénients varient en fonction de leur type, thermique ou photovoltaïque.

**A. Avantages et inconvénients des panneaux solaires thermiques****✓ Avantages**

- La lumière du soleil étant disponible partout, elle est exploitable quelle que soit la région ;
- L'énergie solaire recueillie par les capteurs solaires thermiques est une énergie propre et renouvelable. Installer cet équipement c'est participer à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. En effet, si un foyer de 4 personnes utilise des capteurs solaires thermiques couplés d'un chauffe-eau solaire, cela évite l'émission d'une tonne de CO<sub>2</sub> par an dans l'atmosphère ;
- L'énergie solaire thermique permet d'assurer une partie des besoins en eau chaude sanitaire et en chauffage ;
- L'installation des panneaux solaires thermiques permet de réaliser des économies conséquentes sur la durée ;
- Les capteurs solaires thermiques s'adaptent à tous les types de toitures et s'intègrent parfaitement sur des tuiles ou des ardoises en préservant l'esthétique ;
- Les frais de maintenance et de fonctionnement d'une installation thermique sont relativement faibles.

**✓ Inconvénients**

- Les capteurs solaires contiennent des déchets toxiques : cuivre et chrome ;
- Il faut pouvoir stocker la chaleur dans des ballons ou des dalles chauffantes ;
- La production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil ;
- Le coût d'investissement d'une installation solaire thermique est relativement élevé ;
- L'énergie solaire est une énergie intermittente. Il faut donc un système de chauffage d'appoint.

**B. Avantages et inconvénients des panneaux solaires photovoltaïques****✓ Avantages**

- C'est une énergie inépuisable car issue des rayons du soleil et, de ce fait, elle respecte la nature et l'environnement ;
- C'est une énergie très fiable car il n'y a pas de risque de rupture ;

- Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes ;
- L'intégration des panneaux photovoltaïques est simple et l'installation est facile d'emploi.
- L'énergie photovoltaïque peut être installée partout, même en ville ;
- Le coût de fonctionnement est faible et l'entretien est réduit ;
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voire de générer des revenus. Le contrat d'achat est conclu en général pour une durée de 20 ans.

✓ **Inconvénients**

- Ils contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante ;
- Le coût d'investissement est pour l'instant très élevé ;
- Le rendement électrique diminue avec le temps (20% de moins au bout de 20 ans) ;
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, le coût du système photovoltaïque augmente ;
- Comme dans le cas d'un capteur solaire thermique, la production d'énergie solaire n'est possible que lorsqu'il y a du soleil. [2]

#### **I.4. Etat de l'art sur le PV/T**

Nous présenterons comme une synthèse sur les différentes conceptions et les résultats bibliographiques sur les capteurs solaires hybrides (PV/T). De ce fait, notons que la recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80.

En 2005, Zondag propose un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult. 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. Ainsi, il cite le travail de Wolf, qui en 1976, 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. [3]

Par la suite, l'étude réalisée par Kern et Russel en 1978 donne les principes de base des capteurs solaires employant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. En 1981, Raghuraman présente des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans PV/T à eau ou à air. [4]

Hendrie, en 1982 développe un modèle théorique de système PV/T hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards. [5]

Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PV/T hybrides à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et al proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV. [6]

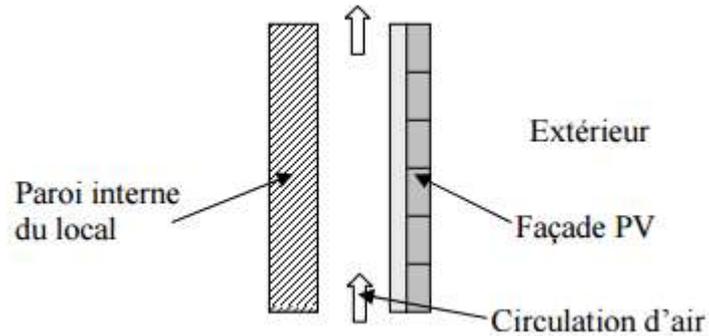
Diverses études expérimentales et théoriques ont été réalisées ensuite, en vue du développement des systèmes PV/T hybrides. La plupart des recherches menées dans ce domaine ont pour objectif d'évaluer les performances thermiques et électriques ou d'analyser l'aspect économique des systèmes hybrides à travers l'estimation du taux de couverture solaire assuré. Pour cela, quelques auteurs mettant 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 [7].

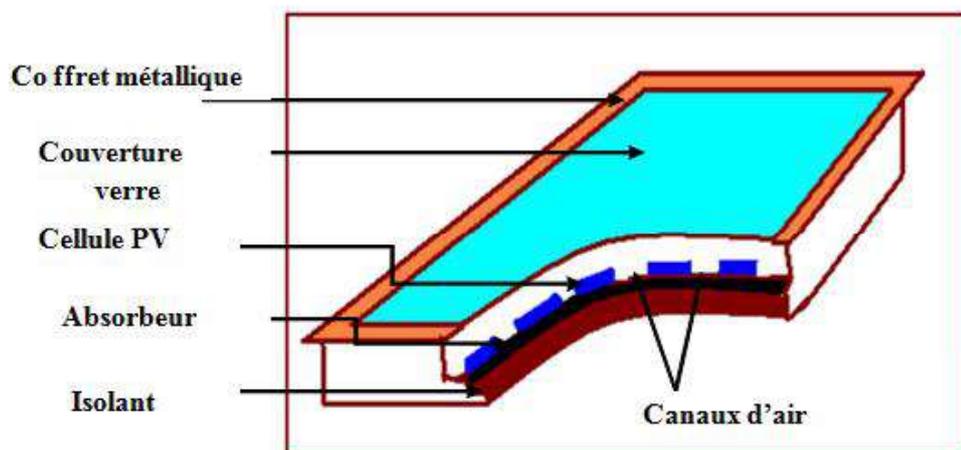
### **I.5. Capteurs solaires PV/T à air**

Un capteur hybride PV/T est un système combiné, associant le solaire photovoltaïque et le solaire thermique dans un seul cadre. Il permet de réaliser une production simultanée d'électricité et de chaleur ; une cogénération d'énergie qui permet d'améliorer le rendement global du système. Une étude spécifique a été consacrée à un tel système pour en réaliser une modélisation. Dans le cadre de cette étude un programme de simulation a été élaboré et validé à travers des résultats expérimentaux relevés de diverses études. La présente communication est consacrée à l'exposé de l'étude réalisée dans le but d'examiner les performances et les caractéristiques énergétiques électriques et thermiques d'un capteur hybride PV/T.



**Figure I.1:** Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV

Les études paramétriques menées par ces auteurs 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 aérodynamique du système. En 1999, Garg et Adhikari 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 I.2 :** Schéma du capteur solaire hybride PV/T à air

Ce capteur solaire est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur peint en noir et d'un support arrière bien isolé (Figure I.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.

Hegazy compare 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) (Figure I.3).

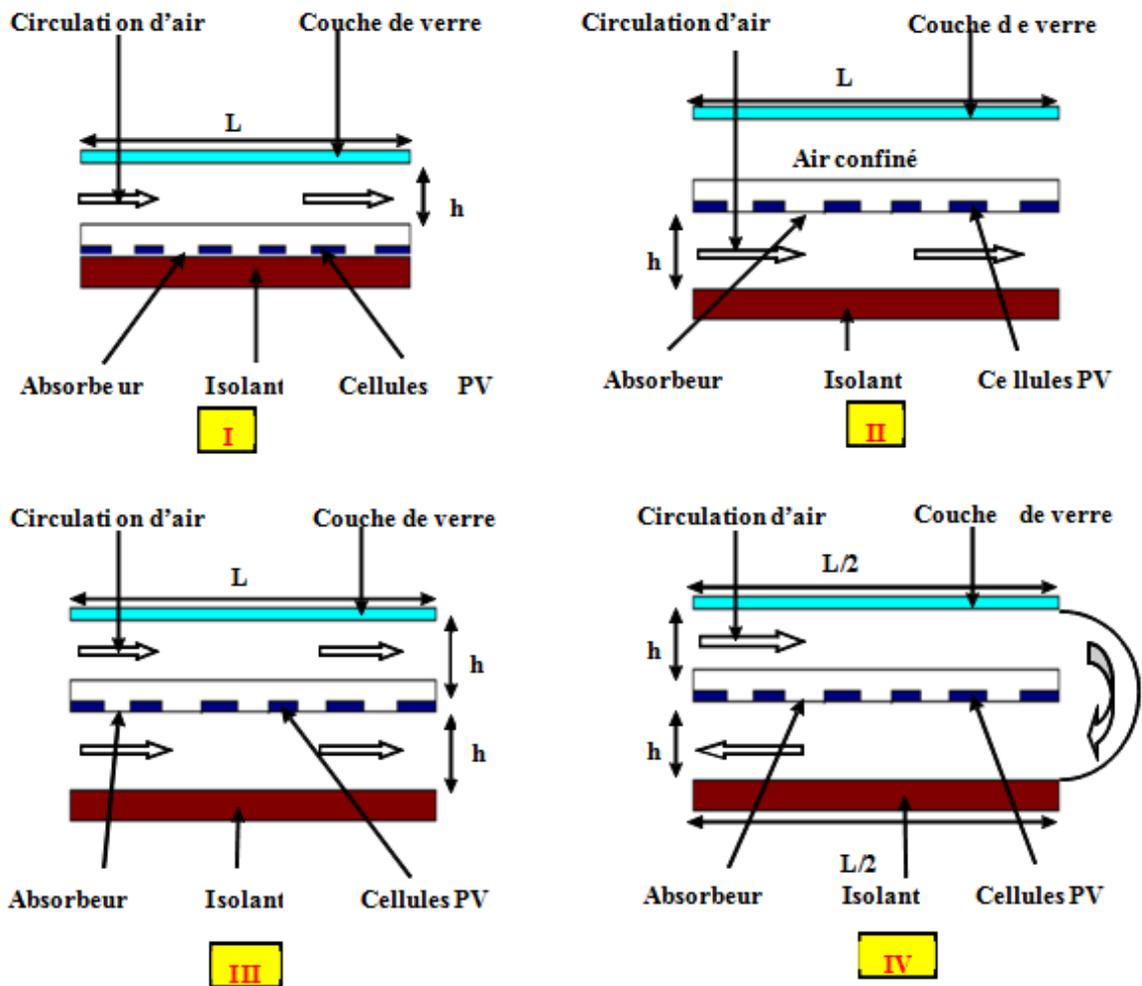


Figure I.3 : Les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PV/T à air

Ce type de capteur relativement simple, est constitué d'une couche absorbante à dos isolé, refroidi par un courant d'air circulant entre l'absorbeur et un couvercle de verre. On peut augmenter sa surface d'échange de chaleur en donnant à l'absorbeur soit un pouvoir émissif élevé, soit surface striée ou rainurée.

En 2006, Tiwari et al 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<sup>2</sup> 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'essai en acier inclinable et monté à New Delhi, en Inde (figure I.4). 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 %. [8]



**Figure I.4:** Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride à air

En 2007, Trip Anagnostopoulos a réalisé 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 la 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 à 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 I.5). [9]

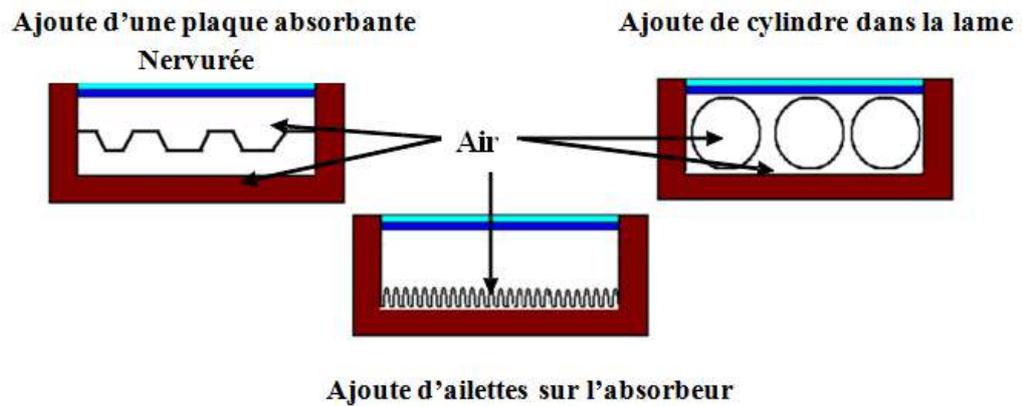


Figure I.5 : Modifications du capteur solaire PV/T hybride à air

### I.6. Capteurs solaires hybrides PV/T à eau

En 2001, Trip Anagnostopoulos a effectué 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 I.6, 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.

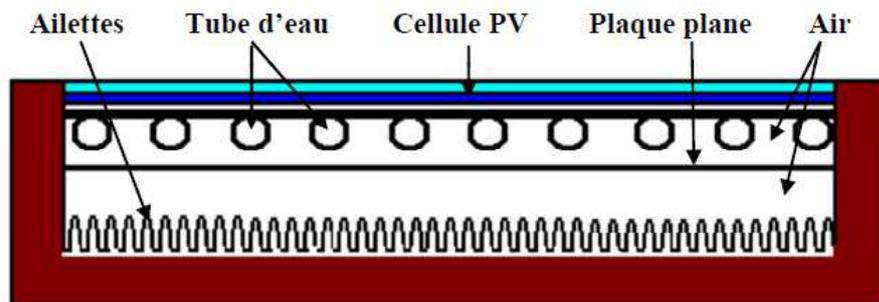
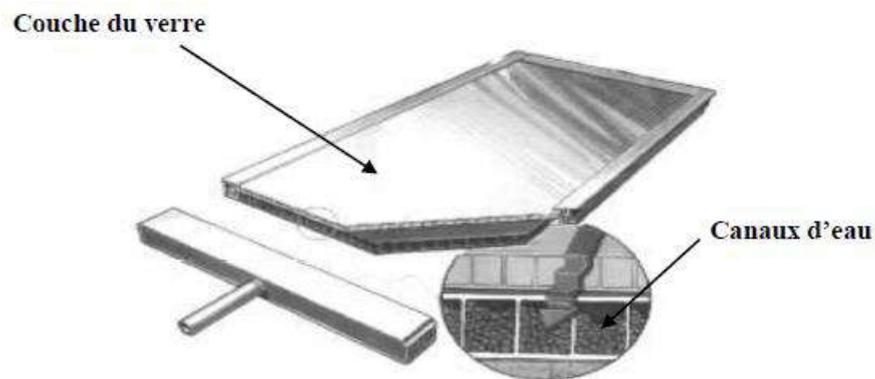


Figure I.6: Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposées

En 2002, un capteur solaire PV/T hybride vitré a été étudié par Sandnes et Rekestad.

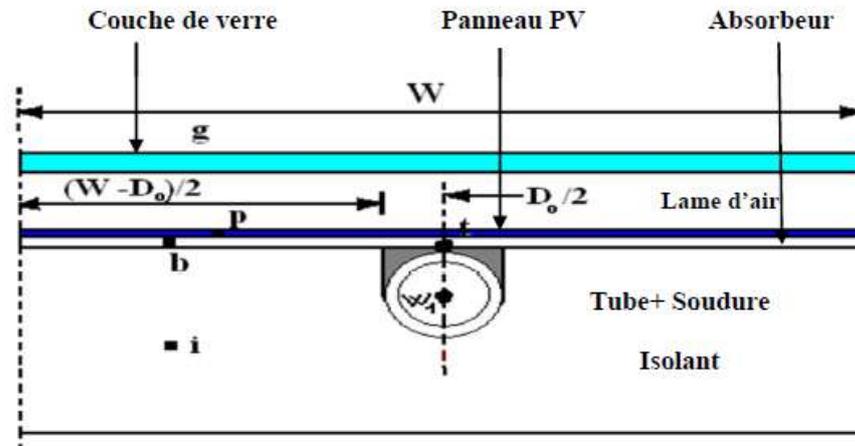
Ce système est composé de cellules PV en silicium monocristallin collées sur un absorbeur en plastique noir polyphénilenoxy de par l'intermédiaire de 0.5 mm d'adhésif à base de silicium. Cet absorbeur est muni de canaux de circulation d'eau en sous-face (figure I.7). L'eau circule par l'intermédiaire de la force de gravité. Le panneau PV de surface 0.32 m<sup>2</sup> est constitué de 6

rangées de 5 cellules PV en série de 1.5 W chacune. L'analyse de ce prototype a consisté en la conception, et la modélisation du composant complétée par 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 de l'écoulement du fluide caloporteur, est du haut vers le bas du capteur solaire. [10]



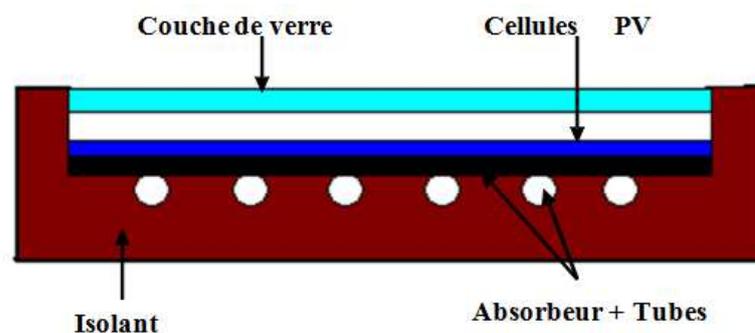
**Figure I.7 :** Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor

En 2003, un capteur solaire PV/T hybride à eau est étudié en régime dynamique par Chow 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 de calculer les performances horaires, les gains thermiques et électriques, les rendements et le 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 (figure I.8). Le panneau PV est fixé à l'absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive composée d'EVA (Ethylène 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. [11]



**Figure I.8 :** Capteur solaire PV/T hybride à eau

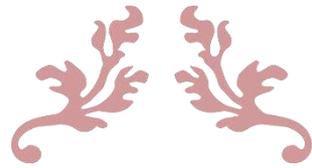
En 2007, Kalogirou et Trip Anagnostopoulos poursuivent une étude précédemment menée sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air en analysant cette fois, le comportement de capteurs solaires PV/T hybrides à eau comportant des panneaux PV à base de cellules en silicium polycristallin ou de cellules amorphes, sur trois sites. Ces composants ont été intégrés à des bâtiments industriels et ont chacun une surface totale de 300 m<sup>2</sup>. Le capteur solaire hybride a été isolé en face arrière par une couche de 5 cm de polyuréthane (figure I.9). 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. [12]



**Figure I.9:** Section du capteur solaire hybride à eau étudié

### I.7. Conclusion

Les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques ont été traités par plusieurs auteurs et dans plusieurs laboratoires de recherche. Ceci témoigne de l'importance et de l'avenir de ces capteurs dans les systèmes énergétiques. Néanmoins plusieurs efforts restent à mener afin d'améliorer les performances thermiques et électriques de ces capteurs.



---

# **CHAPITRE II**

## **MODELISATION DU PV/T**

---



## **II.1. Introduction**

Un capteur hybride PV/T est un système combiné, associant le solaire photovoltaïque et le solaire thermique dans un seul cadre. Il permet de réaliser une production simultanée d'électricité et de chaleur ; une cogénération d'énergie qui permet d'améliorer le rendement global du système. Une étude spécifique a été consacrée à un tel système pour en réaliser une modélisation. Dans le cadre de cette étude un programme de simulation a été élaboré et validé. La présente communication est consacrée à l'exposé de l'étude réalisée dans le but d'examiner les performances et les caractéristiques énergétiques électriques et thermiques d'un capteur hybride PV/T.

## **II.2. Modes de transfert de chaleur**

Le transfert de chaleur trouve son origine dans les écarts de température. Le transfert d'énergie calorifique sera obtenu chaque fois qu'un gradient de température existera au sein d'un système ou lorsque deux systèmes à températures différentes, seront mis en contact par l'intermédiaire d'une surface d'échange. [13]

On distingue trois modes de transmission de la chaleur :

- La conduction
- La convection
- Le rayonnement

### **II.2.1. Transfert de chaleur par conduction dans les solides**

Le processus de transfert de chaleur par conduction s'appuie sur un milieu matériel sans mouvement de matière et est dû à des phénomènes physiques microscopiques (agitation des atomes ou des molécules, flux d'électrons libres...). Il peut être vu comme un transfert d'énergie des particules les plus énergétiques (les particules chaudes qui ont une énergie de vibration élevée) vers les particules les moins énergétiques (les particules froides d'énergie de vibration moins élevée), dû aux collisions entre particules. Dans les solides, le transfert d'énergie peut également se produire sous l'effet du déplacement d'électrons libres dans le réseau cristallin (par exemple pour les métaux). Ainsi les bons conducteurs d'électricité sont en général également de bons conducteurs de la chaleur.

Transport d'énergie dans la matière sans de déplacement de matière Transport par les électrons (conducteur) ou les phonons (isolant)

- Nécessite un milieu solide de transmission
- Transmission faible dans les gaz

### **II.2.2. Transfert de chaleur par convection**

La convection est un mode de transfert de chaleur qui met en jeu, en plus de la conduction, le mouvement macroscopique de la matière. Ce phénomène se produit au sein des milieux fluides en écoulement ou entre une paroi solide et un fluide en mouvement. On distingue deux types de convection :

- Convection naturelle : les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition
  - Convection forcée : le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).
- ✓ On parlera de convection mixte lorsque les deux types de convection coexistent dans un système.

Transport d'énergie dans la matière avec déplacement de matière

Transport par écoulement de fluide (liquides, gaz) / différence de masse volumique

Nécessite un milieu fluide de transmission

### **II.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement**

Tout corps matériel émet et absorbe de l'énergie sous forme de rayonnement électromagnétique. Le transfert de chaleur par rayonnement entre deux corps séparés par du vide ou un milieu semi-transparent se produit par l'intermédiaire d'ondes électromagnétiques, donc sans support matériel. Le phénomène d'émission d'un corps correspond à la conversion d'énergie matérielle (agitation des électrons constituant la matière dont l'intensité dépend de la température) en énergie radiative. Le phénomène d'absorption est la conversion inverse. [14]

Transport d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques :

- ✓ Pas de déplacement de matière
- ✓ Pas de contact entre les objets ou milieux qui échangent l'énergie
- ✓ Pas de milieu de transmission nécessaire (dans le vide, ça marche aussi !)

## **II.3. Concept de capteur hybride photovoltaïque/Thermique**

Le cas d'étude concerne une conception de capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PV/T, type de feuille et tube utilisant comme une plaque absorbante d'Acier galvanisé à une

inclinée et orienté vers le Sud. Ce capteur est formé par un module PV et un système de refroidissement à l'intérieur.

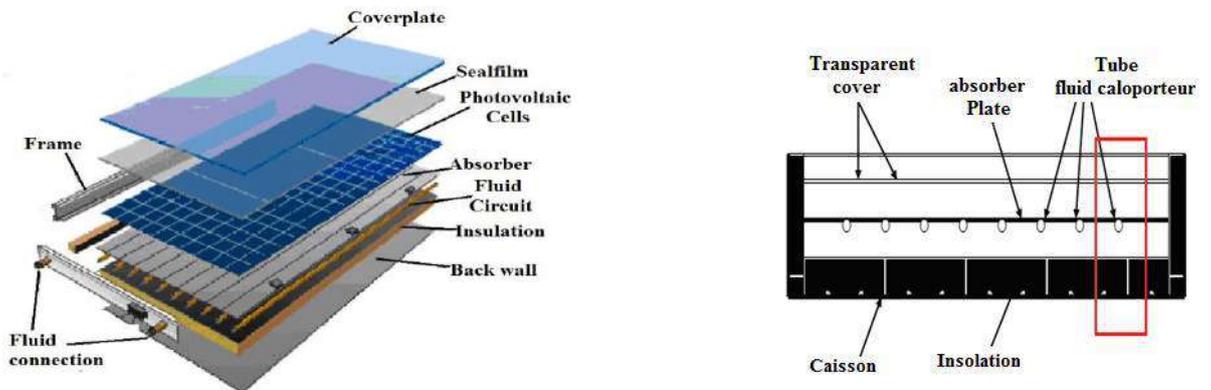


Figure II.1 : Conception du capteur PV/T hybride

La figure II.1 montre également un capteur hybride PV/T à eau de feuille et tube, où une feuille d'absorption est placée à la face arrière des cellules solaires qui sont connectés à des tubes pour refroidir la cellule photovoltaïque PV. Par ailleurs, l'absorbeur est entièrement isolé et l'ensemble du capteur est protégé par un boîtier avec un isolant complet. [15]

#### II.4. Modélisation énergétique du capteur PV/T

La figure ci-dessous représente l'architecture d'un système de pompage et chauffage d'eau à partir d'un capteur PV/T

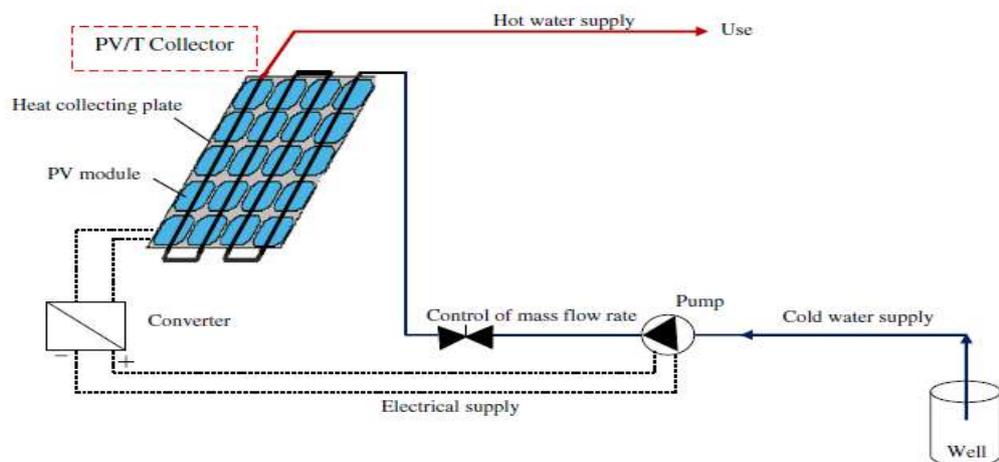


Figure II.2 : Schéma synoptique d'un système à base du capteur PV/T hybride

La production d'énergie électrique et thermique par le système hybride PV/T dépend des plusieurs paramètres d'entrées et de sorties : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur. La représentation d'état du modèle du Capteur PV/T est schématisée par la figureII.3.

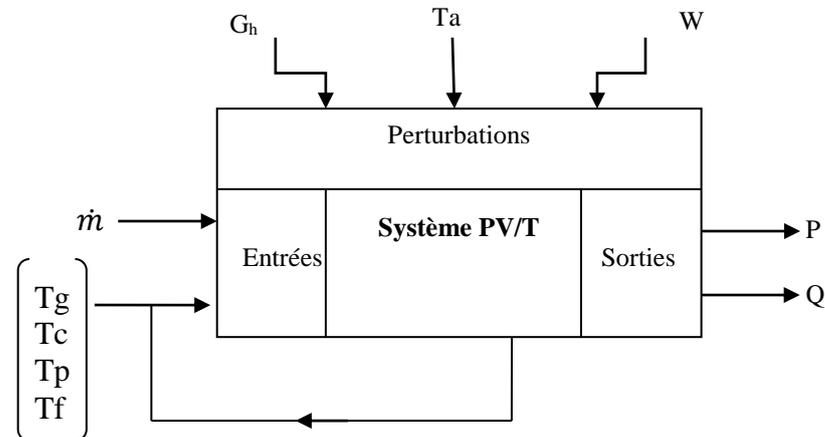


Figure II.3 : Représentation d'état capteur PV/T hybride

$$\begin{pmatrix} \dot{T}_g \\ \dot{T}_c \\ \dot{T}_p \\ \dot{T}_f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_g \\ T_c \\ T_p \\ T_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \end{pmatrix} \dot{m} + \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \\ d_{31} & d_{32} \\ d_{41} & d_{42} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} G_h \\ T_a \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} P \\ Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_g \\ T_c \\ T_p \\ T_f \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e_{11} \\ e_{21} \end{pmatrix} \dot{m}$$

Le vecteur d'entrée  $T=[T_g \ T_c \ T_p \ T_f]'$  ; avec  $T_g, T_c, T_p, T_f$  représentent les températures dans chaque couche du PV/T :Verre, Cellule solaire PV, Plaque absorbante, Fluide (Eau) ; les perturbations du système sont : Rayonnement Solaire  $G_h$ , Température Ambiante  $T_a$ , Vitesse de Vent  $W$  ; le signal de Commande ou Contrôle est  $\dot{m}$  ; le vecteur de sortie est  $S=[P \ Q]'$  ;  $P$  la puissance électrique du PV/T et  $Q$  est la puissance thermique.[16]

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du capteur PV/T, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante :

La variation de l'énergie interne = l'énergie reçue – l'énergie perdue

Ou encore sous forme mathématique, Considérons une section quelconque du système à l'instant  $t$ .

Le bilan au nœud i donne :  $M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i Q_i - \sum_s Q_i \dots\dots\dots(1)$

Mi : Masse du nœud i

Ci: La chaleur spécifique du nœud i

dt: Pas de temps.

➤ **Pour le verre (Glass coversub-model)**

La température au niveau de verre est donnée par l'équation suivante

$$m_g c_g dT_g/dt = \alpha_g g_h A_g + A_g (h_{wind} + h_{rga})(T_a - T_g) + A_g h_{rcg}(T_c - T_g) + A_g h_{c_g}(T_c - T_g) \dots\dots\dots(2)$$

Avec

m<sub>g</sub> : Masse de verre (Kg)

c<sub>g</sub> : Coefficient de la chaleur spécifique du verre (1/Kg.K)

g<sub>h</sub> : Rayonnement Solaire (W/m<sup>2</sup>)

h<sub>wind</sub>: Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m<sup>2</sup>K), il est donné par l'expression suivante :

$$h_{wind} = 2.8 + 3.0W \dots\dots\dots(3)$$

Avec

W : Vitesse de vent (m/s)

h<sub>rga</sub> : Coefficient d'échange par rayonnement entre la face extérieure de verre et l'ambient, il donné par l'équation suivante

$$h_{rga} = \epsilon_g \sigma (T_g^2 + T_a^2) (T_g + T_a) \dots\dots\dots(4)$$

et entre la face extérieure de verre et plaque absorbante est donnée par l'équation

$$h_{rcg} = (\sigma (T_g^2 + T_a^2) (T_g + T_a)) / (1/\epsilon_g + 1/\epsilon_c - 1) \dots\dots\dots(5)$$

Avec

ε<sub>g</sub> : émissivité de verre

ε<sub>c</sub> : émissivité de plaque absorbante

σ : constant of Stefan

➤ **Pour la cellule solaire (Solar cellsub-model)**

$$m_c c_c dT_c/dt = [\alpha_c \tau_g A_c (1 - \eta_r)] g_h - A_g h_{rcg}(T_g - T_c) - A_g h_{c_g}(T_c - T_g) - A_c h_{cp}(T_c - T_p) \dots\dots\dots(6)$$

Avec

m<sub>c</sub> : Masse de la cellule solaire

c<sub>c</sub> : Chaleur spécifique de la cellule

α<sub>c</sub> : Absorptivité de la cellule

τ<sub>g</sub> : Transmittivité du verre.

➤ **Pour la plaque absorbante (Absorber plat sub-model)**

$$m_p c_p dT_p/dt = A_{chcp}(T_c - T_p) - A_{chpa}(T_p - T_a) - A_{fhfa}(T_f - T_a) - \dot{m} c_f \Delta T_f \dots \dots \dots (7)$$

Avec

- $m_p$  : Masse de la plaque
- $c_p$  : Chaleur spécifique de la plaque
- $\dot{m}$  : Débit massique (Kg/s)

➤ **Pour le fluide caloporteur (Output fluid temperature sub-model)**

$$m_f c_f dT_f/dt = A_f h_{pf}(T_p - T_f) - c_f \dot{m} \frac{\Delta T_f}{\Delta y} \dots \dots \dots (8)$$

- $m_f$ : Masse de fluide
- $c_f$ : Chaleur spécifique du fluide

Pour La puissance de sortie électrique P, cette puissance dépend du fonctionnement instantané de la température Tc du module de cellule PV.

$$P = V_{pv} \times I_{pv} \dots \dots \dots (9)$$

$$V_{pv} = N_s \cdot V_T \ln (I_{scSTC} - I_{pv} / I_0) \dots \dots \dots (10)$$

$$I_{pv} = N_p \{ I_{ph} - I_0 [\exp ( V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} / V_T ) - 1] - V_{pv} + R_s \cdot I_{pv} / R_{s0h} \} \dots \dots \dots (11)$$

$$V_T = K_B \cdot T_c \cdot n / q \dots \dots \dots (12)$$

$$I_{ph} = [I_{scSTC} + \alpha_{STC} (T_c - T_{a,ref})] \dots \dots \dots (13)$$

$$K_B = 1.3806 \times 10^{-23} \text{ [J/K] ;}$$

$$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ [C] ;}$$

$$n = 1.62$$

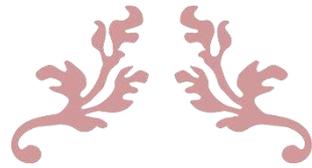
$I_0$  est le courant inverse de la saturation de la diode.

Concernant la puissance de sortie thermique Q du système PV/T est donnée par l'équation suivante

$$Q = \dot{m} c_f (T_f - T_{fi}) \dots \dots \dots (14)$$

Avec

- $T_f$ : Température de sortie du fluide à l'instant t
- $T_{fi}$ : Température d'entrée du fluide à l'instant t

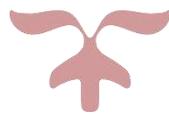


---

# **CHAPITRE III**

## **SIMULATION ET RESULTATS**

---



**III.1. Introduction**

Le but de ce chapitre est de suivre la puissance électrique (P) et thermique(Q) d'un capteur PV/T. Ces puissances sont influencées par les conditions de fonctionnement qui sont le rayonnement solaire, la température ambiante et le débit massique. En premier lieu, nous proposons une méthode qui permette de résoudre le système d'équations décrit au chapitre précédent qui représente le modèle du capteur étudié ensuite nous donnons une interprétation sur les résultats obtenus.

**III.2. Méthode utilisées**

La méthode proposée pour résoudre le système d'équations non linéaires est Runge Kutta d'ordre 4 ; le but de cette méthode est de donner les valeurs des différentes températures du capteur (Température du verre  $T_g$ , de la cellule  $T_c$ , de l'absorbeur  $T_p$ , du fluide  $T_f$ ), en fonction du temps et suivant une température ambiante  $T_a$  supposée constante le long de la journée ainsi que le rayonnement solaire  $g_h$  ; Puis on calcule P et Q, le point suivant explique la méthode utilisée.

**III.2.1. Méthode de Runge-Kutta**

La méthode de Runge-Kutta est une méthode d'analyse numérique d'approximation de solution d'équation différentielle cette méthode repose sur le principe de l'itération c'est-à-dire qu'une première estimation de la solution est utilisée pour calculer une seconde estimation, plus précise, et ainsi de suite.

Considérons le problème suivant :

$$T' = f(t, T), \quad T(t_0) = T_0$$

La méthode RK4 est donnée par l'équation :

$$T_{n+1} = T_n + 1/6 (k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \dots\dots\dots (15)$$

$$k_1 = f(t_n, T_n), \dots\dots\dots (16)$$

$$k_2 = f(t_n + h/2, T_n + h/2 k_1) \dots\dots\dots (17)$$

$$k_3 = f(t_n + h/2, T_n + h/2 k_2) \dots\dots\dots (18)$$

$$k_4 = f(t_n + h, T_n + hk_3) \dots\dots\dots (19)$$

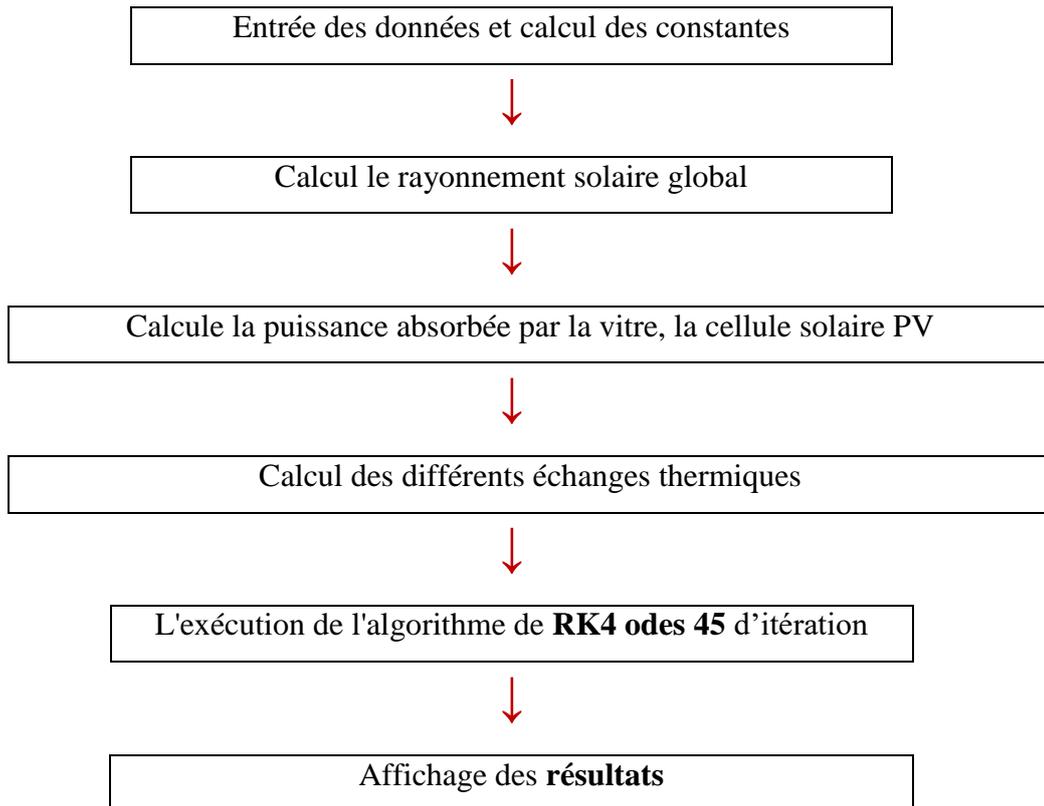
L'idée est que la valeur suivante ( $T_{n+1}$ ) est approchée par la somme de la valeur actuelle ( $T_n$ ) et du produit de la taille de l'intervalle ( $h$ ) par la pente estimée. Nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'instant initial, et avec l'algorithme de calcul (**organigramme**), Nous obtenons un système d'équations, dont la résolution permet de calculer nos inconnues, peut on détermine les puissances électrique et thermique.

### III.2.2. Traitement informatique :

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes :

- Entrée des données et calcul des constantes.
- La température ambiante.
- Calcul le rayonnement solaire global.
- Calcul des différents échanges thermiques qui sont indépendants de la température à savoir :
  - 1) Les coefficients d'échange thermique par conduction à travers les composants du module PV, l'absorbeur, et l'isolant.
  - 2) Les coefficients d'échange thermique dû au vent.
- Nous supposons au départ que chaque composant du capteur est à la température ambiant  $T_a$ .
- Calcul de coefficient d'échange thermique par rayonnement entre :
  - La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.
- Calcul les coefficients d'échange thermique par convection entre :
  - a. La vitre (côté extérieur) et l'ambiance.
  - b. Le tube et le fluide caloporteur.
- Calcul des coefficients d'échange thermique par conduction entre les différentes couches du PVT.
- L'exécution de l'algorithme de **RK4** d'itération
- Calcul la puissance électrique et thermique

III.2.3. Organigramme :



III.3. Caractéristiques du capteur PV/T

Le tableau suivant résume les différents paramètres utilisés dans la simulation de ce capteur étudié.

Design parameters of photovoltaic thermal (PV/T) collector.	
Front glazing (low-iron glass)	Number of modules in parallel: 33
Area of glass: 1.64 m <sup>2</sup>	Number cell: 1
Mass of glass: 7.2 kg	
Specific heat capacity of glass: 810 J/kg K	Thermal absorber (aluminum alloy)
Emissivity of glass: 0.88	Area of plate absorber: 2 m <sup>2</sup>
Transmissivity of glass: 0.95	Mass of plate absorber: 9.03 kg
	Specific heat capacity of absorber: 900 J/kg K
Solar cell (polycrystalline silicon)	Thermal conductivity: 385 W/m K
Area of module: 0.87 m <sup>2</sup>	
Mass of module 5.4 kg	Water in channel
Specific heat capacity of cell: 903 J/kg K	Area of channel fluid flow: 0.165 m <sup>2</sup>
Emissivity of cell 0.35	Mass of water: 45 kg
PVG reference efficiency: 0.178	Tube spacing: 0.15 m
Kinematic viscosity: 1.88 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	Specific heat capacity of fluid: 4190 J/kg K
PVG reference temperature: 25 °C	
Vertical orientation angle: 45°	Heat transfer coefficient
thermal diffusivity 2.69 × 10 <sup>-5</sup> m <sup>2</sup> /s	$h_{pf}$ : 100 W/m <sup>2</sup>
Connection resistance of panel: 0.8 Ω	$h_{cp}$ : 5.7 W/m <sup>2</sup>
Current in standard conditions: 3.35 A	$h_{rp}$ : 1000 W/m <sup>2</sup>
Temperature coefficient of short-circuit: 1.4 mA/°C	$h_i$ : 300 W/m <sup>2</sup> K

Tableau III.1 : Caractéristique du PV/T

**III.4. Variation le rayonnement solaire**

Le rayonnement solaire, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système, il est donné pour la ville de Ouargla situé au sud algérien, ces données météorologiques sont : -Altitude : 141m, -Sa situation géographique : (Latitude : 31Nord, Longitude : 5°24'Est), -Albédo : 0.35

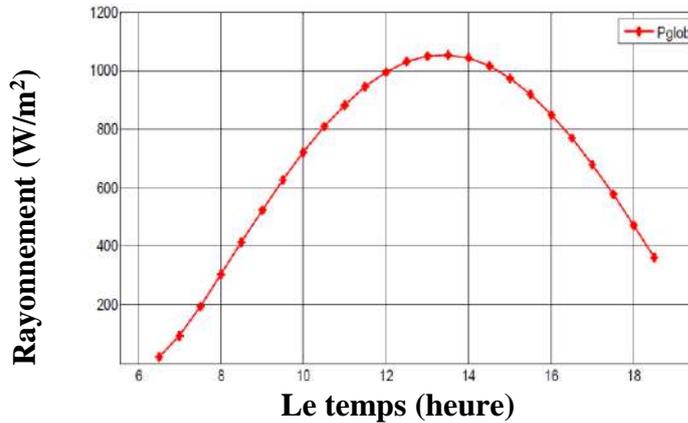


Figure III.1 : Variation temporelle du rayonnement

**III.5. Variation des puissances P et Q en fonction du débit massique**

Cette courbe représente la variation des deux puissances (P et Q) en fonction de débit massique de l'eau, on remarque que la puissance thermique Q décroît lorsque le débit augmente et la puissance électrique en croissance, l'intersection entre eux représente le point optimum de la puissance OPOP (Optimal Power Operating Point).

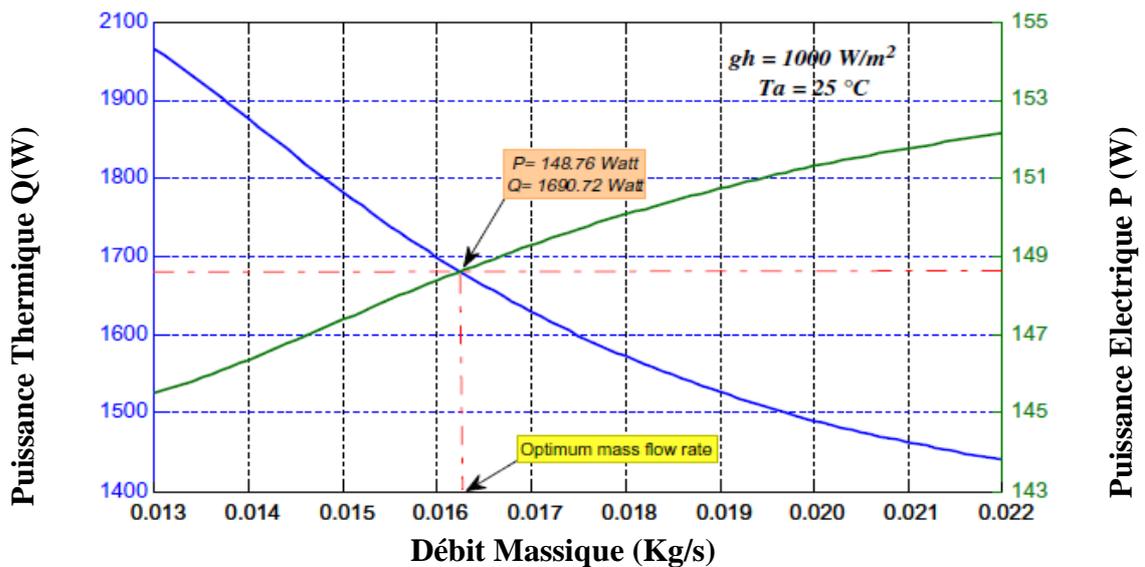


Figure III.2 : Variation des puissances thermique et Electrique en fonction du débit massique

### III.6. Variation des puissances P et Q en fonction du rayonnement solaire avec ( $T_a=15^\circ\text{C}$ )

L'influence du rayonnement solaire sur le point optimum est représentée sur la figure ci-dessous ; dans ce cas la température ambiante est fixe et constante à  $T_a=15^\circ\text{C}$  ; On voit dans ce graphique que le produit PQ qui est le point OPOP augmente lorsque le rayonnement  $gh$  en croissance et vice-versa, donc OPOP est inversement proportionnel aux  $gh$ . L'observation la plus importante se fait que le débit massique augmente aussi, donc le système nécessite une régulation.

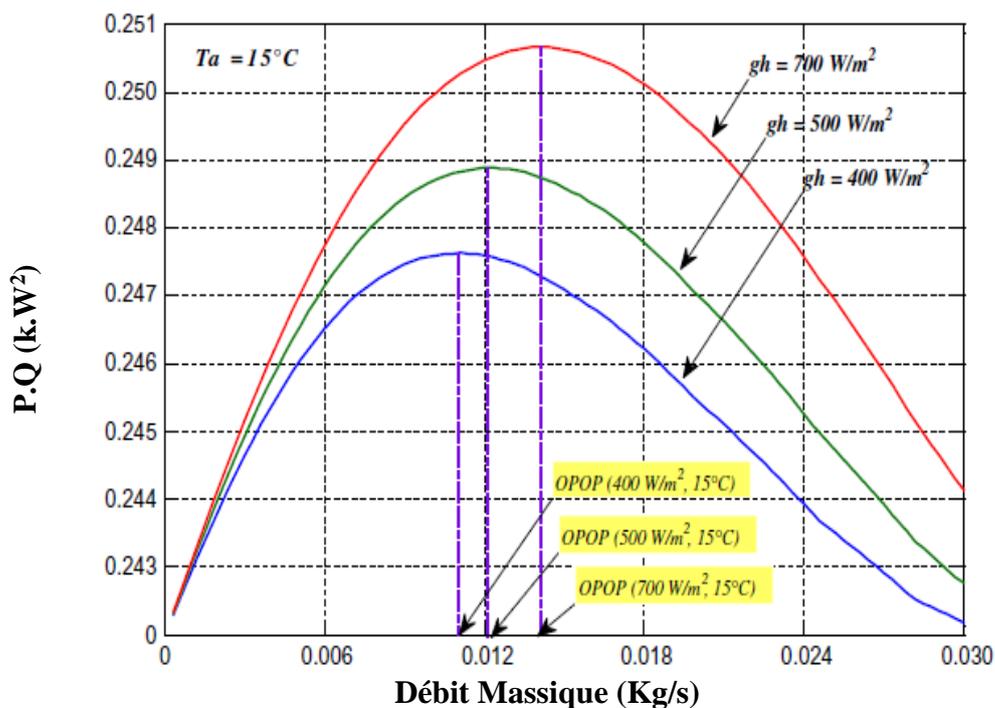


Figure III.3 : Variation de la puissance du PV/T en fonction du débit massique ( $T_a=15^\circ\text{C}$ )  
Et différentes valeurs du rayonnement

### III.7. Variation des puissances P et Q en fonction de la température ambiante

La figure ci-dessous donne une idée sur l'influence de la variation de la température ambiante sur le point de fonctionnement maximale de la puissance en fixant le rayonnement solaire à  $gh=1000\text{W/m}^2$ . les trois grandeurs ( $T_a$ , OPOP, (débit massique)) en accroissement.

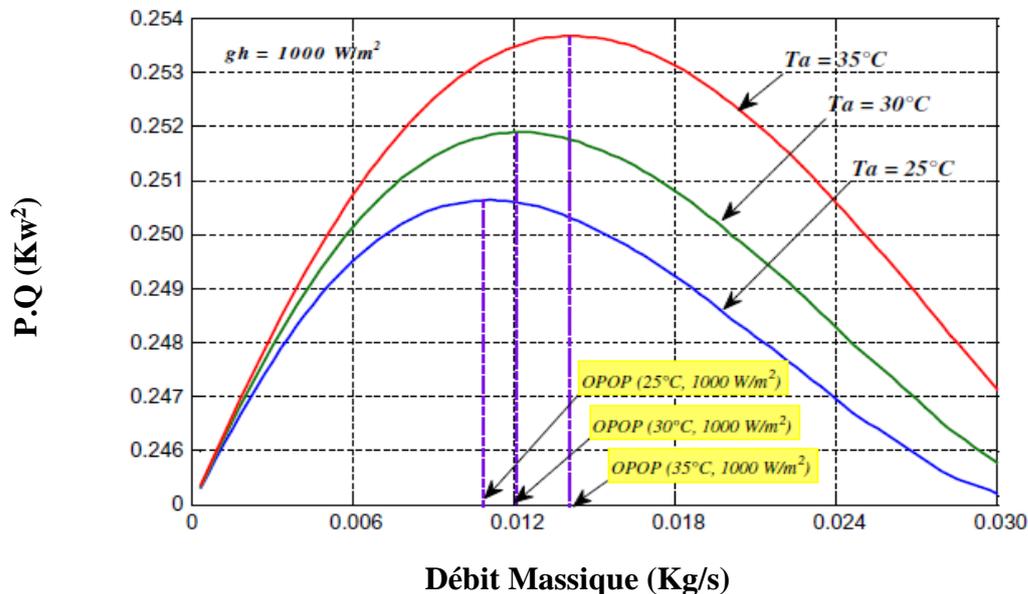


Figure III.4 : Variation de la puissance du PV/T en fonction du débit massique ( $gh=1000 \text{ W/m}^2$ ) Et différentes valeurs de la Température ambiante

### III.8. Interprétation des résultats

-Lorsqu'on augmente le débit massique, la température de la cellule  $T_c$  diminue (équations (2) et (3) dans le chapitre II), ce qui augmente la puissance électrique (Eqs (12) - (16) dans le chapitre II), et diminue la puissance thermique de sortie (Eq (17)). Cette phénomène nécessite de chercher ou suivre un point de fonctionnement optimale de puissance c.-à-d. un débit massique optimal qui permet à la fois d'optimiser les deux puissances P et Q.

-La détermination de ce point a besoin d'une loi de commande basée sur le modèle du PV/T en considérant les paramètres climatiques ( $gh$ ,  $T_a$ ) comme des variables ou perturbations stochastiques.

-Néanmoins le modèle qui représente le PV/T est un système non linéaire composé de deux sous-systèmes ; l'un fournit une sortie directe (rapide) qui est la puissance électrique P et l'autre délivre une sortie avec un délai (retard ou temporisation). Cela rend la difficulté de trouver ou d'utiliser une méthode de contrôle ou de régulation conventionnelles pour le suivi de l'OPOP.

-Pour cela l'OPOP peut être déterminé par une approche graphique. Cette approche consiste à spécifier le point commun ou l'intersection entre courbes des puissances P et Q en fonction du débit massique.

-Les équations différentielles représentant le capteur PV/T sont converties en mode numérique par la méthode Runge Kutta d'ordre 4 pour déterminer les températures pour chaque couche ou nœud du PV/T ; puis a tracé les courbes des puissances en fonction du débit massique (Voir Figure III.2).

### **III.9. Conclusion**

Dans ce chapitre, on présente un algorithme classique pour déterminer le point de fonctionnement de puissance optimale l'OPOP d'un PV/T en fonction des variations des grandeurs éclairement et la température ambiante, ainsi on constate que ce capteur caractérisé par un système multivariable non linéaire qui nécessite d'autres méthode intelligentes pour calculer OPOP.

# Conclusion générale

Dans le cadre de ce travail, nous avons entrepris une étude théorique et numérique d'un capteur photovoltaïque thermique PV/T et la détermination et le suivi de leurs puissances électriques et thermiques.

Après une présentation succincte de l'état de l'art des capteurs PV/T. Notre intérêt a porté par la suite sur les différents coefficients d'échanges thermiques par rayonnement entre la vitre et l'absorbeur d'une part, et entre la vitre et l'air ambiant d'autre part qui mis en jeu à l'intérieur d'un capteur afin d'établir les équations gouvernants le comportement thermique et électrique de ce dispositif. La résolution du système d'équations discrétisées par la méthode numérique de Runge-Kutta d'ordre 4. La modélisation mathématique, basée sur la méthode des bilans globaux des énergies, prend en compte les conditions initiales associées au capteur. Les résultats de simulation numérique permettent de découvrir les profils de température de l'absorbeur, le vitrage (verre) et le fluide caloporteur. Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres internes (propriétés thermo-physiques des différents composants du capteur) et externes (rayonnement, vitesse de vent, Température ambiante etc..).A la fin de ce mémoire nous traitons un algorithme permet de suivi (to track) le point de fonctionnement optimale de puissance électrique et thermique de ce PV/T.

Nous avons trouvé ce projet très intéressant. C'est pourquoi nous pensons qu'il doit se poursuivre et nous suggérons les améliorations suivantes :

-Utiliser les algorithmes intelligents comme les réseaux de neurones

Enfin, nous espérons aussi que notre travail est un pas de recherche pour les promotions suivantes.

# Bibliographie

---

## Bibliographie

- [1] **KHELIFA Abdelkrim** « Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT », DOCTEUR EN PHYSIQUE DE L'UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA-1- 22/01/2017.
- [2] <https://www.calculeo.fr/Eco-travaux/Panneaux-solaires-photovoltaiques/Les-capteurs-solaires> .
- [3] **ZONDAG H.A.** «Flat-plate PV-Thermal collectors and systems ». a review renewable and sustainable Energy reviews, 2005
- [4] **E.C. KERN, M.C.RUSSEL.** «Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems ». **IN:** Proceeding of 13 th IEEE photovoltaic Specialist, 1978, Washington DC, Etat-Unis, pp.1153-1157.
- [5] **S.D.HENDRIE.** « Photovoltaic/ thermal collector development program ». Rapport final. Etats-Unis: Massachusetts institute of technology, 1982.
- [6] **B.LALOVIC, Z.KISS, H.WEAKLIEM.** « A hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. ». Solar Cells, 1986,vol. 19 n° 2 pp 131-138.
- [7] **A. Khelifa 1\*, H. Ben Moussa 2, K. Touafek 3, M. Adouane 1 et I. Tabet 1,** « Etude du chauffage de l'eau par le capteur solaire hybride », Université Hadj Lakhdar, Avenue Chahid Boukhrouf, 05000 Batna, Algeria.
- [8] **A. Tiwari, M. S. Sodha,** A. Chandra et al, « Performance evaluation of photovoltaic thermal solar air collector for composite climate of India », Journal of Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, (2006).
- [9] **Y. Tripanagnostopoulos,** «Aspects and improvements of hybrid photovoltaic thermal solar energy systems», Journal of Solar Energy, Vol. 81, (2007).
- [10] **M. Sandberg, B. Moshfegh,** «Buoyancy induced air flow in photovoltaic facades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules», Journal of Building and environment, Vol. 37, (2002).
- [11] **L.MEI. D.INFIELD U.EICKER** « Thermal modeling of a building with an integrated ventilated PV façade ». Energy and buildings, 2003, Vol 35 n° 3 pp 605-617.
- [12] **Slah Ben MABROUK,** Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique Université Tunis El Manar, 08 December 2014.
- [13] **T.STAMBOUL(Coordonnateur et chargé des TP),** « TRANSFERTS THERMIQUES » UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE HOUARI BOUMEDIENE, ANNEE UNIVERSITAIRE 2009-2010.

## Bibliographie

---

[14] **Sophie Mergui**, « TRANSFERTS THERMIQUES », SORBONNE UNIVERSITES.

[15] **KHELIFA Abdelkrim** « Contribution à la conception et modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT », DOCTEUR EN PHYSIQUE DE L'UNIVERSITE HADJ LAKHDAR DE BATNA-1- 22/01/2017.

[16] **Majed Ben Ammar, Maher Chaabene, Zied Chtourou**, Artificial Neural Network based control for PV/T panel to track optimum thermal and electrical power, University of Sfax, National School of Engineers of Sfax, BP W, 3038 Sfax, Tunisia, 17 October 2012.

## ملخص :

في مجال الطاقة الشمسية، استعملت عدة خوارزميات و تطبيقات الكترونية لتتبع نقطة الاستطاعة العظمى في النظام الكهروضوئي والنظام الحراري. هذه الأنظمة دمجت في وحدة واحدة الألواح الشمسية ذات الاستعمال المزدوج (PV/T) , التي تنتج استطاعة كهربائية وحرارية معا.

هذا العمل يشرح كيفية تتبع و الحصول على نقطة الاستطاعة العظمى (OPOP) باعتماد على النموذج المدروس وكذا حساب التدفق الكتلي لماء مع أخذ بعين الاعتبار التغيرات في الإشعاع الحراري ودرجة حرارة الجو (Ambiante) الكلمات الرئيسية : الألواح الشمسية ذات الاستعمال المزدوج (PV/T), نمذجة, محاكاة

## Abstract:

As solar energy is intermittent, many algorithms and electronics have been developed to track the maximum power generation from photovoltaic and thermal panels. Following technological advances, these panels are gathered into one unit: PV/T system. PV/T delivers simultaneously two kinds of power: electrical power and thermal power. Nevertheless, no control systems have been developed in order to track maximum power generation from PV/T system. This paper suggests a PV/T control algorithm to detect the optimal power operating point (OPOP) by considering PV/T model behavior. The OPOP computes the optimum mass flow rate of PV/T for a considered irradiation and ambient temperature.

**Key words:** PV/T, Modeling, Simulation,

## Résumé :

Dans le domaine d'énergie solaire, Plusieurs algorithmes développées pour déterminer le maximum de puissance générer par les systèmes photovoltaïques et les systèmes thermiques ; ces systèmes intégrées dans une seule unité : les systèmes photovoltaïques thermiques PV/T. l'objectif de ce travail, entrepris une étude théorique et numérique d'un capteur photovoltaïque thermique PV/T et la détermination et le suivi du point de fonctionnement de leurs puissances électriques et thermiques (Optimal Power Operating Point).L'OPOP détermine le débit massique optimale en compte les variations de rayonnement et la température ambiante.

**Mots clés :** PV/T, Modélisation, Simulation