

M1531.686

**Université 8 mai 1945 Guelma**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département de Génie Mécanique**



## **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

Présenté par

**OULD SID AHMED MOHAMED**

Pour l'obtention du diplôme de Master

Option :Maintenance Industrielle

=====

### **Modélisation d'un Capteur Hybride Photovoltaïque Thermique à Air**

=====

Sous la Direction de

**Pr. OULD LAHOUCINE chérif**

**Année universitaire : 2014/2015**

15/3/165

## **REMERCIEMENT**

*Je rends grâce au bon DIEU de m'avoir donné une santé de fer et beaucoup de courage. Je remercie nos parents pour leur soutien incessant sans condition, et mes amis pour leurs encouragements, et tous les enseignants qui ont contribué à mon formation depuis l'école primaire. Mention spéciale à mon encadreur Dr. OULD LAHOUCINE CHERIF, pour ses conseils fructueux et sa disponibilité illimitée.*

*Et je ne saurai terminer sans lancer un grand merci à tous mes camarades étudiants de la promotion du département de mécanique. En particulier ceux de notre spécialité MAINTENANCE INDUSTRIELLE promotion 2015. En bref, je remercie tous ceux qui mes aidé de près ou de loin que ce soit par leur soutien moral ou physique pour la réalisation de ce projet.*

**OUELD SID'AHMED MOHAMED**

## SOMMAIRE

Résumé .....	
Liste des figures .....	
Nomenclature.....	
Introduction générale .....	1
Chapitre I .....	3
I-1.Introduction.....	3
I-2. Histoire et motivation.....	3
I-3. Le soleil.....	5
I-3.1 Le mouvement de la terre.....	6
I-3.2 Le rayonnement solaire.....	7
I-3.3 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol.....	9
I-4 Description de système de captage photovoltaïque .....	10
I-4.1 Module photovoltaïque .....	10
I-4.2 Caractéristique du module photovoltaïque .....	11
I-4.3 L'effet photovoltaïque.....	11
I-4.4 Technologie de cellules PV.....	12
a) Cellules à base de silicium monocristallin .....	12
b) Cellules à base de silicium polycristallin.....	13
c) Cellules à base de silicium amorphe.....	14
I-4.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	15
I-4.6 L'assemblage du module PV .....	17
I-4.7 Influence de la température sur le module PV.....	18
I-5 Capteur solaire thermique .....	19
I-5.1 Définition .....	19
I-5.2 Eléments constitutifs.....	20

a) Surface absorbante .....	20
b) Couverture transparente .....	20
c) Système de transfert de chaleur par le fluide.....	21
d) L'isolant .....	21
I-6 Capteur hybride PVT .....	22
I-6.1 Définition .....	22
I-7 L'étude bibliographique .....	23
I-7.1 Capteurs solaires PVT hybrides à eau.....	23
I-7.2 Capteurs solaires PVT à air.....	29
Conclusion .....	32
Chapitre II.....	33
II-1 Introduction.....	33
II-2 Présentation du capteur étudié.....	33
II-3 Modèle thermique.....	34
II-4 Hypothèses Simplificatrices Proposées .....	34
II-5 Bilans énergétique .....	35
II-6 : L'organigramme d'algorithme de calcul .....	46
II-6 : Conclusion.....	47
II-3.4 :Chapitre III .....	48
Aperçus sur le Chapitre III .....	48
III. 1. Effet de la Vitesse Moyenne d'Écoulement de l'Air.....	48
III. 2. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette (en Alliage d'Aluminium).....	51
III. 3. Effet du Débit Massique de l'Écoulement de l'Air .....	53
III. 4. Effet du Flux Solaire Direct Incident.....	57
III. 5. Effet de la Température Ambiante .....	59
III. 6. Effet du Nombre de Reynolds .....	61
III. 7. Effet du Nombre de Canaux de Refroidissement .....	62

Conclusion générale et perspectives .....	67
Références.....	69
Annexe :Propriété thermo physique de l'air .....	71

## Listes des figures

Fig. I.1: Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. ....	5
Fig. I.2: Mouvement de la terre autour du soleil . ....	7
Fig. I.3: différentes constantes d'illumination. ....	8
Fig. I.4: Irradiance en fonction de la longueur d'onde AM. ....	9
Fig. I.5: Le flux solaire reçu sur la terre. ....	10
Fig. I.6: Module Photovoltaïque PV. ....	10
Fig. I.7: Cellule PV monocristalline. ....	12
Fig. I.8: Cellule PV polycristalline. ....	13
Fig. I.9: Cellule PV amorphe. ....	14
Fig. I.10: Structure de bande schématique de silicium à gap direct (a) et à .....	15
Figure 11: structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n. Fig. I.12: structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n. ....	16
Fig. I.12: principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. ....	17
Figure 14: L'assemblage du module PV. Fig. I.14: L'assemblage du module PV. ....	17
Fig. I.14: Variation du rendement en fonction de température. ....	18
Fig. I.15 : Capteur thermique. ....	19
Fig. I.18: Système hybride génère l'eau chaude et un courant électrique. ....	22
Fig. I.17: Capteur hybride PVT. ....	22
Fig. I.21 coupe transversal d'un capteur hybride à eau. ....	24
Fig. I.19 : La configuration étudiée par H. Kaidouchi. ....	23
Fig. I.20 : La configuration étudiée dans ce travail. ....	23
Fig. I.22 : capteur solaire PV/T hybride à eau. ....	23
Fig. I.23 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau. ....	26
Fig. I.24 : Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau. ....	27
Fig. I.25 : capteur solaire PV/T hybride à eau. ....	27
Fig. I.26 : Premier et second prototypes construits. ....	28
Fig. I.27 : Les prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PV/T à air. ....	29
Fig. I.28 : Banc d'essai du capteur solaire PVT hybride à air . ....	28
Fig. II-1 : Conception de capteur étudié. ....	34
Fig. II-2: Analogie électrique pour le capteur hybride PVT à étudier. ....	36
Fig. II-3 : Bilan énergétique sur un élément de volume ( $H.\delta x.l$ ). ....	38

Fig. II-4 : Ailette considérée .....	39
Fig. II-5 : Transfert de chaleur dans la région d'entré d'un écoulement de Hagen-Poiseuille dans un canal formé de deux plaques parallèles. ....	43
Fig. III-1. Effet de la Vitesse sur la Température de la Cellule Photovoltaïque (PV).....	48
Fig. III-2. Effet de la Vitesse sur le Rendement Thermique.....	49
Fig. III-3. Effet de la Vitesse sur le Rendement Electrique.....	50
Fig. III-4. Effet de la Vitesse sur le Rendement Global .....	51
Fig. III-5. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette sur la Température de la Cellule Photovoltaïque (PV).....	52
Fig. III-6. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette sur Le rendement Thermique (%). ....	53
Fig. III-7. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette sur Le rendement Electrique (%). ....	53
Fig. III-8. Effet du Débit Massique sur la Puissance Electrique Produite par le Capteur Photovoltaïque PV. ....	54
Fig.9 III-. Effet du Débit Massique sur la Puissance Thermique recuperée par le capteur hybride PVT à air .....	54
Fig. III-10. Effet du Débit Massique sur la Température de la Cellule PV.....	55
Fig. III-11. Effet du Débit Massique sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.....	55
Fig. III-12. Effet du Débit Massique sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.....	56
Fig. III-13. Effet du Débit Massique sur le Rendement Global du Capteur Hybride PVT à Air.....	56
Fig. III-14. Effet du Flux Solaire sur la Température de la Cellule PV. ....	57
Figure 15Fig. III-15. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.....	57
Fig. III-16. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.....	58
Fig. III-17. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Global du Capteur Hybride PVT à Air. ....	57
Fig. III-18. Effet de la Température Ambiante sur la Température de la Cellule PV .....	60
Fig. III-19. Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Thermique. ....	60
Fig. III-20. Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Electrique. ....	61

Fig. III-21. Effet du Nombre de Reynolds sur l'Energie Nette (Energie Thermique - Energie Ventilateur).....	61
Fig. III-22. Effet du Nombre de Canaux sur le Coefficient de Convection à l'Intérieur du Canal de Refroidissement. ....	62
Fig. III-23. Effet du Nombre de Canaux sur la Température de la Cellule PV .....	63
Fig. III-24. Effet du Nombre de Canaux sur la Puissance Electrique Produite par effet PV. ....	64
Fig. III-25. Effet du Nombre de Canaux sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.....	65
Fig. III-26. Effet du Nombre de Canaux sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.....	65
Fig. III-27. Effet du Nombre de Canaux sur le Rapport Nu(Nusselt)/ Dh (diamètre hydraulique).....	66

Nomenclature

---

<b><i>b</i></b>	Espace entre les canaux.....	m
<b><i>C</i></b>	Chaleur spécifique de l'air.....	J/Kg.K
<b><i>D<sub>h</sub></i></b>	Diamètre hydraulique.....	m
<b><i>h<sub>in</sub></i></b>	Coefficient de transfert de chaleur à l'intérieur du canal.....	W/ m <sup>2</sup> K
<b><i>h<sub>ex</sub></i></b>	Coefficient de transfert de chaleur par convection à l'extérieur.....	W/m <sup>2</sup> .K
<b><i>H<sub>c</sub></i></b>	Hauteur optimal du canal.....	m
<b><i>L<sub>c</sub></i></b>	La longueur du canal.....	m
<b><i>P<sub>e</sub></i></b>	La puissance électrique délivrée par le capteur.....	W
<b><i>Q''<sub>so</sub></i></b>	Rayonnement total reçu par le capteur PV.....	W/m <sup>2</sup>
<b><i>Q''<sub>conv ex</sub></i></b>	Le flux de chaleur perdu par la convection extérieure entre le vitrage et l'air ambiant.....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>Q''<sub>ray</sub></i></b>	Le flux de chaleur perdu par rayonnement entre le vitrage et le ciel.....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>Q''<sub>conv in</sub></i></b>	Le flux de chaleur .....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>Q<sub>ai</sub></i></b>	La quantité de chaleur dissipé par l'ailette.....	W
<b><i>Q''<sub>0</sub></i></b>	Le flux de chaleur traversant la plaque absorbante.....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>Q''<sub>ai</sub></i></b>	Le flux de chaleur dissipé à travers l'ailette.....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>Q''<sub>v</sub></i></b>	Le flux de chaleur perdu par le verre.....	W/ m <sup>2</sup>
<b><i>T<sub>c</sub></i></b>	Température de cellules.....	K
<b><i>T<sub>s</sub></i></b>	Température de la plaque absorbante.....	K
<b><i>T<sub>m</sub></i></b>	Température moyenne de l'air caloporteur.....	K
<b><i>V<sub>vent</sub></i></b>	Vitesse du vent.....	m/s
<b><i>V<sub>moy</sub></i></b>	Vitesse moyenne avec laquelle l'air s'écoule dans le canal.....	m/s
<b><i>δ<sub>ai</sub></i></b>	L'épaisseur d'ailette.....	m
<b><i>λ<sub>ai</sub></i></b>	Conductivité d'ailette.....	W/m.K
<b><i>ρ</i></b>	Masse volumique de l'air.....	Kg/m <sup>3</sup>
<b><i>λ<sub>v</sub></i></b>	Conductivité du verre.....	W/m.K
<b><i>δ<sub>v</sub></i></b>	L'épaisseur du verre.....	m
<b><i>η</i></b>	Rendement de cellules PV.....	[]

---

---

# Introduction

---

## Introduction Générale

Le refroidissement d'un capteur photovoltaïque est un problème de grande importance surtout pour des pays chauds comme l'Algérie ou la Mauritanie. L'énergie utile qu'elle soit thermique ou électrique produite à partir de l'énergie solaire remplace les énergies fossiles et nucléaires, et contribue non seulement à la réduction des effets de serre mais aussi aux développements des régions enclavées qui n'ont aucun accès aux différentes sources d'énergies. Cependant, le rendement d'une cellule PV comme tout système de conversion thermodynamique, voit son rendement diminuer par les irréversibilités de l'entropie produite suite à l'augmentation de la température. Si cette étude peut être traitée comme un sujet académique dans des pays Européens, elle est cependant d'une importance cruciale pour nos pays en Afrique du fait qu'on se trouve dans le continent et la région où la température moyenne est la plus élevée.

Le refroidissement des cellules PV constitue donc un des axes de recherche actuellement en vogue un peu partout dans le monde, mais aussi depuis quelques années à l'université du 8 Mai 1945 de Guelma. Le capteur hybride photovoltaïque/thermique utilisant l'eau ou l'air reste donc une approche très attractive pour attaquer ce problème. L'approche adoptée par mon encadreur Dr. OULD LAHOUCINE Chérif pour répondre à la demande des deux formes d'énergies (électrique et thermique) pour les sites isolés en tenant compte du « *développement durable* », en adoptant l'approche des capteurs hybrides PVT, et d'utiliser des matériaux disponibles et très peu coûteux pour la fabrication des capteurs solaires. Aussi, la récupération de l'aluminium à partir des canettes de boissons, permettra ainsi de fabriquer la surface de captation ainsi que les ailettes de l'échangeur de refroidissement.

L'année d'avant, un mémoire de master a été soutenu par l'étudiant Kaidouchi Hicham, traitant le problème du capteur PVT à eau et à air. L'étudiant dans sa thèse a utilisé le logiciel COMSOL Multiphysics pour modéliser et simuler le capteur. Comme résultat important dans ce mémoire, il ressort que dans le cas d'un capteur hybride PVT à eau, il est préférable d'utiliser un canal rectangulaire épousant la même surface que celle du panneau PV au lieu du système classique à serpentin, généralement utilisé pour ces systèmes. De plus, il paraissait qu'il n'est pas nécessaire d'utiliser des ailettes pour le refroidissement du capteur photovoltaïque dans le cas où le fluide est de l'eau, ceci est dû au fait que l'eau possède une bonne conductivité thermique, éliminant de fait l'utilisation des ailettes.

Cependant, pour le cas de l'air, et à cause justement de sa faible conductivité thermique, l'utilisation des ailettes devient incontournable. H. Kaidouchi a essayé d'aborder ce problème, malheureusement, l'utilisation de COMSOL requiert de simuler un système tridimensionnel, ce qui s'est traduit non seulement par un calcul impossible à satisfaire sur PC même en utilisant le cluster de l'université.

Tenant compte de ces contraintes et de l'importance du thème, une autre approche a été adoptée en définissant le présent sujet. Il a été décidé d'aborder le problème en faisant une modélisation quasi-complète sur les points de vue thermique et mécanique des fluides, cependant, le transfert de chaleur est considéré monodimensionnel, en régime permanent, avec un écoulement laminaire et totalement établi. L'équation différentielle obtenue à partir du bilan sur un volume de contrôle, à heureusement pu être résolue donnant ainsi une équation analytique où la majorité des paramètres influant apparaissent. Un programme de calcul en Fortran 90 a été écrit et les résultats des simulations obtenus.

L'organisation du présent mémoire s'articule sur trois chapitres. Le premier concernera des généralités sur l'énergie solaire, ses différentes applications et systèmes de conversions thermique et photovoltaïque. Une bonne partie de ce chapitre sera consacrée évidemment aux capteurs hybrides photovoltaïque/thermique à eau et à air.

Le second chapitre constitue le cœur du travail, il est consacré à la modélisation du capteur hybride PVT à air. Le bilan thermique avec les hypothèses de bases et les simplifications sont clairement exposées. Ce chapitre sera finalisé bien entendu par l'algorithme de calcul.

Le chapitre 3 sera dévolu complètement aux résultats des simulations avec discussion de toutes les figures présentées tout en mettant en relief certain faits et observations qui à mon humble avis, n'ont pas étaient mis en évidence dans les études antérieures. Une conclusion termine ce travail de master.

---

# Chapitre I

---

### **I-1.Introduction :**

Ce chapitre présente les bases indispensables à la compréhension du sujet. La première partie de ce chapitre est consacrée à un bref historique qui établit la position des cellules solaires par rapport aux autres systèmes de production d'énergie électrique. Elle est suivie d'une deuxième partie qui donne le principe de l'effet photovoltaïque et la présentation d'une source d'énergie durable : le soleil. La troisième partie présente les différentes technologies de fabrication des photopiles. Ensuite, nous décrivons le fonctionnement des cellules photovoltaïques, et l'influence de l'augmentation de température limitant leur rendement de conversion. Nous allons aussi parler un petit peu du fonctionnement de capteur solaire thermique qui transforme l'énergie contenue dans rayonnement solaire en chaleur. Nous allons coupler les deux capteurs précédents en même cadre pour avoir autre type de capteurs qu'on appelle capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT). Une modélisation de ce dernier c'est le sujet de notre travail. Dans ce chapitre on va connaître son principe de fonctionnement et son intérêt et ses différents types existés et on précise le point de départ de l'étude qu'on va entamer à partir du chapitre qui suit. Enfin on va citer certaines études concernant de ce sujet publiée dans des publications internationales.

### **I-2. Histoire et motivation :**

L'énergie renouvelable peut être utilisée lorsqu'une ressource énergétique se régénère naturellement à une vitesse comparable avec celle de son utilisation. Le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau. Les énergies pétrolières et nucléaires n'appartiennent pas à cette classe puisque la réserve mondiale en pétrole et en uranium est limitée.

En 1975, K.W. Ford avait reporté que l'énergie du rayonnement solaire à la surface de la terre était 104 fois plus grande que la demande d'énergie mondiale [1]. La conversion de cette énergie en électricité peut être effectuée de manière directe ou indirecte Fig. I-1. L'utilisation des cellules photovoltaïques pour obtenir cette conversion est une voie prometteuse pour exploiter cette source d'énergie durable.

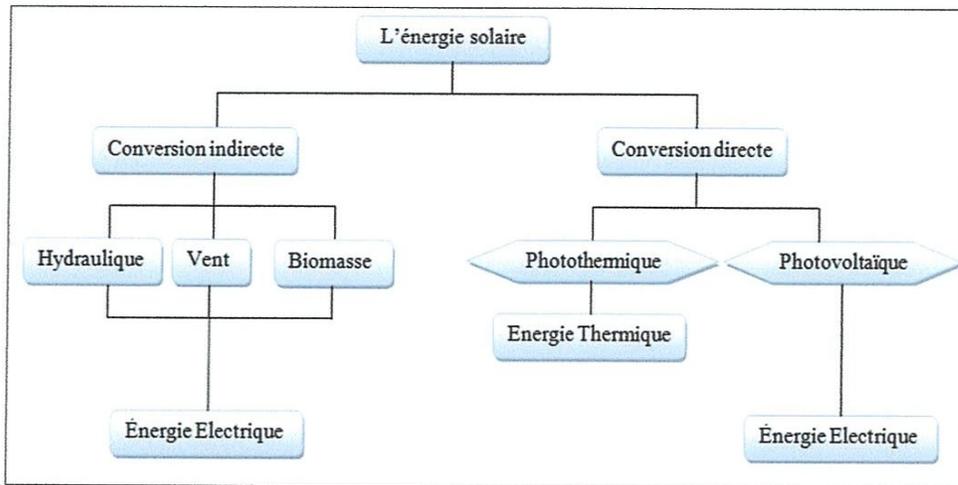
Le développement des cellules photovoltaïques a commencé en 1839 lorsque [Henri Becquerel](#) a mis en évidence l'apparition d'une tension aux bornes de deux électrodes immergées dans une solution électrolytique, lorsque celle-ci était exposée à la lumière naturelle. Par la suite, [Albert Einstein](#) a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \text{I. 1}$$

Où  $h$  est la constante de Planck,  $c$  est la vitesse de la lumière, et  $\lambda$  est sa longueur d'onde. Aussi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à [Albert Einstein](#) le prix Nobel en 1905.

En 1954 Chapin et al. [2] des laboratoires Bell Téléphone aux États-Unis ont développé la première cellule solaire au silicium, avec un rendement énergétique de 6 %. Depuis, les cellules photovoltaïques ont commencé à faire l'objet de recherches plus intenses et se sont développées à l'échelle industrielle. Deux principales raisons en sont à l'origine :

- ✓ Le faible coût de fabrication du silicium qui pouvait en plus être issu en abondance des déchets de la microélectronique. En effet, le recyclage possible permettait alors d'éviter les premières étapes technologiques relativement, chères, notamment la purification.
- ✓ Le début du lancement d'importants programmes spatiaux et la nécessité d'avoir des sources d'énergie embarquées performantes.



**Fig. I.1:** Conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Pour les applications spatiales, répondant aux normes de poids et de durées de vie importantes, les cellules photovoltaïques sont rapidement devenues des cellules multicouches basées sur divers matériaux inorganiques, dont une des couches est souvent en Ga As. Elles présentent des rendements très élevés, une bonne fiabilité et une faible détérioration de leur caractéristique au cours du temps (*sur au moins 20 ans*). Bien que leurs performances soient meilleures que celles en Si, ces dernières ne se développent pas pour des applications terrestres en raison de leur prix, 50 à 100 fois plus chères. Pour les applications terrestres, le silicium est devenu le matériau le plus utilisé pour fabriquer des cellules PV en raison de son faible coût.

### I-3. Le soleil :

Le développement, l'optimisation et la caractérisation de cellules photovoltaïques impliquent une certaine connaissance de la source d'énergie utilisée. Le soleil est l'origine principale de toute forme d'énergie sur terre. Ceci étant vrai autant pour les énergies conventionnelles d'origine fossile, comme les hydrocarbures qui sont la conséquence de la photosynthèse ; que pour les énergies non conventionnelles dites renouvelables, comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne, la biomasse, et l'énergie géothermique. L'astre soleil est de constitution gazeuse, de forme sphérique de  $14 \times 10^5$  km de diamètre, sa masse est de l'ordre de  $2 \times 10^{30}$  kg. Il est constitué principalement de 80% d'hydrogène, de 19% d'hélium, le 1% restant est un mélange de plus de 100 éléments [3].

Il est situé à une distance de la terre égale à environ 150 millions de km. Sa luminosité totale, c'est-à-dire la puissance qu'il émet sous forme de photons, est à peu près égale à  $4 \times 10^{26}$  w. Seule une partie est interceptée par la terre, elle est de l'ordre de  $1,7 \times 10^{17}$  w. Elle nous parvient essentiellement sous forme d'ondes électromagnétiques 30% de cette puissance est réfléchiée vers l'espace, 47% est absorbée et 23% est utilisée comme source d'énergie pour le cycle d'évaporation-précipitation de l'atmosphère [3]. Les caractéristiques principales du soleil sont regroupées dans le tableau suivant [4] :

Diamètre (km)	$14.10^5$
Masse (kg)	$2.10^{30}$
Surface ( $\text{km}^2$ )	$6,09.10^{17}$
Volume ( $\text{km}^3$ )	$1,4.10^{18}$
Masse volumique moyenne ( $\text{kg/m}^3$ )	1408
Vitesse (km/s)	217
Distance du centre de la voie lactée (km)	$2,5.10^{47}$

**Tableau I.1:** Caractéristiques principales du soleil.

### I-3.1 Le mouvement de la terre :

Dans son mouvement autour du soleil, la terre décrit une ellipse dont le soleil est l'un de ses foyers, la révolution complète s'effectue en une période de 365,25 jours. Le plan de cette ellipse est appelé l'**écliptique** [3]. C'est au solstice d'hiver (21 décembre) que la terre est la plus proche du soleil : 147 millions de km. Au 22 juin la distance terre-soleil vaut 152 millions de km, c'est le jour ou la terre est la plus éloignée, c'est le solstice d'été. Le 21 mars et le 21 septembre sont appelés respectivement **équinoxes de printemps** et **équinoxe d'automne**. Aux équinoxes le jour et la nuit sont égaux [3]. En plus de sa rotation autour du soleil, la terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'**axe des pôles**. Cette rotation s'effectue en une journée. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la terre est appelé l'**équateur**. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique, ils font entre eux un angle appelé **inclinaison** égale à  $23^{\circ}30'$ . Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur Fig. I.2.

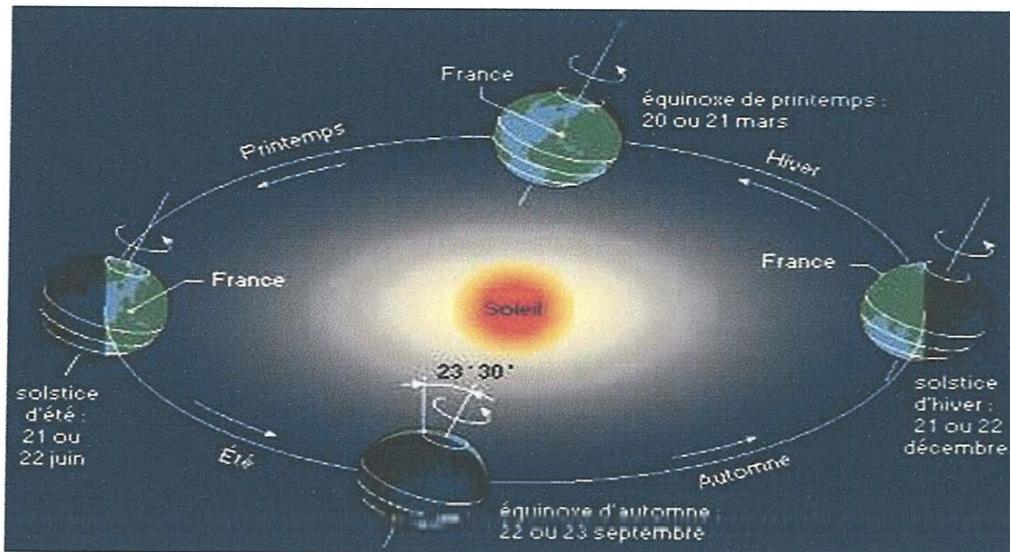


Fig. I.2: Mouvement de la terre autour du soleil [4].

### I-3.2 le Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet  $0,2\mu\text{m}$  à l'infrarouge lointain  $2,5\mu\text{m}$ . Lorsque ce rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption par les molécules des différentes couches atmosphériques, conditions climatiques, la diffusion moléculaire de Rayleigh et les poussières. Aussi le dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  et la vapeur d'eau  $\text{H}_2\text{O}$ , pour les infrarouges au dessus de  $2\mu\text{m}$ , absorbent les énergies proches de leur énergie de liaison, ce qui conduit à des trous dans le spectre solaire visible au sol. Par ailleurs, les aérosols et les poussières présents dans l'atmosphère conduisent à une absorption répartie quasiment sur toute la gamme spectrale, ce qui conduit à une baisse globale de la puissance incidente.

L'intensité lumineuse issue du soleil normalement incidente sur la couche extérieure de l'atmosphère est appelée la constante solaire. Cette constante à une valeur approximativement de  $1,4\text{KW}/\text{m}^2$  au dessus de la couche atmosphérique est réduite sur terre à  $1\text{KW}/\text{m}^2$  par réflexion et absorption des particules présentes dans la couche atmosphérique. Cette perte est appelée la masse d'air ( $\text{AM}_y$ ), elle est utilisée afin de caractériser le spectre solaire en terme d'énergie émise [5], étant défini par :

$$y = \frac{1}{\sin(A)} \quad \text{I.2}$$

A: Représente l'angle entre la position du soleil et l'horizon Fig. I-3. On définit ainsi les conditions :

- $AM_0$  correspond à une masse d'air nulle pour la lumière arrivant au dessus de notre atmosphère à incidence normale ;
- $AM_1$  correspond à une même lumière arrivant à la surface terrestre ;
- $AM_{1.5}$  désigne la masse d'air rencontrée pour la lumière arrivant à  $48.2^\circ$  sur la surface de la terre, soit une lumière plus faible du fait que l'épaisseur de la couche atmosphérique traversée est plus grande.

L'intensité reçue à la surface de la terre peut être calculée grâce à la formule suivante

[5] :

$$I_D = 1.353(0.7^{0.678 AM}) \quad 1.3$$

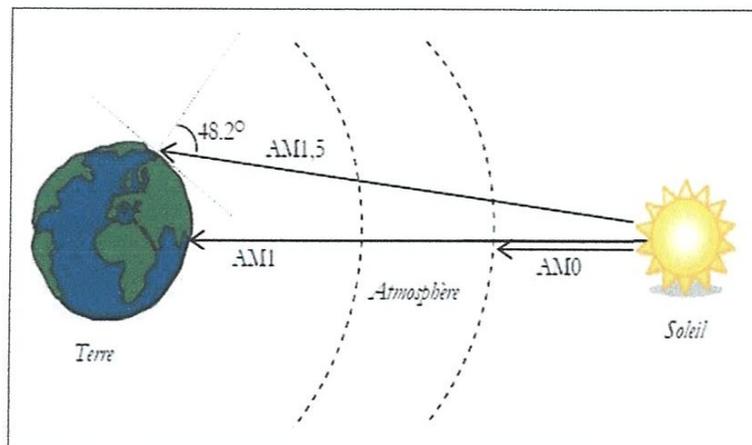


Fig. I.3: différentes constantes d'illumination.

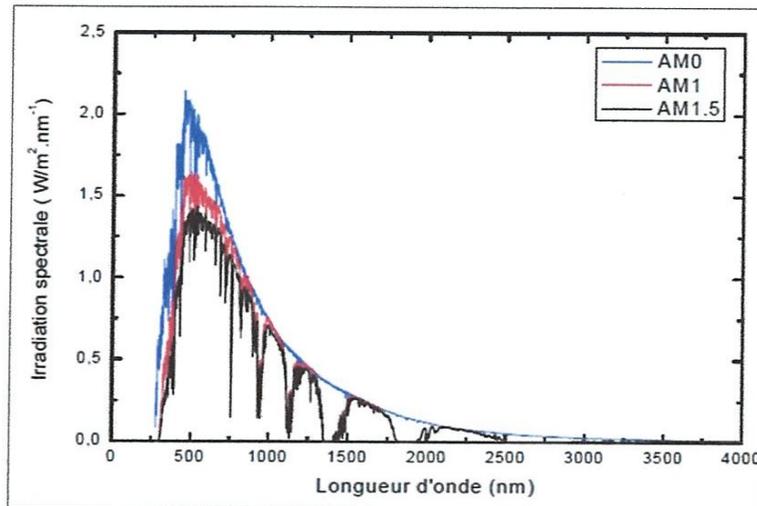


Fig. I.4: Irradiance en fonction de la longueur d'onde AM. [6].

### I-3.3 Le rayonnement solaire reçu au niveau du sol :

L'atmosphère terrestre perturbe grandement et par des processus variés le flux de photons issu du soleil. Donc, après sa traversée de l'atmosphère, le rayonnement solaire peut être considéré comme la somme de deux composantes [7] :

**Le rayonnement direct :** est celui qui traverse l'atmosphère sans subir de modifications, il provient du disque solaire seulement à l'exclusion de tout rayonnement diffusé, réfléchi ou réfracté par l'atmosphère.

**Le rayonnement diffus :** est la part du rayonnement solaire provenant de toute la voûte céleste, à l'exception du disque solaire, et diffusé par les particules solides ou liquides en suspension dans l'atmosphère. Il n'a pas de direction privilégiée.

Le rayonnement global est le rayonnement reçu sur une surface horizontale provenant du soleil et de la totalité de la voûte céleste. Il est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus. La Fig. I.5 illustre les différents composants du rayonnement solaire au niveau du sol.

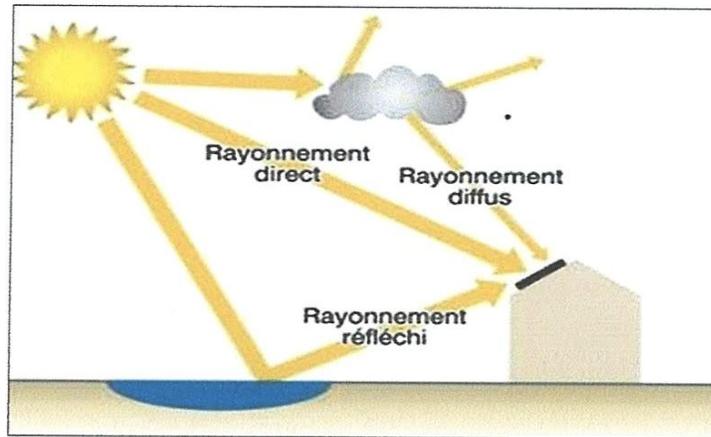


Fig. I.5: Le flux solaire reçu sur la terre.

#### I-4 Description de système de captage photovoltaïque :

##### I-4.1 Module photovoltaïque :

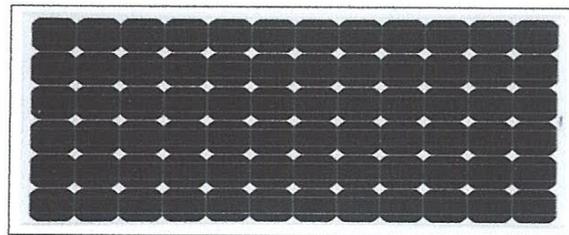


Fig. I.6: Module Photovoltaïque PV.

Le module photovoltaïque est un dispositif technologique énergétique permet de créer de l'électricité, grâce à des cellules solaires connectées entre elles, Fig. I.6 elles transforment la lumière du soleil en électricité. Pour produire plus de puissance électrique du module, on fait l'association mixte entre les cellules, car l'association en série de plusieurs cellules augmente la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. Ces cellules sont protégées de l'humidité par encapsulation dans un polymère EVA (éthylène-vinyl-acétate) et protégées aussi sur la surface avant d'un verre trempé et de bonne résistance mécanique, et sur la surface arrière d'une ou de polyéthylène [8]. Les modules sont généralement entourés d'un cadre rigide en aluminium anodisé comprenant des trous de fixation.

Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes :

- ✓ Protection des cellules contre les agents atmosphériques

- ✓ Protection mécanique et support.
- ✓ Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur.

Les modules en silicium monocristallin (c-Si, 64% de marché), poly cristallin (xc-Si, 28% du marché) ou silicium amorphe (a-Si, 13% du marché), délivrent des tensions normalisées (12, 24, 48) et des puissances entre 10 et 100 Wc (watt-crête : puissance obtenue pour l'ensoleillement maximal) [8].

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, le courant de sortie, et la puissance seront proportionnels à la surface du module. Ils ont une efficacité de conversion (énergie électrique produite/énergie solaire incidente) de l'ordre de 10 à 20%. [9]

#### I-4.2 Caractéristique du Module photovoltaïque : [10]

Les modules sont généralement des parallélépipèdes rectangles rigides minces (quelques centimètres d'épaisseur), dont les caractéristiques suivantes :

- ✓ La puissance de crête,  $P_c$  : Puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m<sup>2</sup>).
- ✓ La caractéristique  $I=f(V)$  : Courbe représentant le courant  $I$  débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- ✓ Tension à vide,  $V_{co}$  : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement " plein soleil ".
- ✓ Courant de court-circuit,  $I_{cc}$  : Courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ".
- ✓ Point de fonctionnement optimum,  $P_m (V_m, I_m)$  : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil,  $P_m = V_m * I_m$
- ✓ Rendement : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- ✓ Facteur de forme : Rapport entre la puissance optimale  $P_m$  et la puissance maximale que peut avoir la cellule :  $V_{co} * I_{cc}$

#### I-4.3 L'effet photovoltaïque :

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet

photovoltaïque. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photo détecteurs) mais aussi pour la conversion de la lumière en énergie électrique (cellules solaires).

#### I-4.4 Technologie de cellules PV :

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium qui est l'élément le plus abondant sur terre après l'oxygène, il apparaît sous forme de dioxyde  $\text{SiO}_2$ , appelé plus communément silice. Le silicium est extrait à l'échelle industrielle par un mécanisme d'oxydoréduction, de la silice à faible teneur en oxyde de fer est mise en contact de composés carbonés, le tout étant porté à très haute température  $3000^\circ\text{C}$  dans des fours électriques à arc. On obtient du silicium de qualité métallurgique, pur à 98%, qui devient de qualité dite « électronique » après des opérations supplémentaires de purification.

Le silicium occupe une place prédominante au sein de l'industrie photovoltaïque grâce à ces nombreux avantages : disponibilité, qualités photovoltaïques assurant au final un bon rendement de conversion, non toxique. Enfin, il est aisé de modifier les propriétés électriques du silicium en introduisant dans la matrice cristalline des atomes dopants tels que le Bore (induisant un dopage de type P) et le Phosphore (induisant un dopage de type N).

Le silicium se présente sous différentes formes dont les plus répandues sont le silicium polycristallin, le silicium monocristallin et le silicium amorphe.

##### a) Cellules à base de silicium monocristallin :



Fig. I.7: Cellule PV monocristalline.

Un contrôle rigoureux de la température de refroidissement du silicium fondu permet d'obtenir un monocristal. Le silicium obtenu est appelé Cz (méthode Czochralski). Conditionné en barreaux ou lingots, il est découpé en tranches d'épaisseur souhaitée *wafers*, d'où une source de perte importante de matière première car les déchets ne peuvent pas être réutilisés. Son procédé de fabrication est long et énergivore, plus coûteux, il est cependant plus efficace que le silicium polycristallin. Le rendement moyen des cellules est relativement élevé : entre 12% et 18% (version commerciale). Les inconvénients de cette technologie sont les faibles rendements obtenus sous un faible éclairage et surtout le coût prohibitif de production des matériaux.

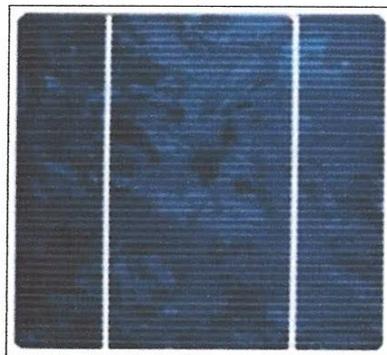
**Avantage:**

- ✓ Très bon rendement (23% en théorie et environ 17% dans la pratique) [11]

**Inconvénients:**

- ✓ Coût élevé
- ✓ Rendement faible sous un faible éclairage

**b) Cellules à base de silicium polycristallin :**



**Fig. I.8:** Cellule PV polycristalline.

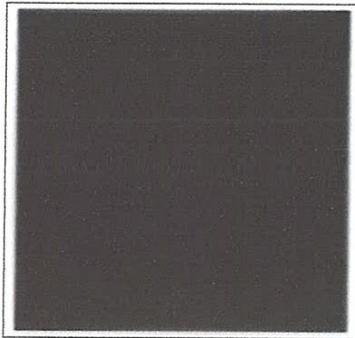
Ce type de cellules est produit à partir d'un bloc de silicium cristallisé, refroidi axialement, découpé en plaquettes minces par des scies à fil. Elles ont un rendement de 11% à 15% (version commerciale), mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication.

**Avantage:**

- ✓ Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- ✓ Moins cher que le monocristallin
- ✓ Meilleur rapport qualité/prix.

**Inconvénient:**

- ✓ Rendement faible sous un faible éclairement.
- c) **Cellules à base de silicium amorphe :**



**Fig. I.9:** Cellule PV amorphe.

Ce type de cellules, de structure moléculaire non cristalline, nécessite moins d'énergie pour leur production que les cellules cristallines, car il est composé de couches minces. Leur rendement actuel atteint 9% en industrie. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à faible coût en utilisant peu de matière première. La technologie du silicium amorphe permet de fabriquer des cellules semi transparentes qui laissent passer 10% à 20% du rayonnement solaire incident. En effet, la grande densité de défauts du silicium amorphe (liaisons pendantes, états d'interface, structure multicristalline) limite son rendement de conversion.

**Avantage:**

- ✓ Fonctionnent avec un éclairement faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).
- ✓ Moins chères que celles que nous avons citées précédemment.

**Inconvénients:**

- ✓ Rendement faible en plein soleil (environ 6%)
- ✓ Performances qui diminuent sensiblement avec le temps

#### I-4.5 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque est composée d'un matériau semiconducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semiconducteur 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 semiconducteur 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 gap. La Fig. I.10 présente les différentes transitions possibles selon la nature du gap. Quand le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence coïncident dans l'espace des  $k$ , il s'agit d'un gap direct Fig. I.10(a) Le cas contraire correspond à un semiconducteur à gap indirect Fig. I.10(b). Cette valeur « seuil » est propre à chaque matériau semiconducteur et varie de 1.0eV à 1.8eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1.12 eV pour le silicium cristallin, 1.7eV pour le silicium amorphe.

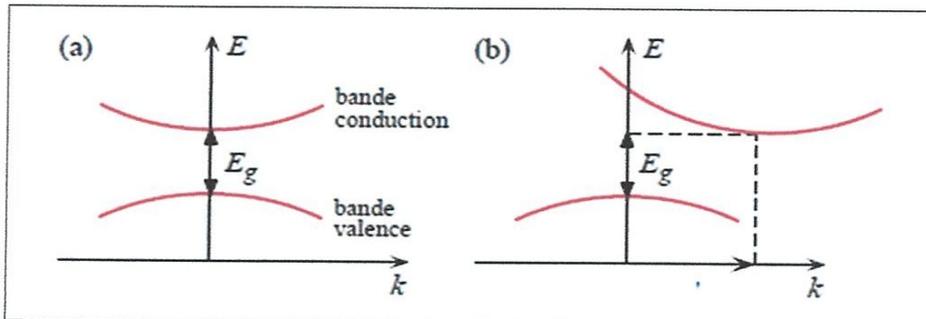


Fig. I.2: Structure de bande schématique de silicium à gap direct (a) et à gap indirect (b).

Les cellules solaires sont généralement décrites comme des jonctions p-n obtenues en variant le type de dopage dans un semiconducteur Fig. I.10.

La conversion de l'énergie est le résultat de l'absorption de photons donnant lieu à la création des paires électrons trous. Pour séparer cette paire de charges électriques de signe opposé et recueillir un courant électrique, il faut introduire un champ électrique permanent au sein du matériau. Ce dernier, assure une séparation rapide de ces porteurs pour éviter des phénomènes de recombinaison [12]. La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux natures de dopage sont possibles :

Le dopage de type n (négatif), qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal (Ex : le phosphore dans le cas du silicium).

Le dopage de type p (positif), qui utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire. (Ex : le bore dans le cas du silicium).

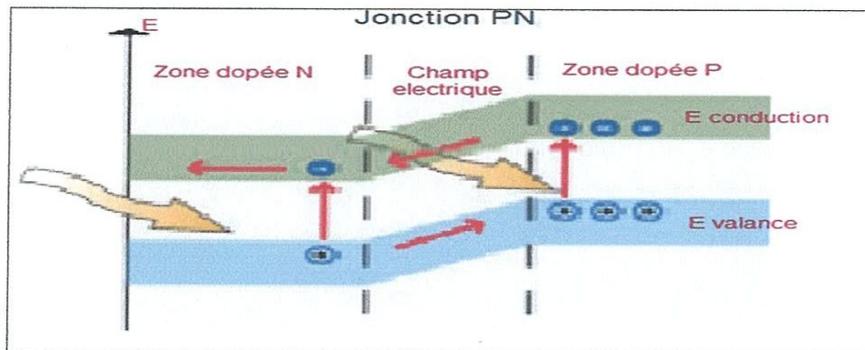


Fig. I.3: structure et diagramme de bandes pour une jonction p-n.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous dans la zone P. Une jonction P-N a été formé. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes. Chacun fait passer un électron de la bande de valence vers la bande de conduction en laissant aussi un trou capable de se mouvoir et en engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule Fig. I.12.

### I-5 Capteur solaire thermique :

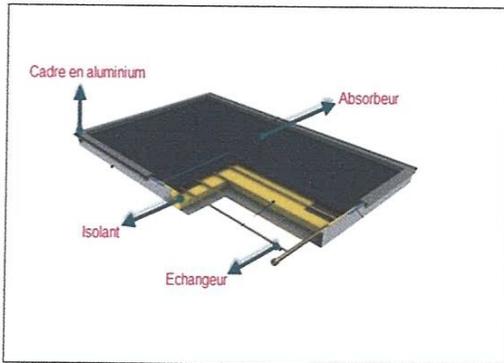


Fig. I.15 : Capteur thermique.

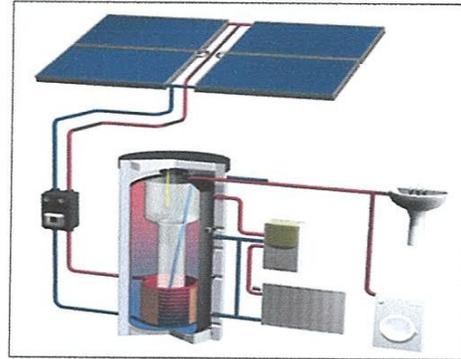


Fig. I.16 : Système de chauffage de l'eau.

#### I-5.1 Définition :

Le capteur solaire thermique est un dispositif sert de transformer l'énergie contenue dans le rayonnement solaire en chaleur. Cette transformation en chaleur est donc une énergie thermique permet de chauffer un fluide caloporteur. On peut utiliser cette énergie transportée par ce dernier dans des différents cas d'applications solaires : centrales solaires thermodynamiques, chauffe-eau et chauffage solaires, rafraîchissement solaire, cuisinières et sècheurs solaires. La production de cette énergie peut être soit utilisée directement (pour chauffer un bâtiment par exemple) ou indirectement (comme la production de vapeur d'eau pour entraîner des alternateurs et ainsi obtenir une énergie électrique).

On peut distinguer trois types de ce capteur :

- ✓ Capteur solaire plan
- ✓ Capteur solaire parabolique composé
- ✓ Capteur solaire à tube sous vide

Puisque on va utiliser dans ce travail un capteur hybride qui contient un capteur solaire plan, donc dans ce qui suit, on va présenter un peu les détails et le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan Fig. I.15

### **I-5.2 Éléments constitutants** : le capteur thermique se compose de :

#### **a) une surface absorbante :**

Le rôle de l'absorbeur est de capter au maximum le rayonnement solaire et d'en re-émettre le moins possible. En effet, l'absorbeur, en chauffant, re-émet des rayons infrarouges. Le revêtement de la surface est donc très important : il définit les caractéristiques de l'absorbeur qui sont l'absorption  $\alpha$  du rayonnement solaire et l'émission  $\varepsilon$  des rayons IR. Une surface absorbante aura des performances optimum lorsque  $\alpha = 1$  et  $\varepsilon = 0$ . De telles valeurs peuvent être obtenues grâce à un traitement de surface par des procédés électrochimiques ou électrophysiques (traitement sous vide). A titre d'exemple, une peinture noire du commerce permet d'obtenir un coefficient d'absorption entre 0,9 et 0,95 mais avec un facteur d'émission très élevé (0,85) variable selon l'état de surface.

#### **b) Couverture transparente :**

Durant le fonctionnement thermique d'un capteur solaire plan, la couverture transparente joue un rôle essentiel, qui est de permettre l'effet de serre : elle doit pour cela transmettre la plus grande partie possible du rayonnement solaire incident, et absorber (ou réfléchir dans le cas des couvertures transparentes dites sélectives) les rayons infrarouges provenant de l'absorbeur. Elle doit aussi confiner une lame d'air au-dessus de l'absorbeur, de façon à limiter les échanges convectifs. De façon contradictoire, la couverture transparente est donc par l'effet de serre à l'origine de l'échauffement de l'absorbeur, et par la réémission des rayons infrarouges le siège des pertes thermiques les plus importantes du capteur solaire.

Ses propriétés essentielles seront donc ses caractéristiques optiques et sa tenue mécanique. Elles devront présenter un facteur de transmission énergétique élevé de 0,3 à 2,2 microns, c'est-à-dire sur l'étendue du spectre solaire, et une opacité totale aux infrarouges lointains, de 4 à 30  $\mu$ , c'est à-dire aux longueurs d'onde d'émission du corps noir correspondant à des températures de 100 °C à -20 °C (en tenant compte de la largeur des spectres).

Elles devront d'autre part présenter une bonne résistance aux chocs et aux sollicitations mécaniques, qui peuvent être dues à des variations de pression ou aux simples dilatations différentielles.

Le verre est généralement choisi pour les couvertures de capteurs solaires à cause de ses propriétés optiques. Néanmoins sa tenue aux chocs ne peut être assurée en fonctionnement qu'au prix d'une épaisseur élevée (4 parfois 6 mm) ou de traitements particuliers (trempe). Il reste deux inconvénients majeurs à l'emploi du verre : son poids et les risques de casse accidentelle en transport, en manutention ou lors de la pose.

C'est pourquoi de nombreux fabricants de capteurs solaires s'orientent vers l'emploi de matières plastiques, moins lourdes et moins fragiles. Néanmoins, si le verre peut être considéré comme un matériau de référence en vieillissement, l'emploi de matériaux polymériques nécessite une étude sérieuse de leur durabilité.

**c) Système de transfert de chaleur par le fluide :**

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise habituellement soit l'eau soit l'air, ce dernier se distingue par les avantages suivants :

- ✓ Pas de problème de gel l'hiver ou d'ébullition l'été.
- ✓ Avec l'air sec, il n'y pas de problème de corrosion.
- ✓ Mise en œuvre simple.
- ✓ Système fiable.

Mais son utilisation entraîne les inconvénients suivants :

- ✓ L'air ne peut servir qu'au chauffage des locaux.
- ✓ Le produit de la masse volumique par la chaleur spécifique est faible pour l'air comparativement à celui dans le cas de l'eau.
- ✓ Les conduites doivent avoir une forte section pour laisser passer un débit suffisant compte tenu de la remarque précédente.
- ✓ Les transferts thermiques sont moins bons qu'avec l'eau. Dans le cas de tuyauteries soudées sur la face arrière de la plaque absorbante, il faut prendre soin aux soudures afin de réduire le plus possible la résistance thermique de contact.

**d) L'isolant :**

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois. Vers l'avant c'est le plus souvent une lame d'air qui fait office d'isolant. Son épaisseur ne doit pas être trop importante pour limiter les transferts par convection.

On choisira une distance comprise entre 2 à 3 cm. A la partie arrière, on place une ou plusieurs couches d'isolant du type laine de verre, polystyrène, mousse de polyuréthane;

### 1-6 Capteur hybride PVT :



Fig. I.17: Capteur hybride PVT.

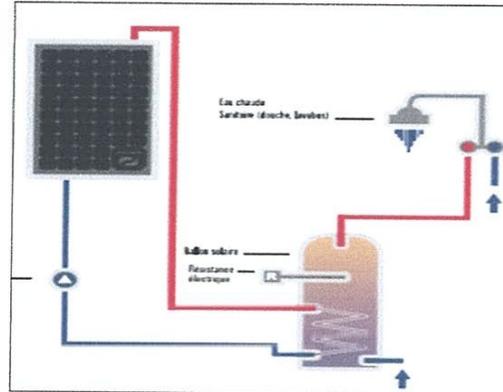


Fig. I.18: Système hybride génère l'eau chaude et un courant électrique.

#### 1-6.1 Définition :

Le couplage des capteurs précédents permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en disposant à la fois d'une source d'énergie électrique et d'une circulation d'un fluide caloporteur (eau, air) le principe consiste à allier un panneau PV à un système de chauffage thermique. L'échangeur de chaleur est placé sous le module PV pour évacuer la chaleur accumulée à l'arrière du module qui réduit la performance électrique de 0.4 à 0.5 pour chaque degré Celsius au dessus de sa température normale qui est 25°C. Donc pour maintenir le rendement nominal du module PV il nous faut de le refroidir.

A la suite du travail de H. Kaidouchi en master 2014 qui a étudié le refroidissement de ce capteur en proposant un capteur hybride PVT avec un seul canal de refroidissement placé sous le module PV. Sa surface est pratiquement la même que celle du capteur PV Fig. I.19, permettant ainsi d'obtenir un meilleur refroidissement pour un capteur PVT à eau, par contre, il a remarqué que cette configuration n'est pas efficace pour un capteur PVT à air. A cause de la faiblesse de conductivité thermique de l'air. A fin de poursuivre cette étude, notre travail consiste à modifier la configuration que H. Kaidouchi a été étudié en ajoutant des ailettes pour connaître leurs influences sur le transfert de chaleur entre panneau et le fluide caloporteur (l'air) Fig. I.20

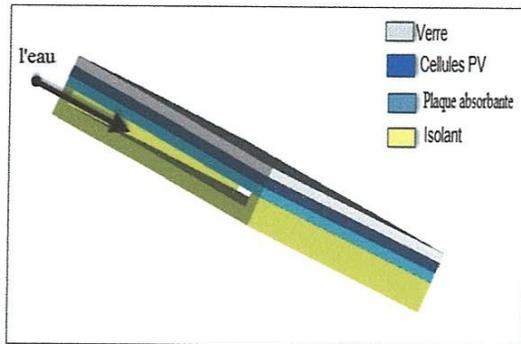


Fig. I.19 : La configuration étudiée par H. Kaidouchi.

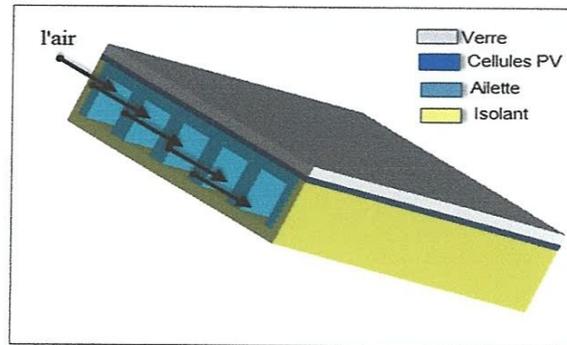


Fig. I.20 : La configuration étudiée dans ce travail.

### I-7 L'étude Bibliographique :

L'étude des paramètres qui influent sur les performances de capteur hybride photovoltaïque thermique a fait l'objet de plusieurs recherches. Nous allons exposer quelques travaux disponibles dans la littérature qui traitent le comportement énergétique de ce capteur. D'après le fluide qui est utilisé comme un fluide caloporteur on peut distinguer : Les capteurs solaires PVT hybrides à eau et Les capteurs solaires PVT hybrides à air

#### I-7.1 capteurs solaires PV/T hybrides à eau :

EN 1997, Fujisawa et Tani [13] ont conçu et construit un capteur solaire PVT hybride à eau sur une cite universitaire à Tokyo, au Japon.

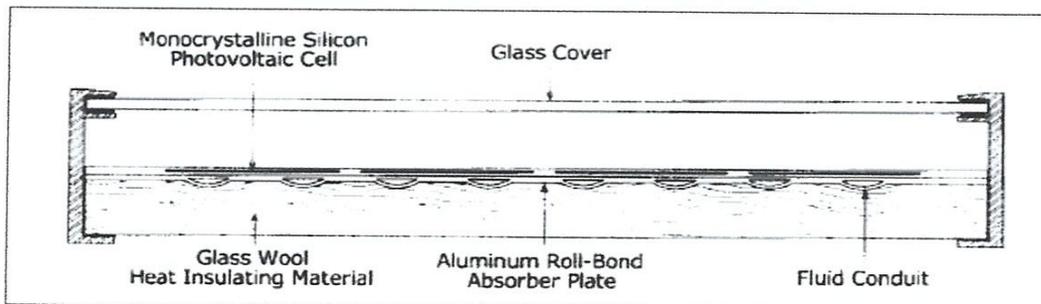
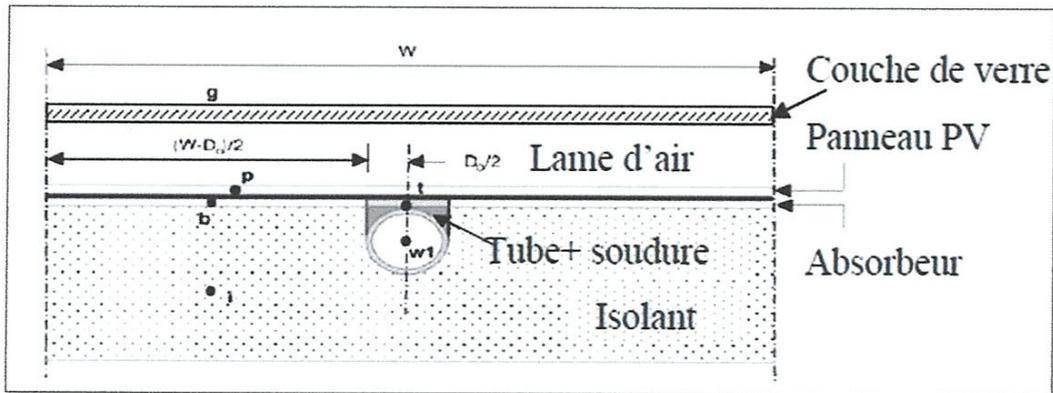


Fig. I.21 coupe transversal d'un capteur hybride à eau.

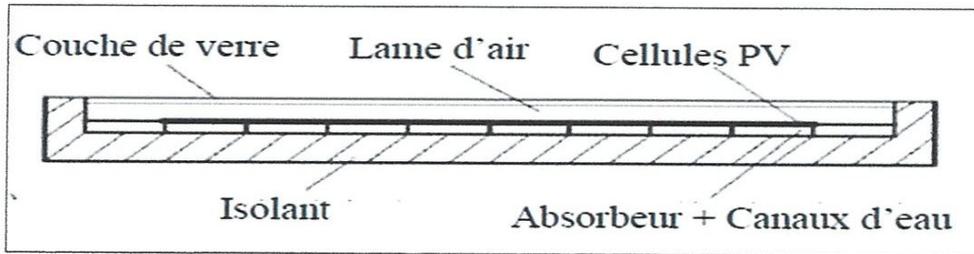
Ils étudient ainsi un composant solaire hybride composé d'un capteur solaire vitré à liquide caloporteur et à absorbeur plan en aluminium non-sélectif, et de modules PV en silicium mono-cristallin (rendement électrique de 13 %) Fig. I.21. Ce capteur solaire a une longueur de 1.3 m et une largeur de 0.5 m. Cette analyse a consisté en l'évaluation des performances énergétiques du composant étudié. Ainsi, une étude



**Fig. I.23** : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau.

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

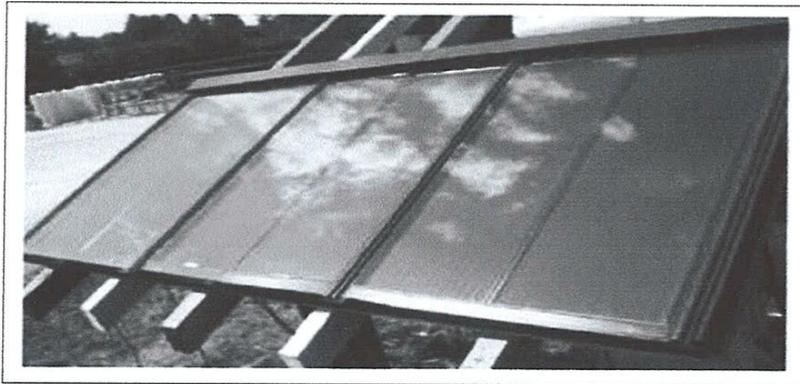
EN 2006, [16] en vue d'améliorer les transferts de chaleur entre les panneaux PV et l'absorbeur d'un capteur solaire hybride, Ji et al Fig. I.24 proposent l'analyse d'une combinaison de six prototypes de capteurs solaires PVT à absorbeur en aluminium séparé d'un isolant en mousse de polyuréthane par des canaux d'eau disposés en sous-face. Entre les panneaux PV et une couverture de verre se trouve une lame d'air de 25 mm Fig. I.24 Ces capteurs solaires étaient disposés en trois rangées en parallèle de deux capteurs solaires en série. Ces prototypes intégrés à un bâtiment ont chacun une surface de  $1.173 \text{ m}^2$  et sont couplés à un ballon de stockage de 420 litres de volume. Chaque panneau PV est composé de 72 cellules PV en silicium polycristallin.



**Fig. I.24 :** Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau.

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

En 2007, Fraisse et al [17] étudient un système combinant un capteur solaire hybride à eau et un plancher solaire dans une phase d'intégration à un bâtiment. Le système est composé de cellules mono et poly-cristallines Fig. I.25.



**Fig. I.25 :** capteur solaire PV/T hybride à eau.

Ils démontrent qu'en présence d'un vitrage le rendement électrique annuel du système hybride combiné est de 6.8 %, ce qui est inférieur de 28 % au rendement d'un capteur solaire PV non intégré (9.4 %). Ils expliquent cette baisse de rendement électrique par un accroissement de la température de fonctionnement des panneaux PV (pouvant être supérieure à 100 °C) dû à la couverture de verre. Par contre, en absence de vitrage le

rendement électrique est de 10 %, ce qui est supérieur de 6 % à celui du capteur solaire PV non intégré. La forte augmentation de la température des modules PV en été empêche l'utilisation de l'EVA comme adhésif des panneaux PV dans un composant vitré. De plus, Fraisse et al notent que dans ce type de configuration, l'utilisation de cellules amorphes est la plus adaptée car elles sont moins sensibles aux variations de température. Cependant, les rendements électriques obtenus sont faibles étant donné le bas rendement électrique des cellules PV amorphes (à savoir, 4 à 7 %) et les pertes thermiques liées au vitrage.

EN 2007, Chow et al [17] présentent la modélisation et l'étude comparative des performances d'un capteur solaire PVT hybride à eau, d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire à eau. Deux prototypes de capteurs solaires hybrides ont été construits, le premier ayant été modélisé en 2006.

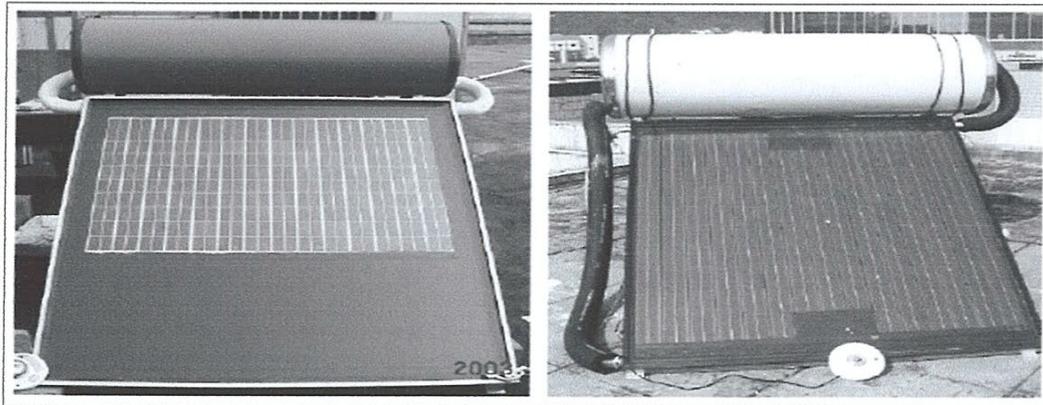


Fig. I.26 : Premier et second prototypes construits.

Le second composant, plus performant a été modélisé plus finement. C'est un capteur solaire vitré composé d'un panneau PV en silicium cristallin collé à un absorbeur métallique Fig. I.26. Des tubes de circulation d'eau sont soudés à l'arrière de cet absorbeur. Le système est couplé à un ballon de stockage horizontal. Les résultats de la simulation montrent que le rendement thermique annuel moyen de ce capteur solaire PVT hybride à eau est de 38.1 % et celui du capteur solaire à eau, de 43.2 %. De plus, la comparaison du capteur solaire hybride avec un capteur solaire PV montre que le refroidissement avec de l'eau comme fluide caloporteur permet de réduire la température fonctionnement des modules PV. Dans ce sens, la production d'énergie électrique annuelle du capteur solaire hybride est supérieure de 2.2 % à celle du capteur solaire PV. Chow et al ont poursuivi cette étude des capteurs solaires

hybrides PVT à eau à travers l'intégration d'un système a la façade d'un bâtiment et l'étude expérimentale de ses performances thermiques et électriques. Le rendement thermique à été estimé à 38.9 % à basse température et le rendement électrique à 8.56 %.

### I-7.2 Les capteurs solaires PVT à air :

EN 2000 Hegazy [18] compare, les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires PVT hybrides à air qui sont différenciés par le mode de refroidissement (mécanique) des panneaux PV, à (prototype I), (prototype II), (prototype III) de l'absorbeur, et par double circulation d'air (prototype IV) (fig9)

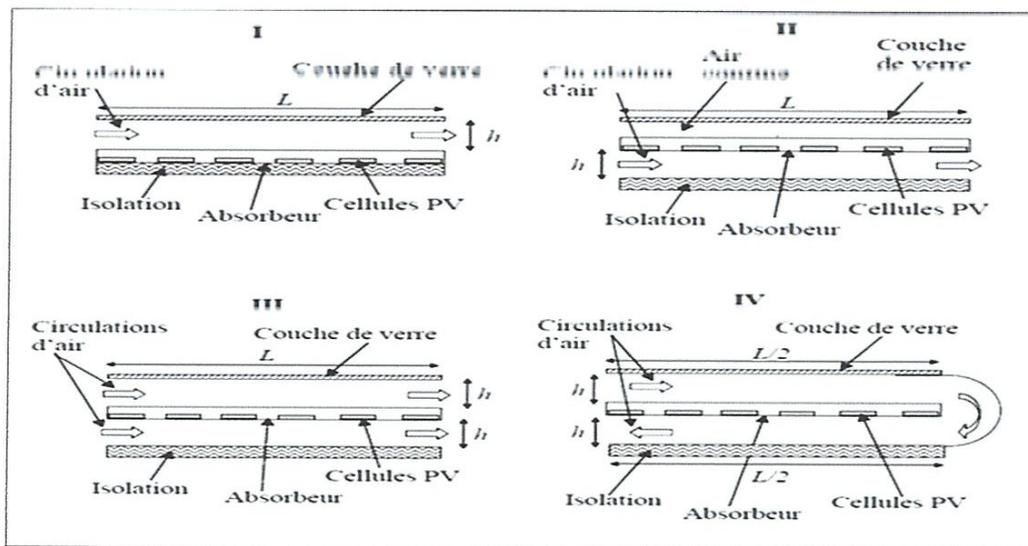


Fig. I.27 : Les prototypes I, II, III et IV de capteur solaire PV/T à air.

Chacun de ces capteurs est vitré et a une longueur de 9 m et une largeur de 1 m. L'épaisseur de la lame d'air a été choisie en fonction d'un critère d'optimisation pour divers débits massiques, à savoir:  $(h/L)_{\text{optimisation}} = 2.5 \cdot 10^{-3}$  Avec ici,  $h$  la hauteur de la lame d'air et  $L$  la longueur du canal traverse par le flux turbulent d'air. Le panneau PV est composé de 20 modules constitués chacun de 36 cellules PV en silicium cristallin montées en série. Il couvre 62.8 % de la surface de l'absorbeur qui est de 9 m<sup>2</sup>. La tension nominale aux bornes d'un module PV est 16.5 V, soit une puissance nominale de 50 W. Le modèle stationnaire réalisé pour chacun de ces composants est unidirectionnel. Hegazy souligne que les performances d'un capteur solaire PVT hybride à air dépendent de la température maximale d'air en sortie, des rendements thermiques et électriques, et de l'énergie électrique nette disponible après soustraction

de l'énergie nécessaire au fonctionnement du ventilateur et des autres appareils alimentés. La simulation réalisée pour une journée ensoleillée a montré que l'accroissement du débit massique de ventilation améliore, le rendement thermique. Le prototype I Fig. I.27 a le plus faible rendement global alors que le prototype III semble donner les meilleures performances pour un fort ensoleillement. Les résultats obtenus ont montré de plus, que pour de faibles débits massiques de ventilation, l'utilisation d'un absorbeur sélectif est inappropriée pour ce type de capteur solaire car elle réduit la production d'énergie électrique.

EN 2005, Tiwari et al [19] présentent l'étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PVT à air ventilé naturellement ou mécaniquement. Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV de  $0.61 \text{ m}^2$  de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. Ce composant a été intégré à un banc d'essais en acier inclinable et monté à New Delhi, en Inde Fig. I.28. 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 PVT à air d'environ 18 %.

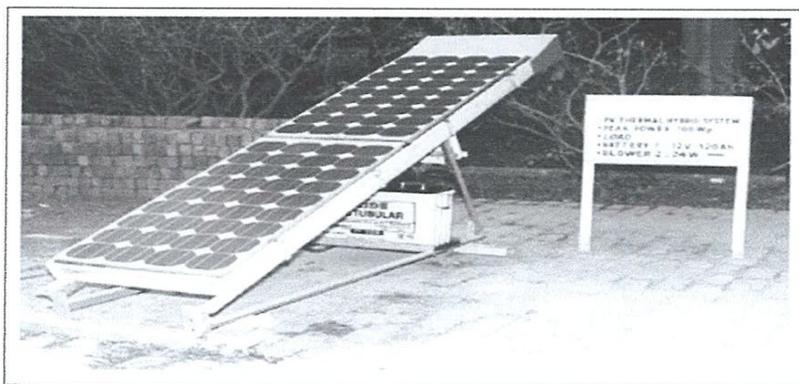


Fig. I.28 : Banc d'essai du capteur solaire PV/T hybride a air.

EN 2007, Tiwari et Sodha [11] proposent l'étude paramétrique comparative de quatre types de capteurs solaires à air. Ces systèmes se différencient par la présence ou non d'un vitrage et d'un support en Tedlar. Les modèles thermiques

réalisés ont été validés expérimentalement sur le banc d'essais monte a New Delhi. Les résultats obtenus ont montre que le composant à air vitré sans Tedlar est le plus performant et présente l'accroissement de rendement global (thermique et électrique) le plus élevé. Ce système vitré peut être utilisé pour diverses applications telles que le chauffage des locaux et l'éclairage. Les capteurs solaires à air non vitrés avec et sans Tedlar donnent des températures des cellules PV équivalentes. Enfin, le constat est fait que pour une longueur de capteur solaire donnée. La connexion en série de modules PV de plus petite surface permet une nette amélioration du rendement global du capteur solaire.

EN 2007, Othman et al [20] mènent l'étude théorique et expérimentale des productivités thermique et électrique d'un capteur solaire PVT hybride à air à double circulation d'air. Le composant est constitué de deux lames dans lesquelles l'air circule successivement. La première lame d'une hauteur de 16.5 cm est comprise entre une couche de verre en face avant et les modules PV. La seconde lame d'air dont l'épaisseur est comprise entre 30 et 120 cm, se situe en sous-face des modules PV. La face arrière des modules est munie d'ailettes verticales n'étant pas en contact avec la plaque arrière du capteur solaire. Ces ailettes permettent d'accroître les transferts thermiques convectifs entre l'air et les modules PV Fig. I.29. La surface totale couverte par les cellules PV en silicium mono-cristallin est de 0.38 m<sup>2</sup>.

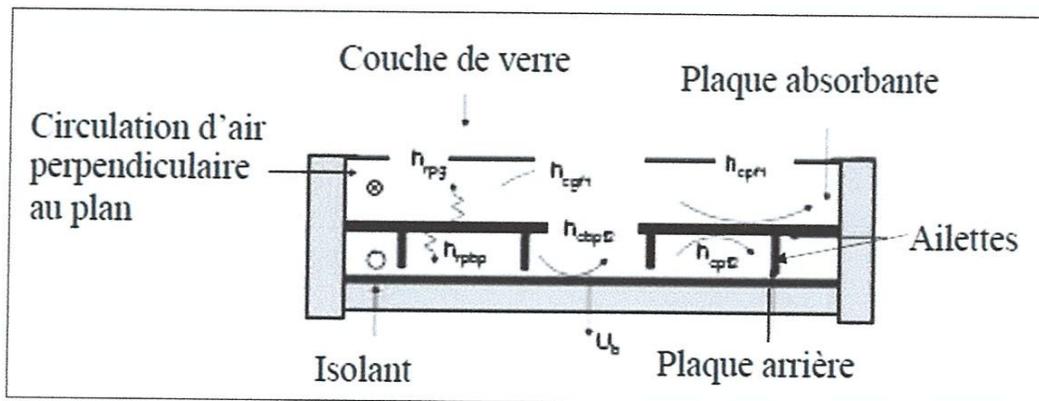


Fig. I.29 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride a air a ailettes.

Othman et al développent un modèle thermique uni-directionnel en régime permanent de ce composant hybride. La confrontation des données de la simulation réalisée par la suite avec les résultats d'une étude expérimentale a permis de noter que l'emploi

des ailettes permet d'améliorer à la fois le rendement thermique et les performances électriques du composant hybride.

**Conclusion :**

Le monde de la conversion photovoltaïque, aussi bien au niveau de la recherche qu'au niveau, industriel, connaît depuis quelques années une mutation profonde associée à l'intérêt croissant pour l'énergie photovoltaïque. Ce chapitre servira de base théorique pour la suite de notre thèse. Il nous a permis d'aborder le principe de la conversion d'une cellule photovoltaïque, ainsi qu'il nous a permis de connaître l'influence de l'augmentation de la température sur le rendement du module PV. A fin d'éliminer l'influence de cet effet on doit utiliser un système de refroidissement, comme un échangeur thermique dans lequel circule un fluide caloporteur posé sous le module PV. Dans le deuxième chapitre nous aborderons un modèle physique utilisé pour modéliser un capteur hybride PVT à air.

---

# Chapitre II

---

**II-1 Introduction :**

Le capteur hybride PVT permet d'optimiser l'utilisation de l'énergie solaire en disposant à la fois d'une source d'énergie électriques et une circulation d'un fluide caloporteur. À partir d'une modélisation on peut prévoir les caractéristiques du fonctionnement du capteur en fonction des facteurs extérieurs variables tel que la température de l'environnement et la quantité de rayonnement solaire reçue par la surface du capteur. Ce chapitre est destiné pour détailler un modèle mathématique à partir duquel on peut simuler le flux de chaleur dans les différentes couches constituant le capteur étudié. Dans la première partie on va présenter le capteur étudié puis on va poser des hypothèses simplificatrices qui nous servent de simplifier les équations fondamentales constituant le modèle. Dans la deuxième partie on va mettre ces équations sous forme d'un algorithme qu'on va programmer dans l'environnement de **MATLAB**. Après l'exécution du programme, on obtient les résultats du modèle qu'on a fait. Pour la validation on va comparer ces résultats obtenues avec celles expérimentales et /ou numériques publiées dans des publications internationales.

**II-2 Présentation du capteur étudié :**

La plus grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules solaires n'est pas convertie en électricité et accroît leur température, entraînant ainsi une baisse de leur rendement électrique. Les capteurs solaires PVT hybrides sont des systèmes utilisant des panneaux PV comme absorbeur thermique. Par récupération d'une partie de la chaleur dissipée par les panneaux PV à l'aide d'un fluide caloporteur (l'air pour notre capteur) **Fig. II-1**. Les capteurs solaires hybrides permettent la production simultanée d'énergies thermique et électrique. La production de ces énergies dépend des plusieurs paramètres d'entrée et sortie : le rayonnement solaire, la vitesse du vent, la température ambiante et de fluide caloporteur.

Le capteur hybride PVT à air est souvent se compose de :

- ✓ Vitrage : destiné à protéger les cellules PV.
- ✓ Panneau solaire : son rôle est de transformer le rayonnement solaire en l'électricité.
- ✓ Ailettes : servent d'améliorer le transfert thermique entre le panneau solaire et le fluide caloporteur (l'air).

- ✓ Fluide caloporteur : son rôle d'évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante.
- ✓ L'isolant : pour minimiser les pertes thermiques.

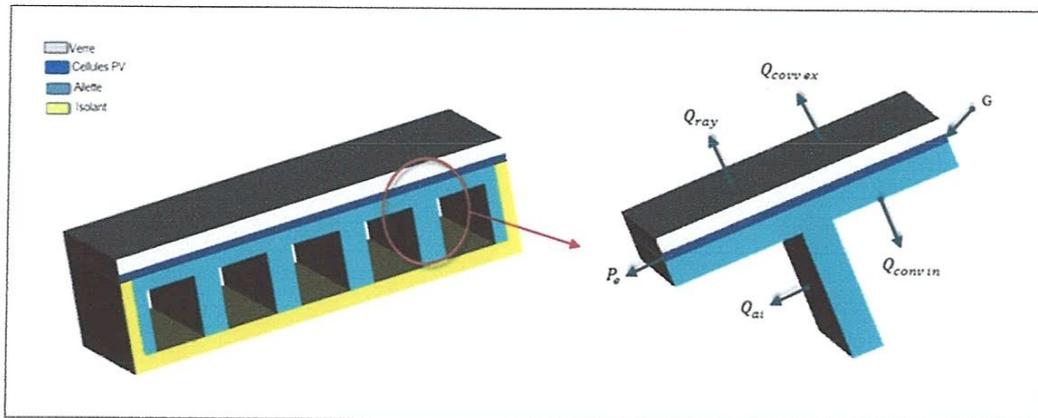


Fig. II-1 : Conception de capteur étudié.

### II-3. Modèle thermique :

Les modèles théoriques servent à calculer (prédire) la production thermique des capteurs hybrides, ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride. Mais pour simplifier ce modèle on doit prendre en considération des hypothèses simplificatrices. Une fois ce modèle fini, les résultats du calcul seront comparés à des valeurs expérimentales (soient réalisées par soit même, ou bien prises à partir des publications internationales par d'autres auteurs)

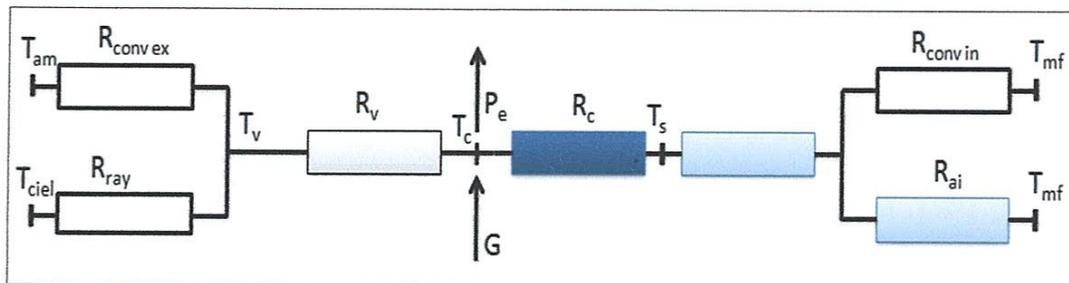
### II-4 Hypothèses Simplificatrices Proposées :

1. Le transfert de chaleur par conduction à travers le vitrage, le silicium ainsi que la plaque absorbante est monodimensionnel. C'est-à-dire que la chaleur diffuse uniquement dans le sens transversal. Cette hypothèse est justifiée par l'étude de ZONDAG en 2000, il a trouvé que la différence entre l'efficacité du modèle 1D et celle du modèle 3D voisine 3% [21].
2. Le régime est permanent ( $\partial T/\partial t=0$ ). C'est-à-dire qu'on va considérer que les performances du capteur dépendent de la température moyenne de la journée prélevée du fichier météo.
3. Les propriétés physiques des matériaux sont supposées constantes
4. La température ambiante pré du capteur est uniforme.

5. La vitesse du fluide est uniforme.
6. Les pertes par rayonnements au fond et aux surfaces latérales de l'isolant sont supposées négligeables.
7. Le verre qui couvre les cellules est net de toute poussière ou sable.
8. L'écoulement à l'intérieur du canal est laminaire totalement établi thermodynamique et hydrodynamique.
9. La convection dans le canal est forcée.
10. Pas de terme source.
11. La face en bas du canal est adiabatique.
12. Le matériau de l'ailette est l'alliage d'aluminium.
13. L'épaisseur d'une ailette est  $\delta_{ail}$ , alors que les épaisseurs des deux côtés du canal (formé aussi par le même matériau que l'ailette) sont égale à  $\delta_{ail}/2$ .
14. Le canal de refroidissement est soumis sur la face du haut à un flux de chaleur constant  $Q_0''$ .
15. Chaque ailette dégage une quantité de chaleur vers l'air sur ses deux faces.
16. Les propriétés thermophysiques pour l'air sont calculés à partir de  $T_{fitm} = (T_{moy\ air} + T_s)/2$ .

### II-5 Bilans énergétique :

Pour construire le modèle mathématique, la méthode des bilans énergétiques pour chaque composant a été utilisée. En évaluant les gains et les pertes, ces bilans traduisent le principe de conservation de l'énergie appliqué à chaque élément du capteur à étudier Fig. II-2.



**Fig. II-2:** Analogie électrique pour le capteur hybride PVT à étudier

Le bilan énergétique pour le système à l'équilibre est :

$$G = P_e + Q_{conv ex} + Q_{ray} + Q_{conv in} + Q_{ai} \quad (1)$$

La puissance électrique délivrée par le capteur est donnée par :

$$P_e = \eta * G \quad (2)$$

Tel que :

$$\eta = 0.127(1 - 0.0063(T_c - 25)) \quad (3)$$

D'après la relation(3), on peut estimer le rendement d'un capteur PV en fonction de température de cellules PV cette relation est proposée par Triponostopoulos en 2006 [22].

La température de cellules PV, est donnée par la relation suivante :

$$T_c = \frac{Q_0'' \cdot \delta_{ai}}{\lambda_{ai}} + T_s \quad (4)$$

Tel que :

$Q_0''$  : Le flux de chaleur traversant les cellules PV.

$\delta_{ai}$  : L'épaisseur de la plaque d'aluminium.

$\lambda_{ai}$  : La conductivité thermique de la plaque d'aluminium.

$T_s$  : La température de la plaque d'aluminium.

Les pertes thermiques par rayonnement entre la face supérieur du capteur (verre) et le ciel sont exprimées comme suit:

$$Q_{ray}'' = \varepsilon \cdot \sigma (T_v^4 - T_{ciel}^4) \quad (5)$$

Avec la température du ciel est calculée par l'équation de Swinbank [23].

$$T_{ciel} = 0.552(T_a + 273.15)^{1.5} \quad (6)$$

Et la température du verre est donnée par :

$$T_v = \frac{Q_v'' \cdot \delta_v}{\lambda_v} + T_c \quad (7)$$

Tel que :

$Q_v''$  = Le flux de chaleur quittant le verre vers l'extérieur.

$\delta_v$  = L'épaisseur du verre.

$\lambda_v$  = Conductivité du verre.

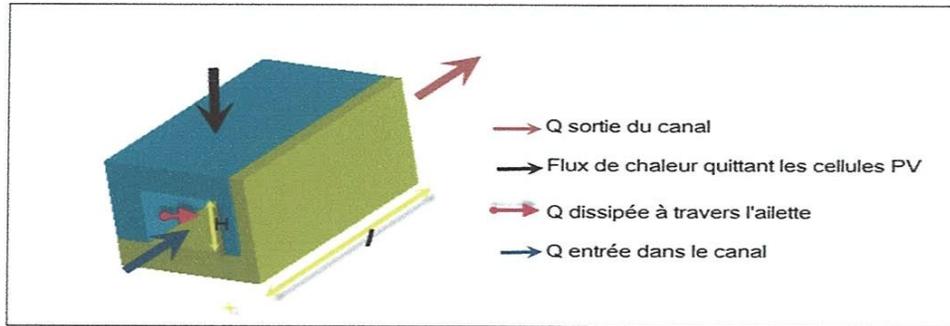
Les pertes thermiques par convection entre le verre du capteur et le milieu extérieur sont comme suit:

$$Q_{conv\ ex}'' = h_{ex}(T_v - T_{am}) \quad (8)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection entre la surface du verre et l'air ambiant  $h_{ex}$  calculé par la relation de Hottel et Woertz [24]:

$$h_{ex} = 2.8 + 3V_{vent} ; 0 < V_{vent} < 10m/s \quad (9)$$

Considérons le canal schématisé dans la Fig. II-3, et aussi le transfert de chaleur considéré, et en tenant compte de la symétrie du système et faisant le bilan thermique à l'intérieur du canal on peut déterminer l'expression du  $T_s$  et  $T_m$ .



**Fig. II-3 :** Bilan énergétique sur un élément de volume ( $H.\delta x.l$ )

La longueur du canal est égale à celle du capteur photovoltaïque (PV), ainsi que sa largeur  $l$ , donc on a  $L_{\text{canal}}=L_{\text{pv}}$ ,  $l_{\text{canal}}=l_{\text{pv}}$ .

Le bilan thermique à l'intérieur du canal est :

$$Q_{\text{haut}} + Q_{\text{entrée}} - Q_{\text{sortie}} + Q_{\text{ai}} = 0 \quad (10)$$

Tel que :

$$Q_{\text{haut}} = Q_0'' \cdot (l \cdot \delta x) \quad (11)$$

Et

$$Q_{\text{entrée}} = (H_{\text{ca}} \cdot l \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \cdot T_m \quad (12)$$

Et aussi

$$Q_{\text{sortie}} = (H_{\text{ca}} \cdot l \cdot V_{\text{moy}} \cdot \rho \cdot c) \left( T_m + \frac{dT_m}{dx} \cdot \delta x \right) \quad (13)$$

Pour  $Q_{\text{ai}}$  : considérons une ailette de section constante (épaisseur  $\delta_{\text{ail}}$  et hauteur  $H$ ) Fig. II-4  $T_s$  et baignant dans l'air caloporteur de température  $T_m$ .

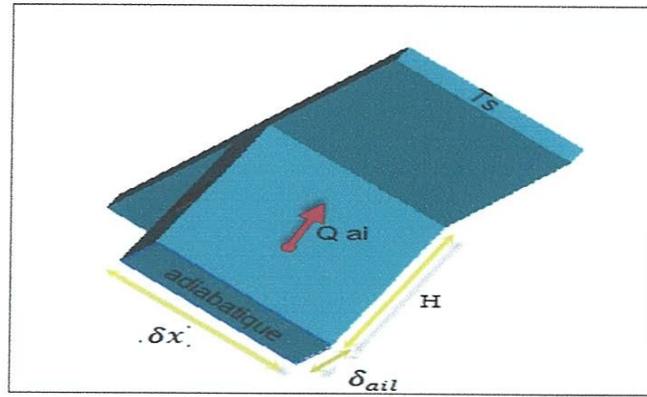


Fig. II-4 : Ailette considérée

La quantité de chaleur dissipée par l'ailette est donnée par l'expression suivante [25]:

$$Q_{ai} = M \cdot \tanh(m \cdot H_c) \quad (14)$$

Tel que :

$$M = \sqrt{h_{in} \cdot P \cdot \lambda_{ai} \cdot A_s} \cdot [T_s(x) - T_m(x)] \quad (15)$$

Et

$$m^2 = \frac{h_{in} \cdot P}{\lambda_{ai} \cdot A_s} \quad (16)$$

Avec :

$T_s(x)$  : Température de la surface de la plaque formant la partie haut du canal.

$T_m(x)$  : Température moyenne de l'air traversant le canal à une distance  $x$  à partir de l'entrée du canal.

$\lambda_{ai}$  : Conductivité thermique du matériau de l'ailette ( $\text{w} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{k}^{-1}$ ).

$h_2$  : Coefficient de transfert de chaleur par convection à l'intérieur du canal.

$P$  : Périmètre de l'ailette (m) calculé par :

$$P = 2(\delta_{ai} + \delta_x) \quad (17)$$

$A_s$  : Surface de la section droite d'une ailette ( $\text{m}^2$ ) calculée par :

$$T_m(x) = Q_0'' \left( \frac{1}{H_c \cdot V_m \cdot \rho \cdot c} + \frac{2}{l \cdot V_m \cdot \rho \cdot c} \cdot \frac{\tanh(mH_{ca})}{mH_{ca}} \right) x + T_{am} \quad (30)$$

Cas d'un canal muni de N ailette.

Dans ce cas l'équation (30) est modifiée en tenant compte de la présence de N ailettes formant un ensemble de N canaux en parallèle.

$$\eta_0 = 1 - N \frac{A_{ai+ba}}{A_{ai}} (1 - \eta_{ai}) \quad (31)$$

$A_{(ai+ba)}$  : Surface totale d'ailette + la surface de la base, comme la base ne participe pas au transfert de chaleur on a donc  $A_{ai+ba} = A_{ai}$

L'équation(30) devient :

$$\eta_0 = 1 - N(1 - \eta_{ai}) = 1 - N \left( 1 - \frac{\tanh(mh_{in})}{mh_{in}} \right) \quad (32)$$

Donc l'équation (29) s'écrit pour N ailettes comme suit :

$$T_m(x) = Q_0'' \left( \frac{1}{H_c \cdot V_m \cdot \rho \cdot c} + \frac{2}{l \cdot V_m \cdot \rho \cdot c} \cdot \left[ 1 - N \left( 1 - \frac{\tanh(m \cdot h_{in})}{m \cdot h_{in}} \right) \right] \right) x + T_{am} \quad (33)$$

En revenant à l'équation (28) nous avons :

$$T_s(x) = T_m(x) + \frac{Q_0''}{h_{in}} \quad (34)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par convection  $h_{in}$  est déterminé en tenant compte l'hypothèse 8, et en connaissant la valeur de nombre Nusselt.

$$h_{in} = \frac{Nu_{Dh}}{D_h} \cdot \lambda_f \quad (35)$$

Tel que :

$Nu_{Dh}$  : nombre de Nusselt pour un écoulement laminaire établi dans un canal de section droite rectangulaire.

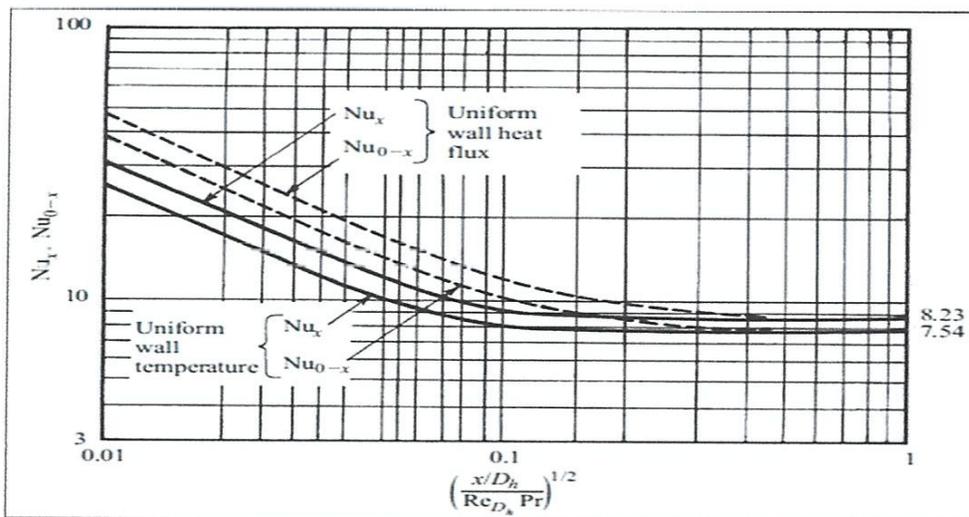
$\lambda_f$  : Conductivité thermique de l'air (à la température du film).

En mettant l'équation (35) dans celle (34) l'expression de  $T_s(x)$  devient :

$$T_s(x) = T_m(x) + \frac{Q_0''}{Nu_{Dh} \cdot \lambda_f} D_h \quad (36)$$

**Détermination de l'hauteur optimale du canal :**

**méthode de Bejan :**



**Fig. II-5 :** Transfert de chaleur dans la région d'entrée d'un écoulement de Hagen-Poiseuille dans un canal formé de deux plaques parallèles.

En considérant la valeur de  $x$  distance à partir de l'entrée du canal de refroidissement, où les deux couches limites se rencontrent. Pour maximiser le transfert de chaleur il est préférable de choisir  $x=L_{ca}$  on a alors :

$$\sqrt{\left(\frac{L_c/D_h}{Re_{Dh} \cdot Pr}\right)} = 0.1$$

$$\rightarrow L_c = 0.01 * Re_{Dh} \cdot Pr \cdot D_h$$

Comme pour l'air  $P_r = 0.7$  on aura :

$$L_c = 0.007 * Re_{Dh} \cdot D_h$$

Supposant pour un canal rectangulaire  $Re_{Dh} = 2500$

$$D_h = L_c / 17.5 \quad (37)$$

*pourquoi on  
Calcule pas  
Re Dh ?*

$D_h$  est la dimension caractéristique de la géométrie considérée s'appelle le diamètre hydraulique est donné par la relation suivante :

$$D_h = 4 \frac{S}{P}$$

Tel que :

$S$  : La surface de la section du canal

$P$  : Le périmètre intérieur du canal

On peut exprimer le diamètre hydraulique en fonction de l'hauteur  $H$  du canal et sa largeur  $l$  comme suivant :

$$D_h = \frac{2}{\left(\frac{1}{l} + \frac{1}{H}\right)} \quad (38)$$

$$V_{moy} = \frac{Re \cdot \nu_{air}}{D_h} \quad (39)$$

Faisant l'égalité entre (36) et (37) on peut déduire  $H_{opt}$  :

$$H_{opt} = \left(\frac{35}{L_{ca}} - \frac{1}{l}\right)^{-1} \quad (40)$$

**Détermination de Nombre Nusselt :** [26]

Une fois on détermine le rapport :

*pourquoi on le calcule  
pas ?*

$$w = \frac{b}{H_c}$$

Tel que :

$b$  : Est la largeur du canal déterminé par la relation suivante :

$$b = \frac{l}{N} - (N - 1)\delta_{ai} \quad (41)$$

$H_c$  : est l'hauteur optimal du canal déterminé la méthode bejan.

On peut avoir le nombre de Nusselt par la relation suivante à condition  $w \leq 1$  :

$$Nu = -13.97w^5 + 42.37w^4 - 53.68w^3 + 40.17w^2 - 19.69w + 8.422 \quad (42)$$

**Formules pour calcul des propriétés thermophysiques de l'air :**

❖ Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>]:

$$\rho = 1.293 \left( \frac{273.15}{T} \right) \quad \text{avec : } T \text{ en [K]} \quad (43)$$

❖ Conductivité thermique [w/m.K] :

$$\lambda = 1.5207 * 10^{-11}T^3 - 4.857 * 10^{-8}T^2 + 1.0184 * 10^{-4}T - 3.9333 * 10^{-4} \quad (44)$$

❖ Viscosité dynamique [kg/m.s] :

$$\mu = 8.8848 * 10^{-15}T^3 - 3.2398 * 10^{-11}T^2 + 6.2657 * 10^{-8}T + 2.3543 * 10^{-6} \quad (45)$$

❖ Viscosité cinématique [m<sup>2</sup>/s] :

$$\vartheta = -1.363528 * 10^{-14}T^3 + 1.008 * 10^{-10}T^2 + 3.452139 * 10^{-8}T - 3.40074 * 10^{-4} \quad (46)$$

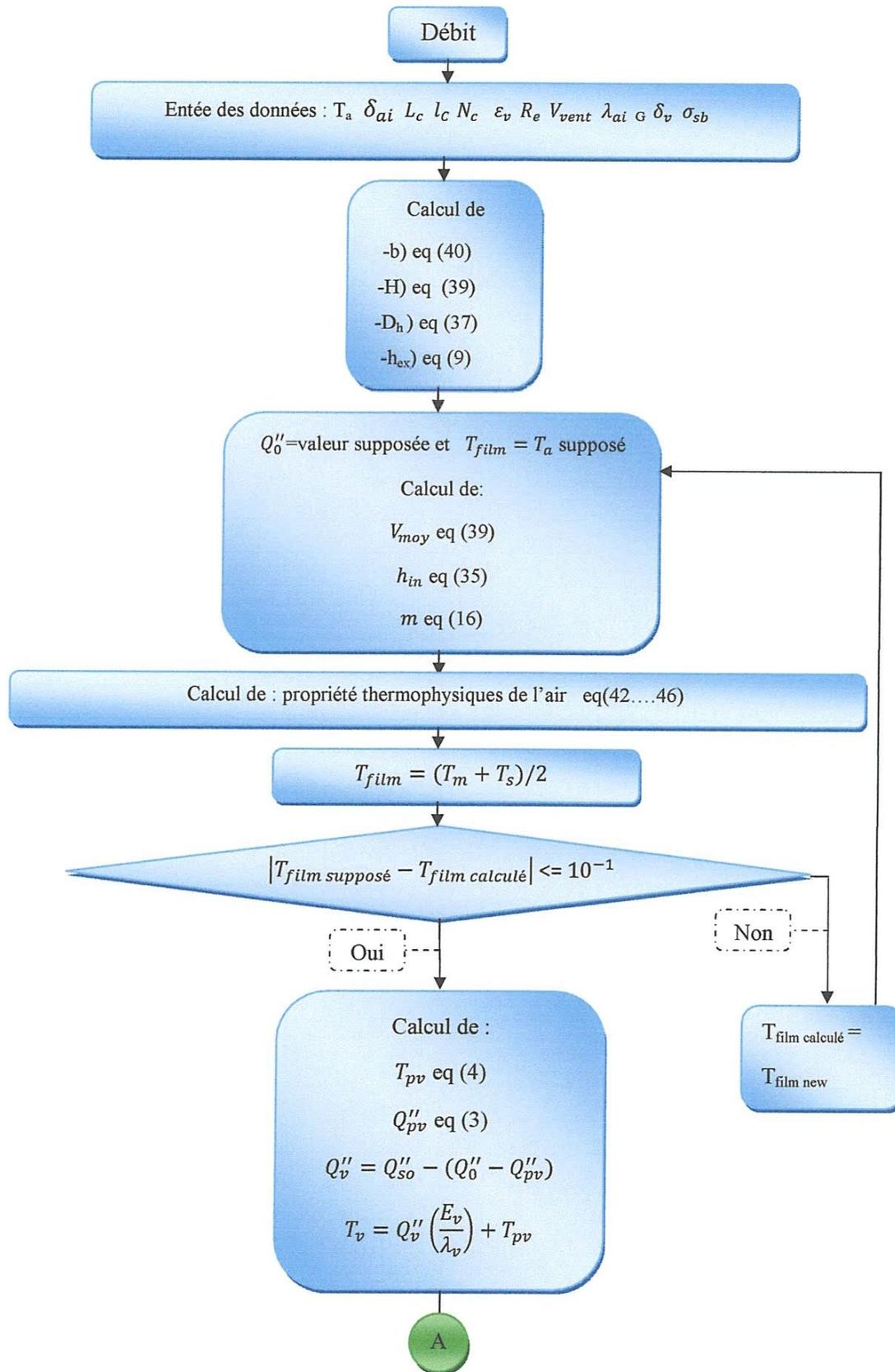
❖ Chaleur spécifique [J/kg.K] :

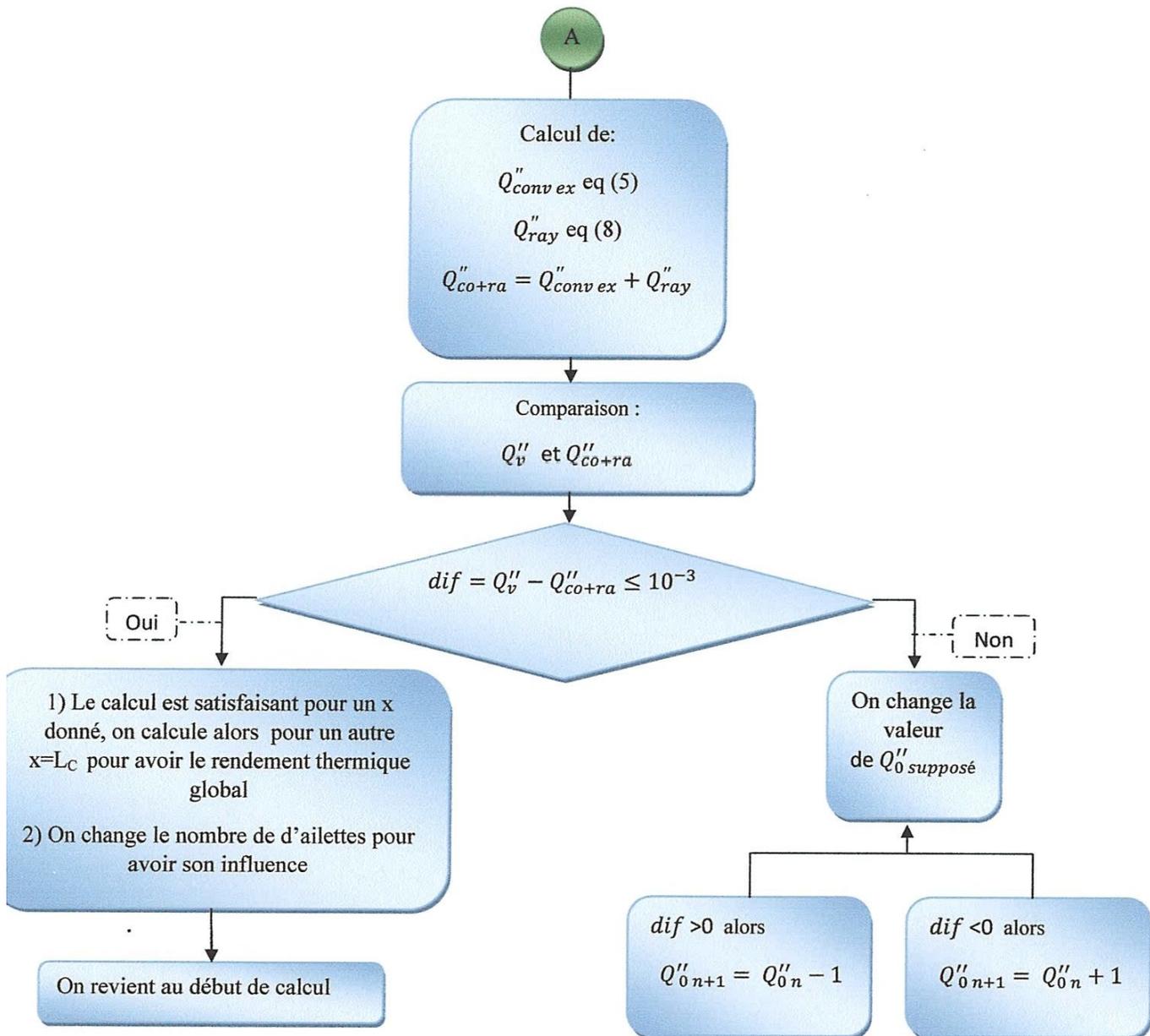
$$C_p = 1.9327 * 10^{-10}T^4 - 7.99 * 10^{-7}T^3 + 1.1407 * 10^{-3}T^2 - 0.448T + 1.05 * 10^3 \quad (47)$$

*Comment  
l'ont-elle obtenue  
ces relations ?*

*pourquoi un tel polynôme ?*

II-6 L'organigramme d'algorithme de calcul :





### Conclusion

Pour la raison du coût élevé de l'expérimentation (méthodes d'élaboration et techniques de fabrication). Les chercheurs prennent La modélisation comme un outil efficace pour étudier un système physique quelconque. Pour cela on a consacré ce chapitre juste pour faire un modèle analytique qui nous permet après avoir programmé, de simuler le fonctionnement le capteur hybride PVT ce qui nous permet aussi de connaître les paramètres intervenant dans le rendement de cellules PV. Dans le chapitre qui suit nous allons exposer et expliquer les résultats de la simulation.

---

# Chapitre III

---

### Aperçus sur le Chapitre III.

Dans ce chapitre, on présentera quelques résultats obtenus au cours des simulations. Il s'agira entre autres, des effets de la vitesse moyenne d'écoulement de l'air dans le (ou les) canal (canaux) de refroidissement, de l'épaisseur du matériau de l'ailette (qui a été choisi égal à celui de la plaque absorbante), du débit massique de l'air (kg/s) (qu'on considère pour deux cas d'étude à savoir un canal sans ailettes, et un autre avec 28 ailettes correspondant donc à 29 canaux de refroidissement), du flux solaire direct incident  $Q_{\text{solaire}}$ , de la température ambiante  $T_{\text{amb}}$ , de la différence entre la puissance thermique récupérée au niveau du canal et celle perdue par perte de charges linéaire dans ce canal et qui représente donc la puissance (W) nécessaire au fonctionnement du ventilateur. A la fin on présentera un effet très subtil et dont il est très difficile de l'anticiper a priori : il concerne l'effet du nombre d'ailettes (ou canaux de refroidissement). On peut imaginer qu'en ajoutant des ailettes au canal de refroidissement, les rendements thermique, électrique et global, respectivement, vont tous augmenter. On verra que ce n'est pas aussi évident que cela. D'ailleurs ce résultat assez surprenant n'a jamais été noté auparavant que ce soit dans les thèses, les rapports scientifiques, ou encore les publications internationales. Tous ces résultats ont été obtenus par un code de calcul qui a été développé au cours de ce travail de master, et écrit en Fortran 90.

#### III. 1. Effet de la Vitesse Moyenne d'Écoulement de l'Air

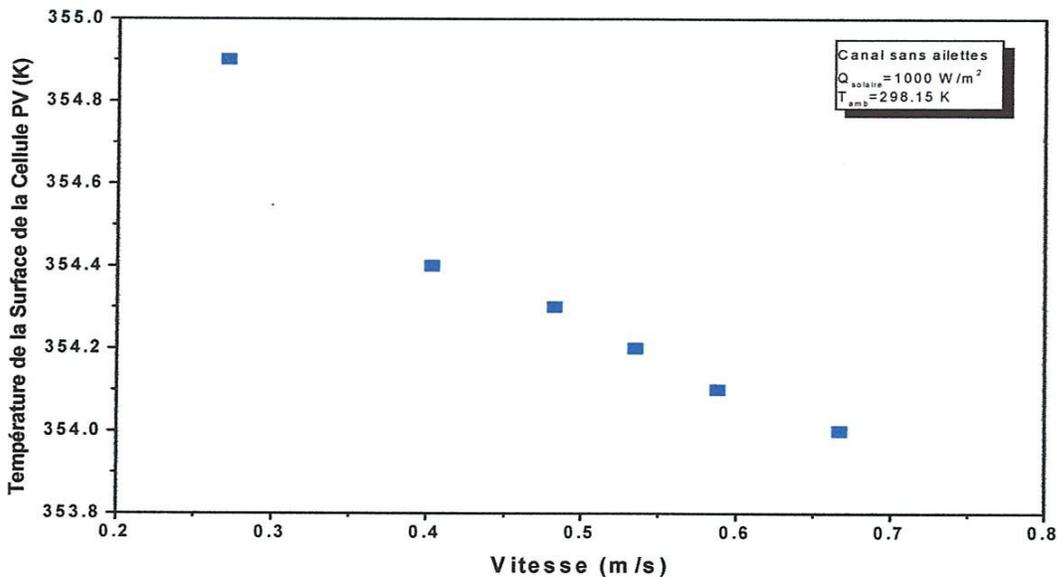


Fig. III-1. Effet de la Vitesse sur la Température de la Cellule Photovoltaïque (PV).

Sur la figure III-1, on remarque que la température de la cellule PV diminue avec l'augmentation de la vitesse moyenne d'écoulement de l'air. Cet effet est prévisible car le coefficient de transfert de chaleur par convection augmente avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement.

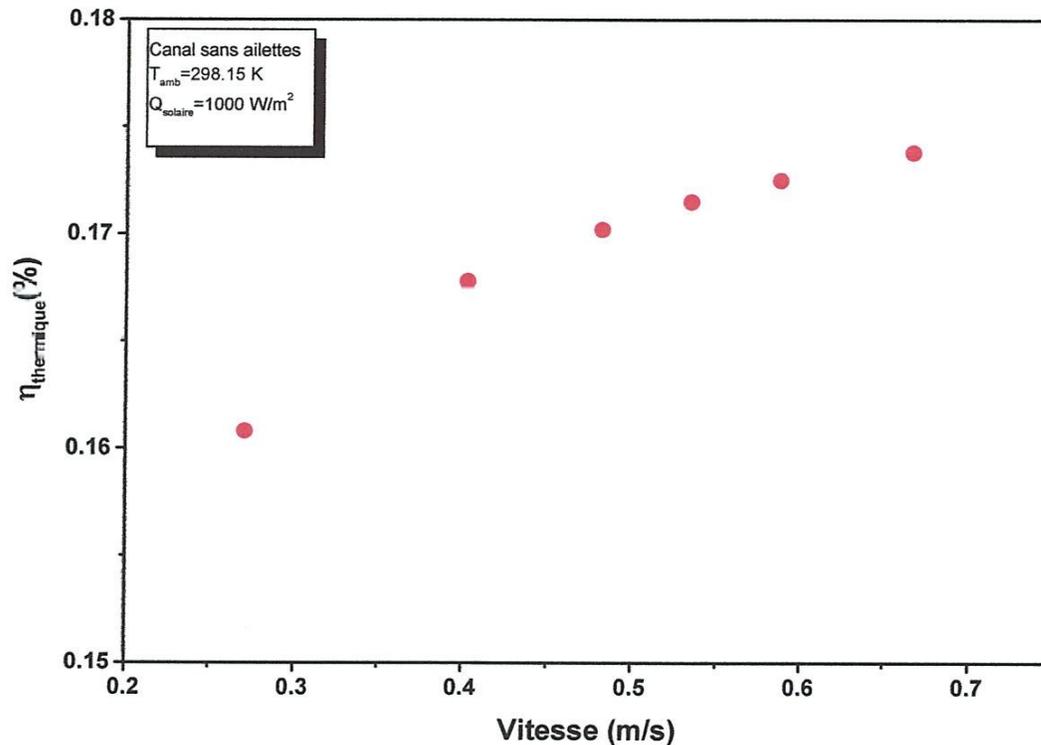


Fig. III-2. Effet de la Vitesse sur le Rendement Thermique.

Le rendement thermique augmente aussi car la chaleur servant au refroidissement de la cellule PV est récupérée par l'air, par conséquent, avec l'accroissement de la valeur de la vitesse de l'air, la quantité de chaleur récupérée augmente. Ceci est montré par la figure III-2.

Comme le rendement électrique est inversement proportionnel à la température de la cellule PV, toute diminution de cette température entraîne automatiquement une augmentation du rendement électrique. C'est ce qui est clairement établi par la figure III.3 ci-dessous.

Enfin, comme le rendement global d'un capteur hybride PVT à air est défini comme la somme des rendements thermique et électrique, il ressort donc que ce rendement est proportionnel à la vitesse d'écoulement de l'air dans le canal de refroidissement, puisque  $\eta_{thermique}$  et  $\eta_{thermique}$  sont proportionnels à  $V_{moy}$  de l'air. C'est ce que montre la figure III.4.

Il faudra noter que si l'augmentation de la vitesse apparaît comme un effet désirable pour les différents rendements du capteur hybride PVT à air, un effet indésirable resurgit aussi et est proportionnel au carré de la vitesse moyenne de l'air ; c'est les pertes de charges linéaires dans le canal (ceci en négligeant les pertes de charges singulière ou locale due à l'entrée du canal). L'équation des pertes de charges linéaires est donnée par Darcy-Weisbach comme :

$$\Delta P = f \cdot \frac{L_{canal}}{D_h} \cdot \rho_{air} \frac{V_{moy}^2}{2}$$

A priori, il apparaît clairement qu'une optimisation de la valeur de la vitesse assurant un grand rendement tout en minimisant les pertes électrique consommées par le ventilateur est nécessaire.

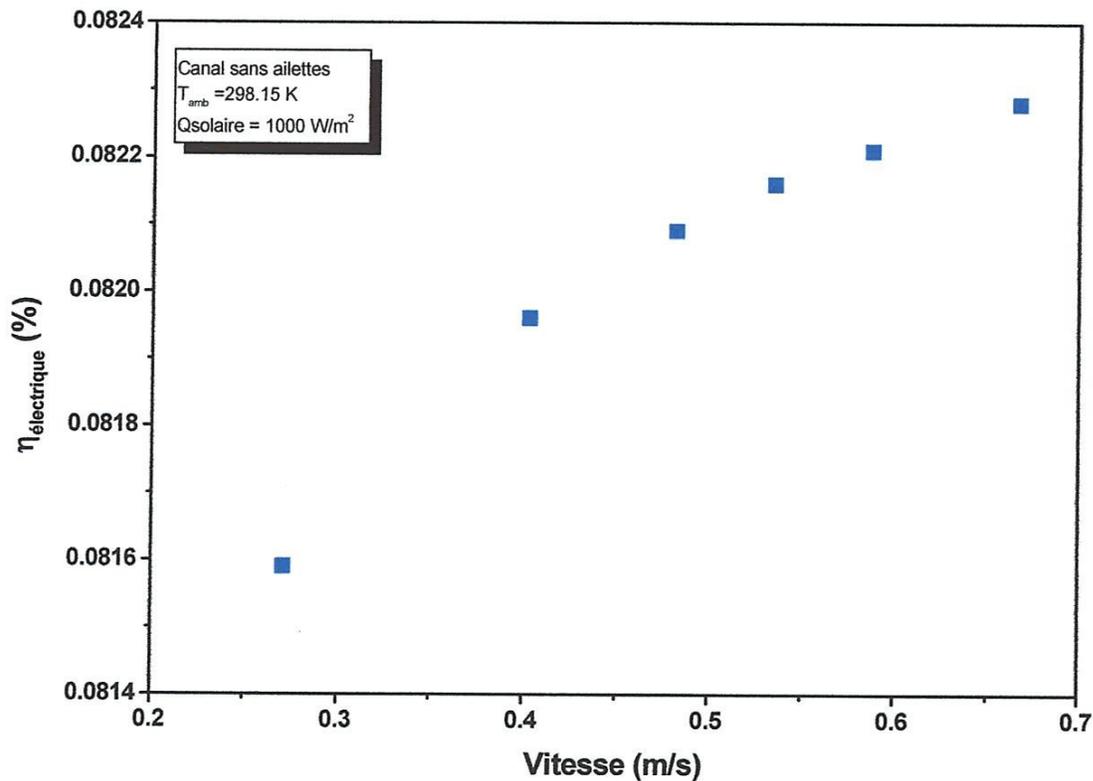


Fig. III-3. Effet de la Vitesse sur le Rendement Electrique.

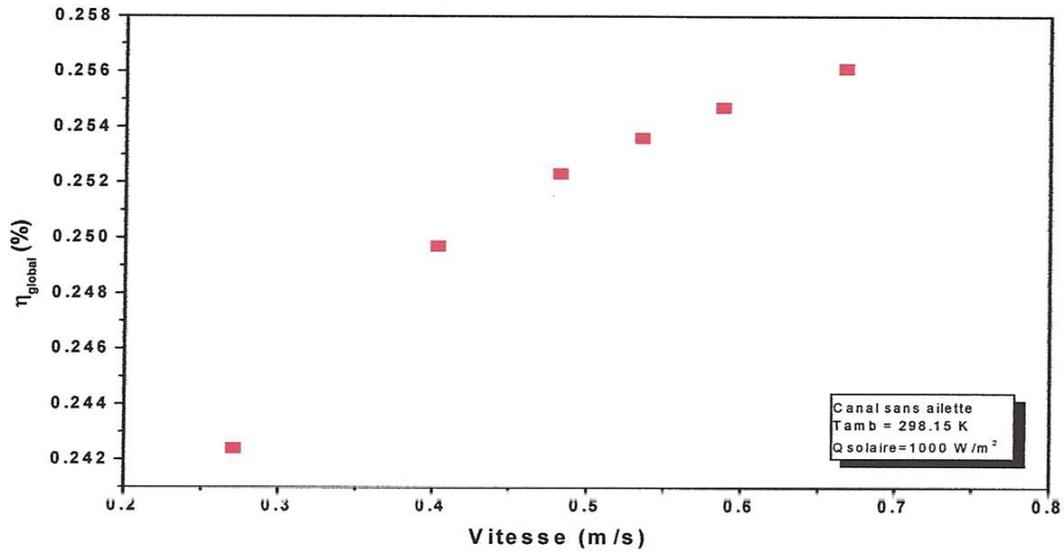


Fig. III-4. Effet de la Vitesse sur le Rendement Global.

III. 2. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette (en Alliage d'Aluminium)

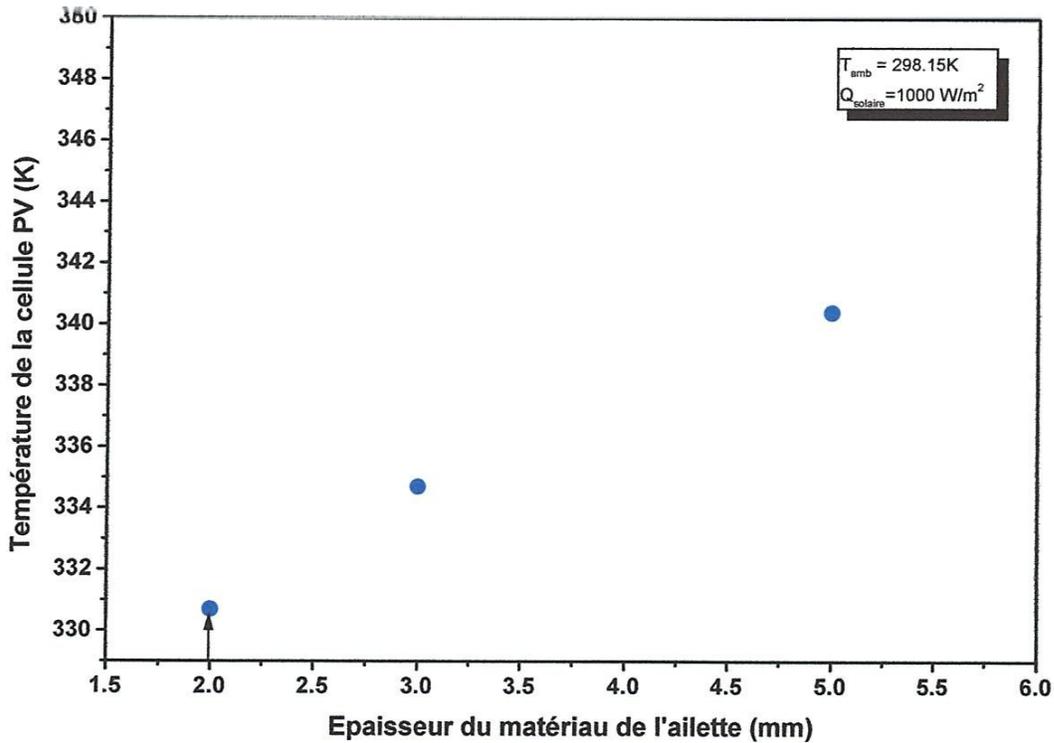


Fig. III-5. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette sur la Température de la Cellule Photovoltaïque (PV).

La présente étude sur le capteur hybride PVT à air montre qu'une épaisseur du matériau de l'ailette de 2 mm, permettra d'obtenir la plus faible valeur de la température de la cellule PV et par suite le plus haut rendement électrique. On remarquera en outre, qu'à partir d'une valeur de 2-mm, l'effet d'ailette devient primordial. En effet, la figure III-5 indique que si l'épaisseur est plus grande que 2-mm, la température de la cellule augmente, ce qui correspond à une diminution du transfert de chaleur par suite de la diminution de l'effet d'ailette (l'ailette est plus efficace si elle est plus fine).

Comme conséquence de l'effet d'ailette, si l'épaisseur de l'ailette augmente, la température de la cellule PV augmente et ce qui est prévisible le rendement électrique diminue. Par contre, la diminution du rendement thermique s'explique uniquement par rapport à l'effet ailette qui a tendance à diminuer et donc une dégradation du transfert de chaleur de la cellule vers le canal de refroidissement à lieu. Ces effets, sont montrés dans les figures III-5,6 et 7, respectivement.

Si on utilise donc un matériau de 2-mm d'épaisseur cela va nous permettre de diminuer la température de la cellule PV d'à-peu-près 7 °C comparativement au cas où on utilisera une ailette de 5-mm.

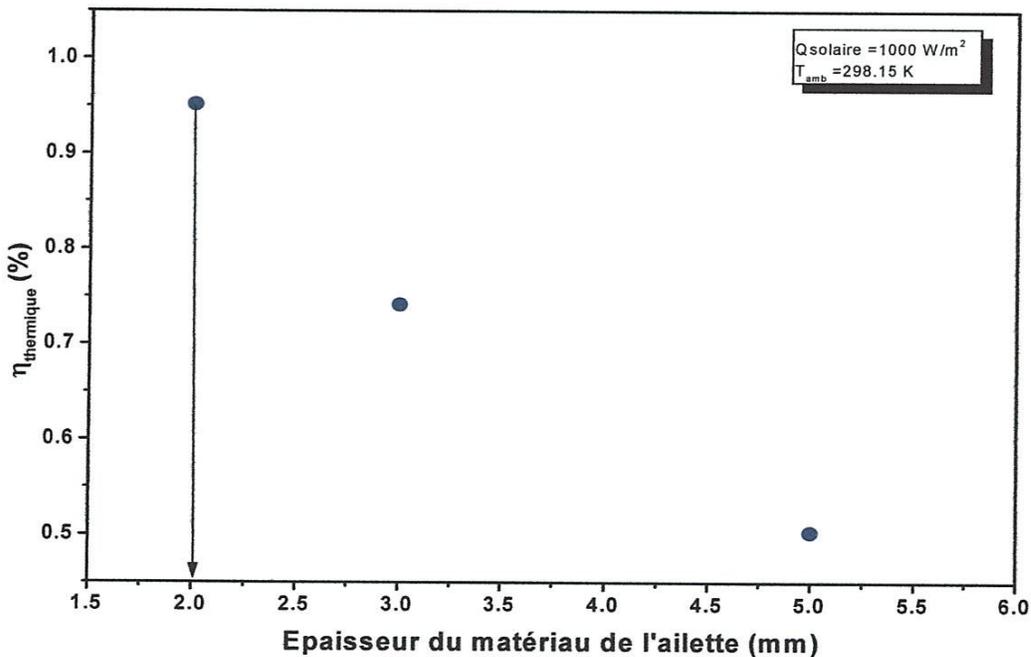


Fig. III-6. Effet de l'Épaisseur du Matériau de l'Ailette sur Le rendement Thermique (%).

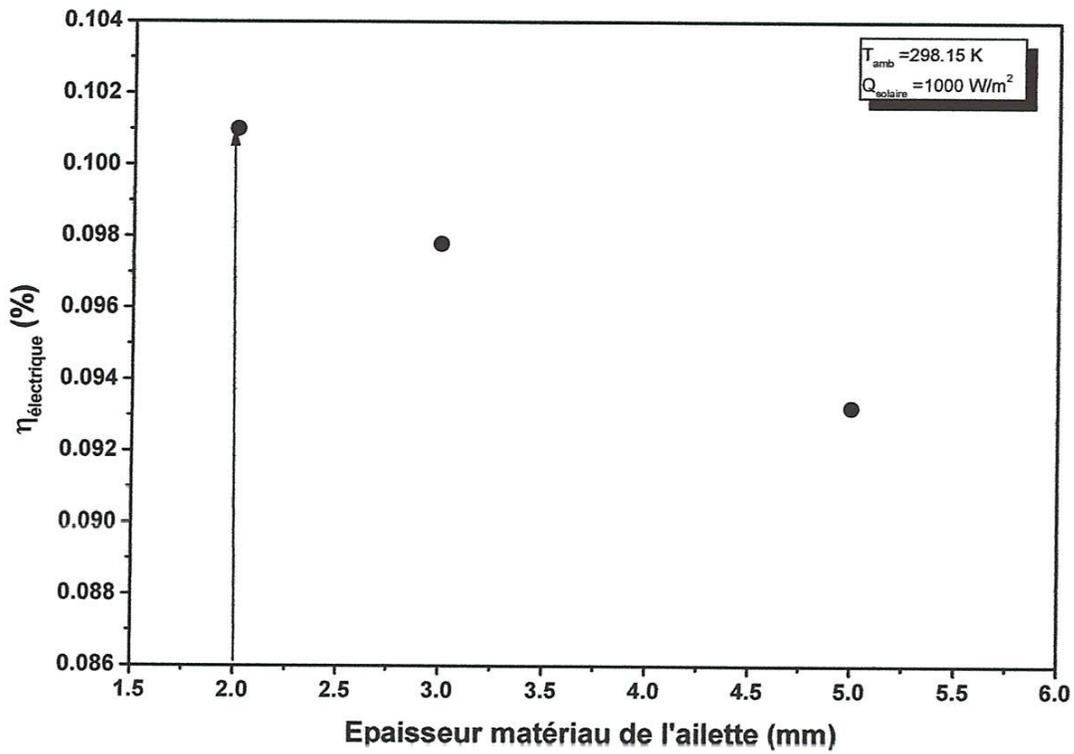
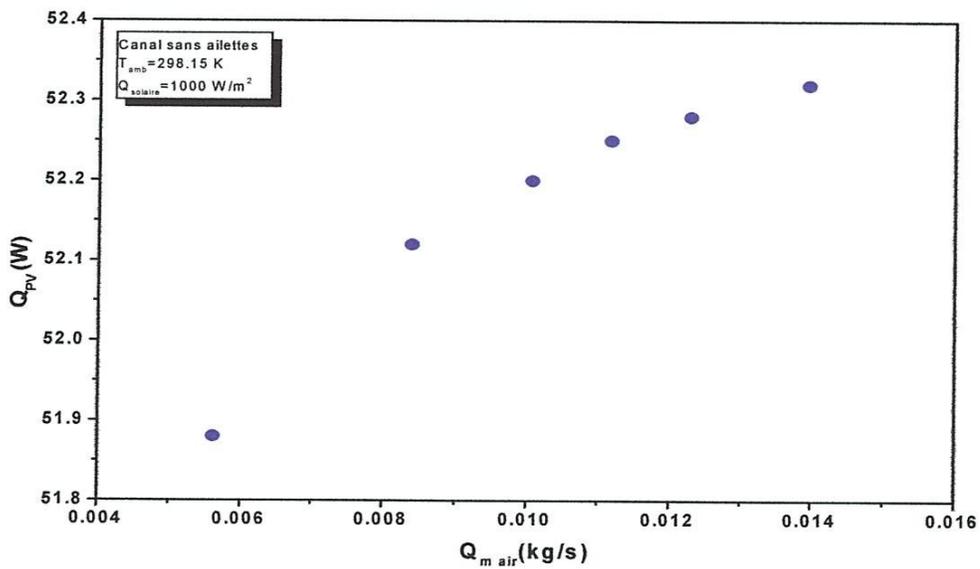
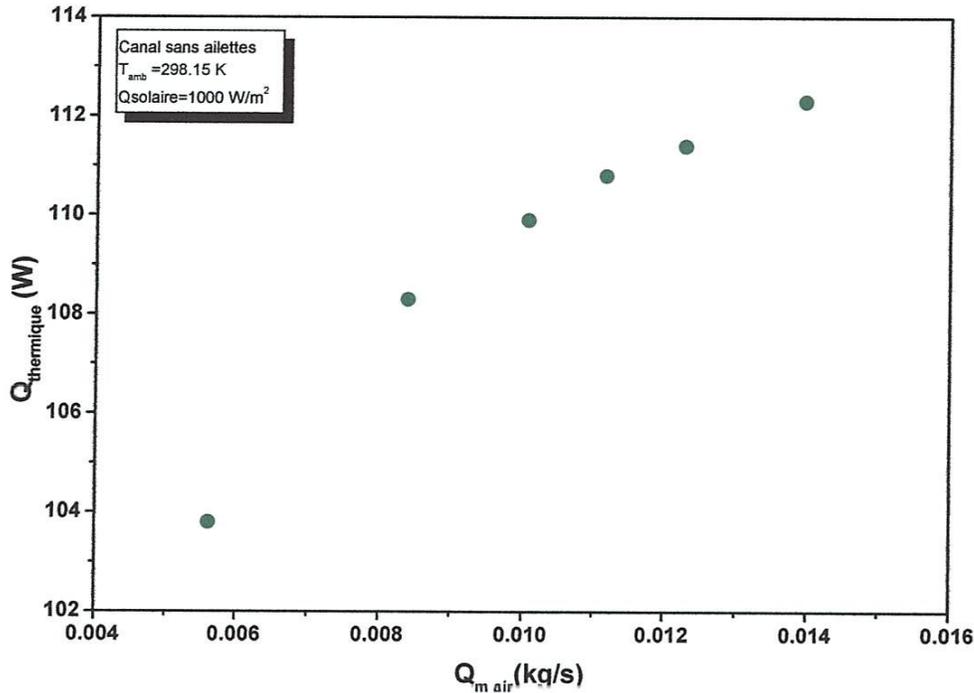


Fig. III-7. Effet de l'Epaisseur du Matériau de l'Ailette sur Le rendement Electrique (%).

### III. 3. Effet du Débit Massique de l'Écoulement de l'Air



**Fig. III-8.** Effet du Débit Massique sur la Puissance Electrique Produite par le Capteur Photovoltaïque PV.



**Fig. III-9.** Effet du Débit Massique sur la Puissance Thermique Récupérée par le Capteur Hybride PVT à Air.

Il apparait clairement des figure III-8 et 9, que si le débit massique augmente la puissance électrique ainsi que thermique que produit le capteur hybride augmentent aussi. Ces résultats correspondent au cas d'un canal de refroidissement qui n'est pas muni d'ailettes de refroidissement. Le cas d'un canal muni d'ailettes, est considéré par suite en traitant le cas d'un canal avec 29 canaux de refroidissement. On présente dans les figures III-10, 11,12 et 13, l'influence du débit massique sur la température de la cellule PV, le rendement thermique, électrique et global, respectivement. On remarquera que ces différents rendements sont proportionnels au débit massique de l'écoulement d'air dans les canaux de refroidissement.

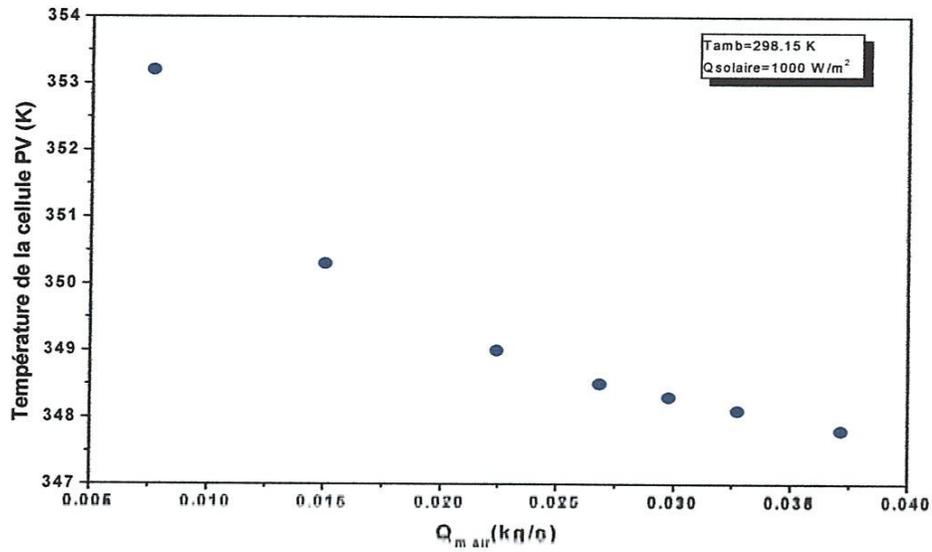


Fig. III-10. Effet du Débit Massique sur la Température de la Cellule PV.

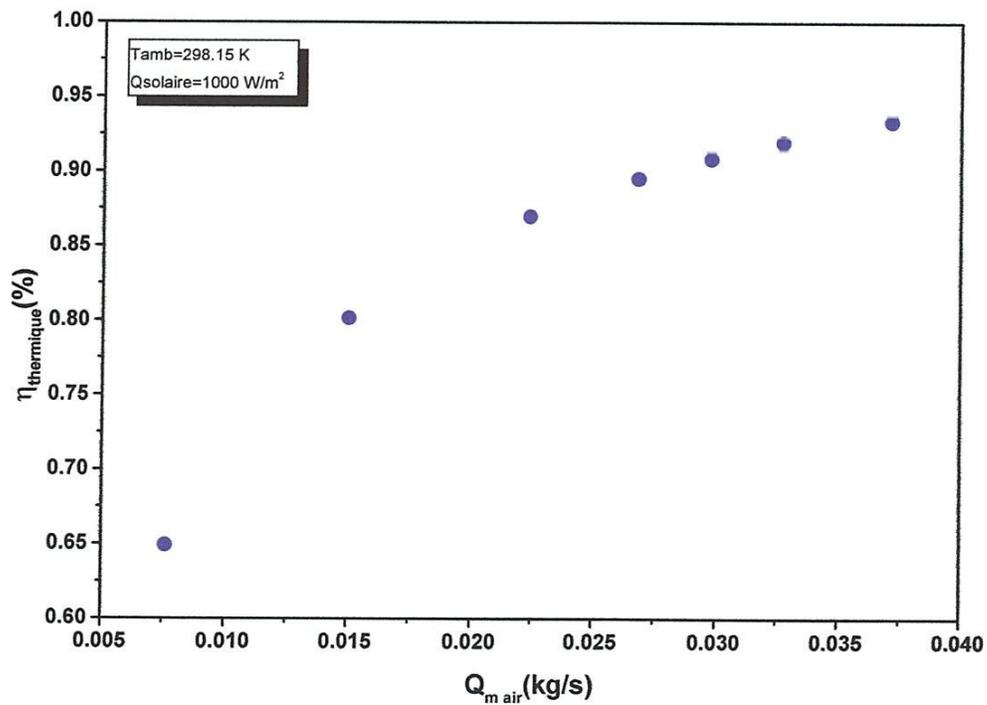


Fig. III-11. Effet du Débit Massique sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.

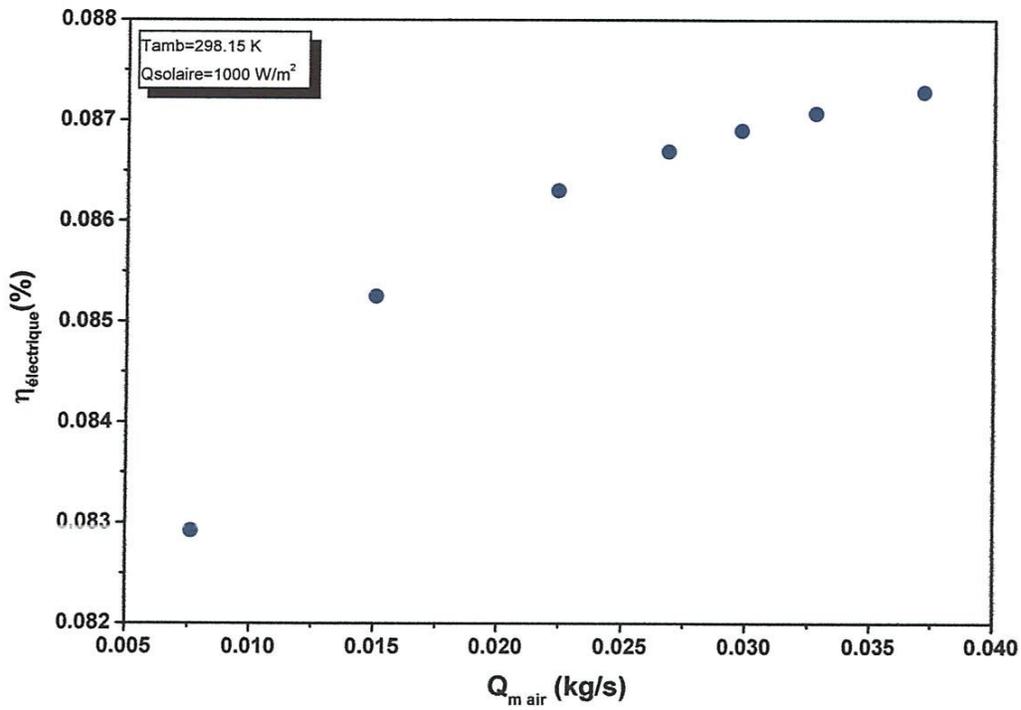


Fig. III-12. Effet du Débit Massique sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.

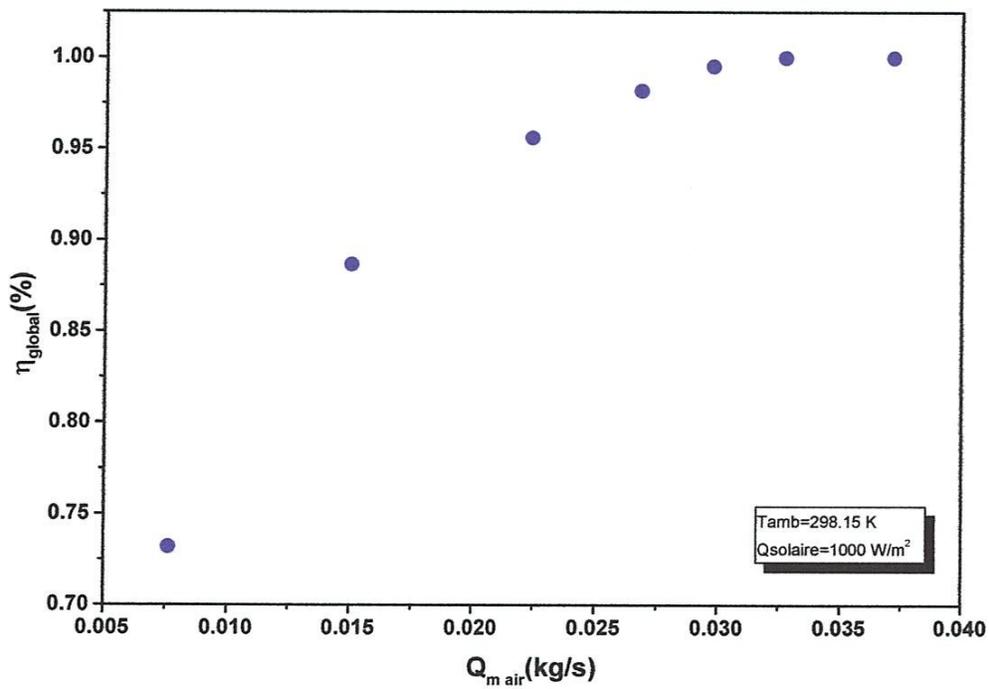


Fig. III-13. Effet du Débit Massique sur le Rendement Global du Capteur Hybride PVT à Air.

III. 4. Effet du Flux Solaire Direct Incident

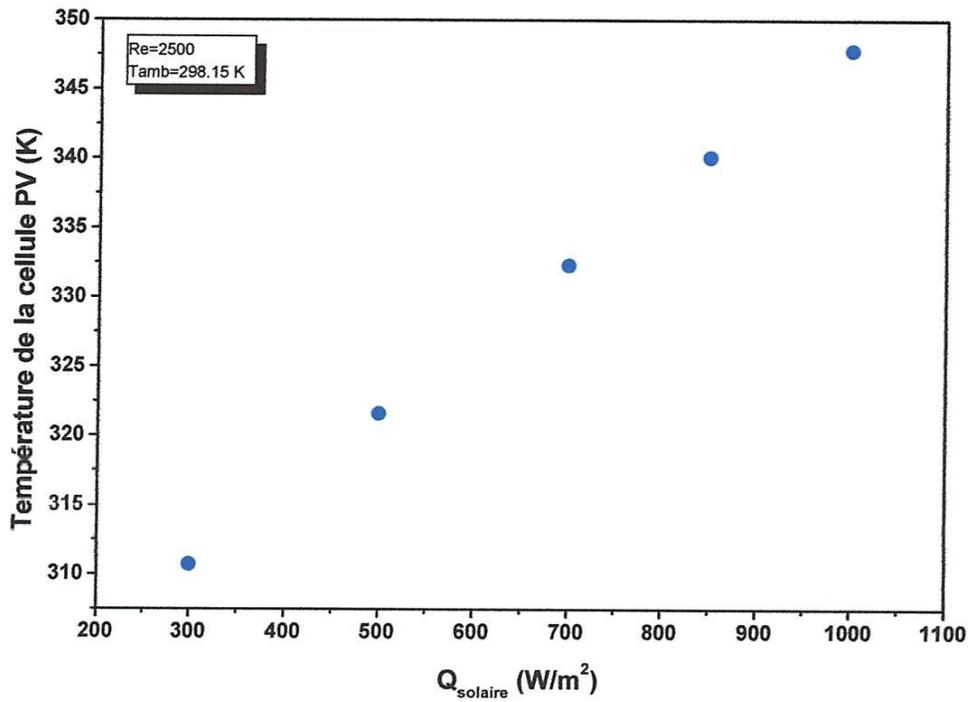


Fig. III-14. Effet du Flux Solaire sur la Température de la Cellule PV.

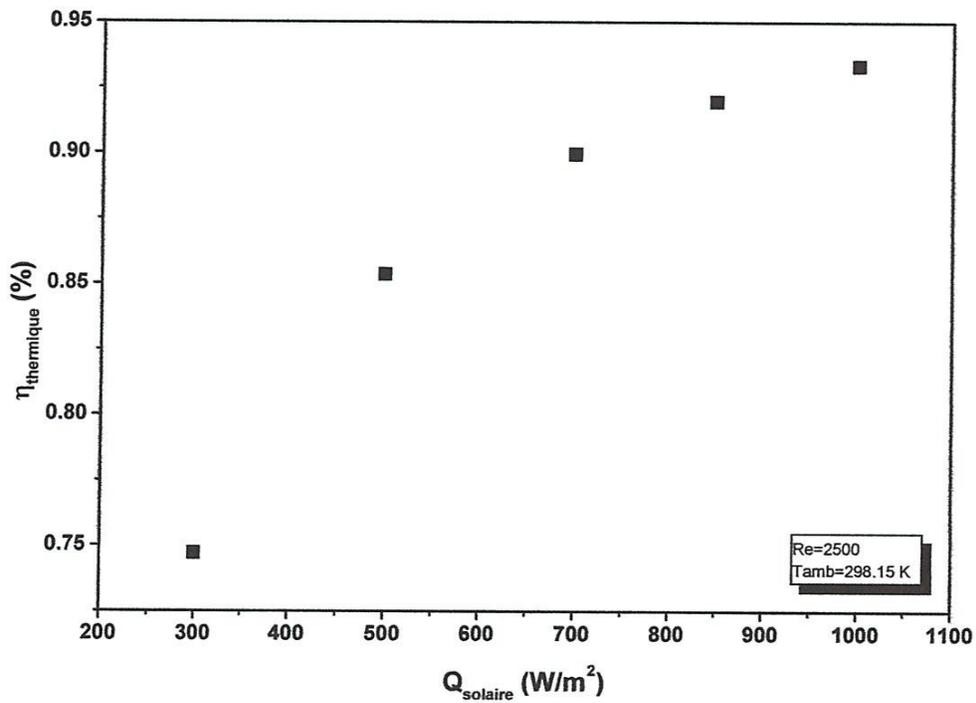


Fig. III-15. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.

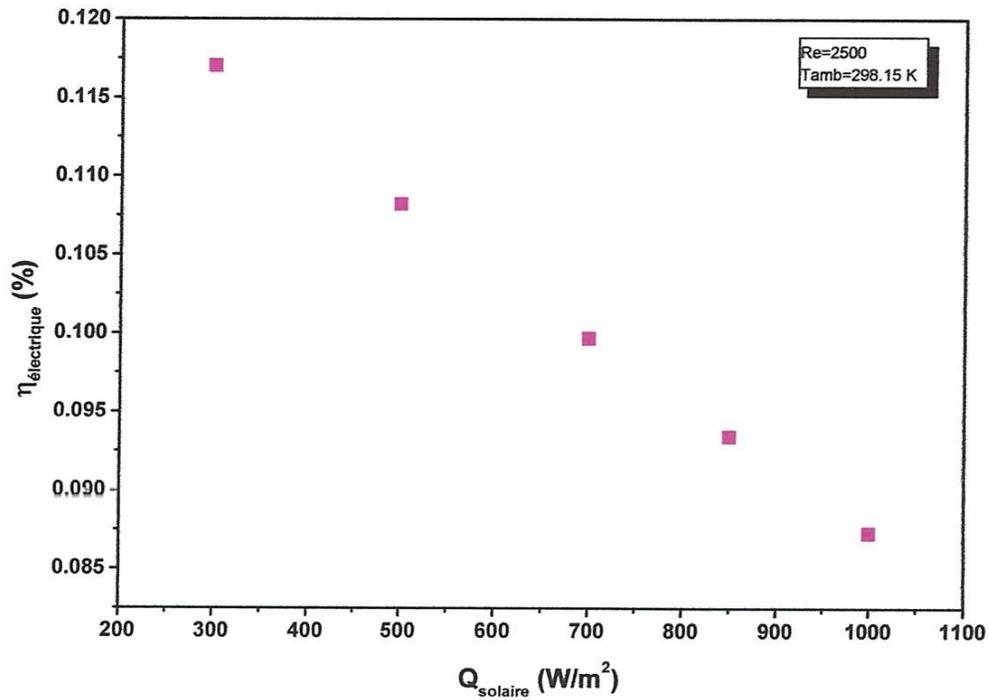


Fig. III-16. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.

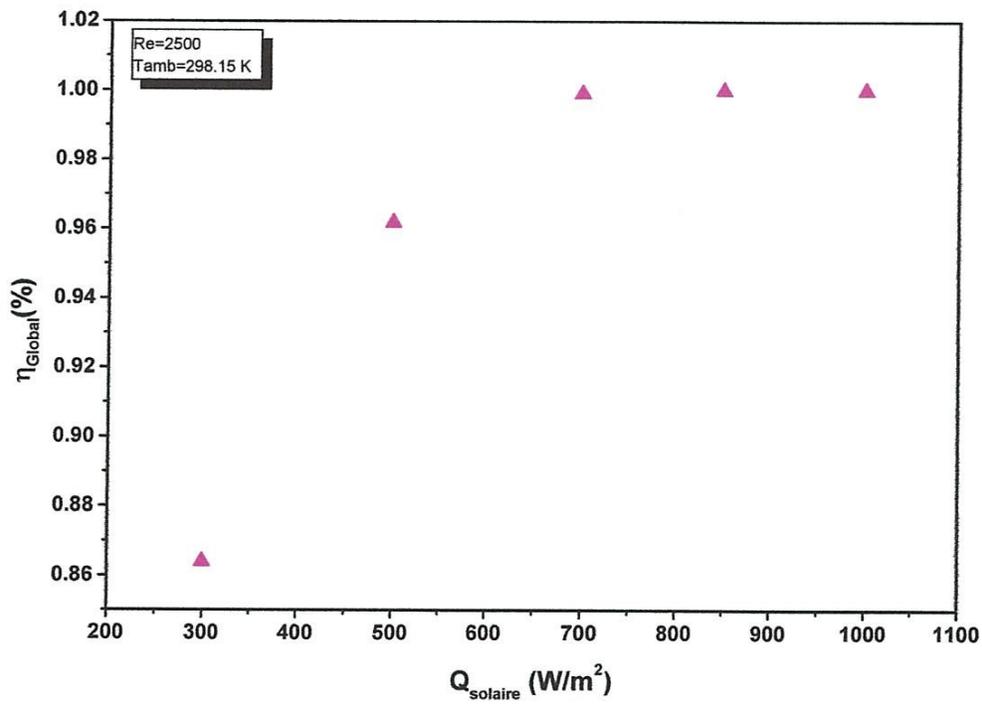


Fig. III-17. Effet du Flux Solaire sur le Rendement Global du Capteur Hybride PVT à Air.

L'effet du flux solaire incident sur le capteur hybride PVT à air est très important car il donne un aperçu des résultats qualitatifs sur ce que sera les différents rendements du capteur hybride lorsqu'il se trouve dans des conditions météorologiques ou des sites différents. On remarquera d'après les résultats des simulations présentées dans les figures III-14, 15, 16, et 17, qu'une augmentation du flux solaire incident entraînera une augmentation du rendement thermique, par contre, cet effet dégradera le rendement électrique car la température de la cellule PV augmente. Le rendement global du capteur hybride augmente car en valeur absolue le rendement thermique est supérieur au rendement électrique. D'après ces résultats des simulations, on notera que si l'énergie solaire reste très compétitive sous sa forme thermique dans les régions à fort ensoleillement comme le sud Algérien ou la Mauritanie, il n'en est pas de même pour ce qui concerne sa conversion photovoltaïque. Ceci renforce en plus l'idée de l'utilisation des capteurs hybrides afin de diminuer la température de la cellule PV et ainsi augmenter le rendement électrique.

### III. 5. Effet de la Température Ambiante

La température ambiante à elle aussi, possède un effet néfaste sur la conversion PV de l'énergie solaire, ceci est montré par les figures III-18 et 20. L'énergie thermique par contre sa variation avec la température ambiante est beaucoup plus subtile. En effet, la figure III-19 montre que le rendement thermique diminue à partir d'une température de 273.15 K jusqu'à une température de 298.15 K, puis commence à augmenter au fur et à mesure que la température augmente. Ce fait s'explique par des pertes par rayonnement et convection qui diminuent au fur et à mesure que la température chute sous les 20 °C, ce qui a comme effet d'augmenter la quantité de chaleur emmagasiner dans le capteur hybride. Lorsque la température augmente au dessus des 25 °C, l'énergie thermique externe pénètre plus le capteur hybride et sa captation augmente aussi. Le rendement thermique est donc minime autour d'une température ambiante de 298.15 K ceci bien sur pour le cas d'un flux solaire de 1000 W/m<sup>2</sup>.

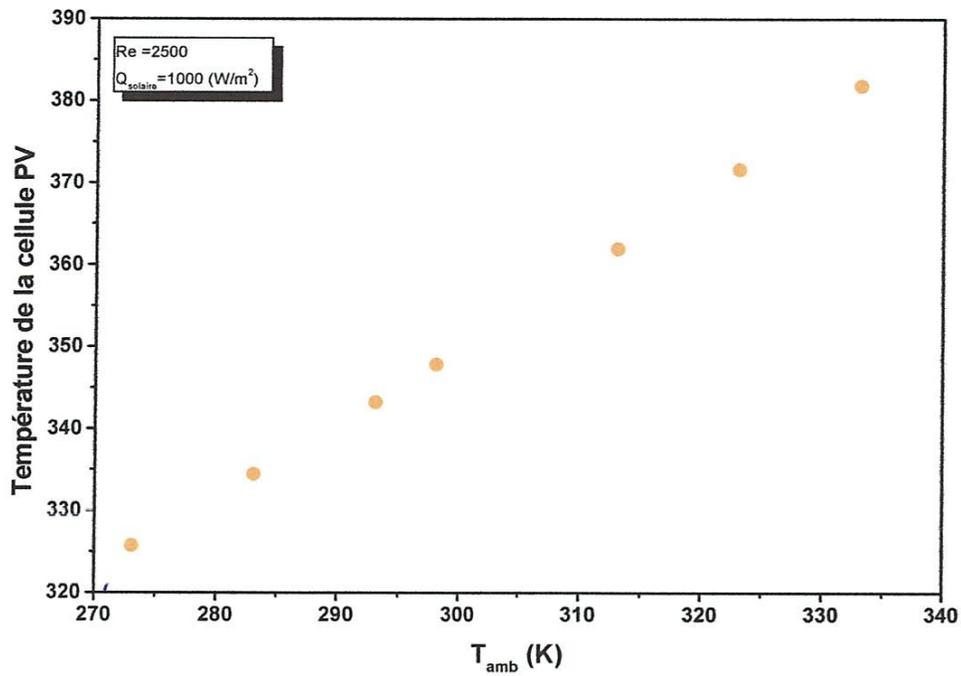


Fig. III-18. Effet de la Température Ambiante sur la Température de la Cellule PV

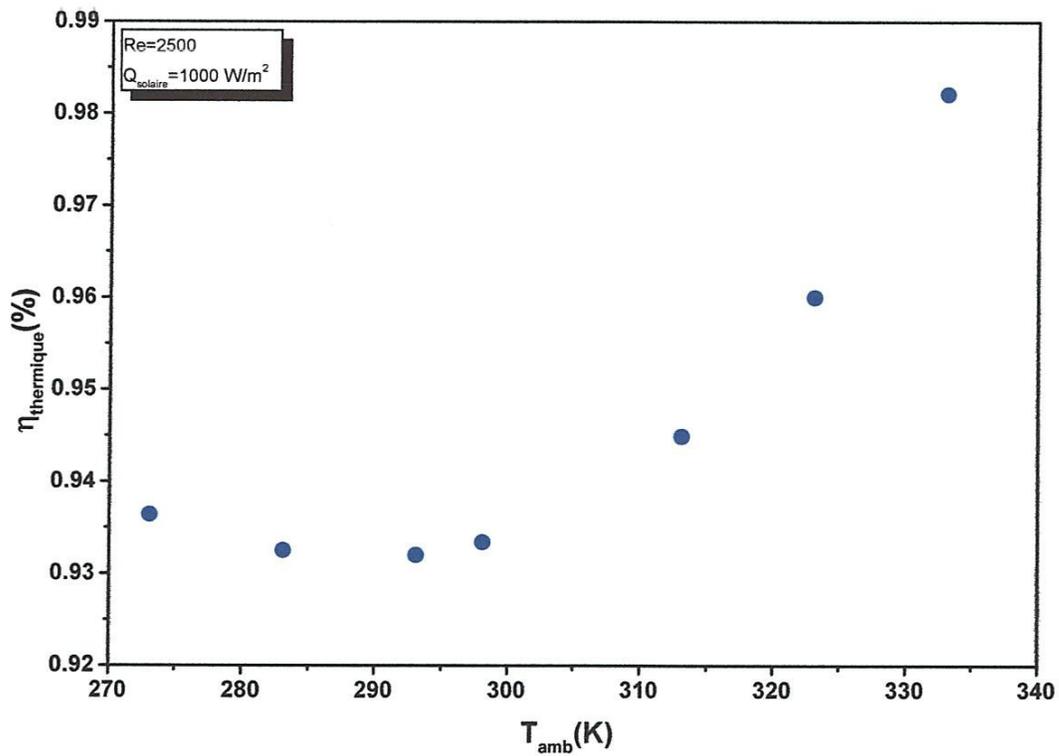


Fig. III-19. Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Thermique.

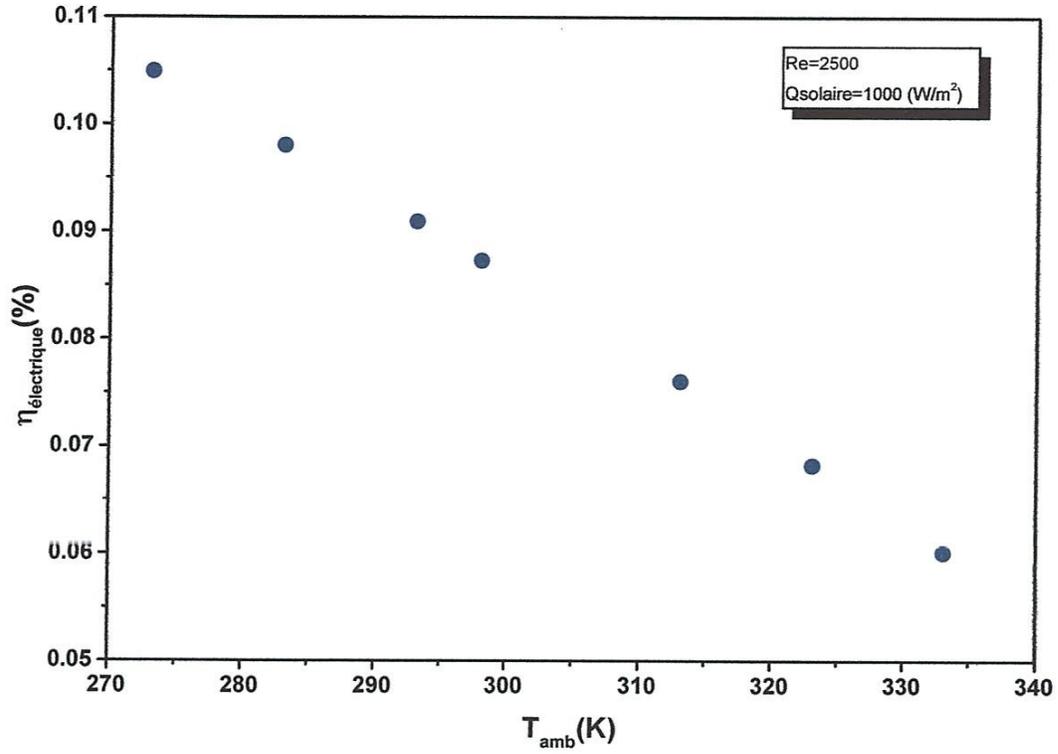


Fig. III-20. Effet de la Température Ambiante sur le Rendement Electrique.

### III. 6. Effet du Nombre de Reynolds

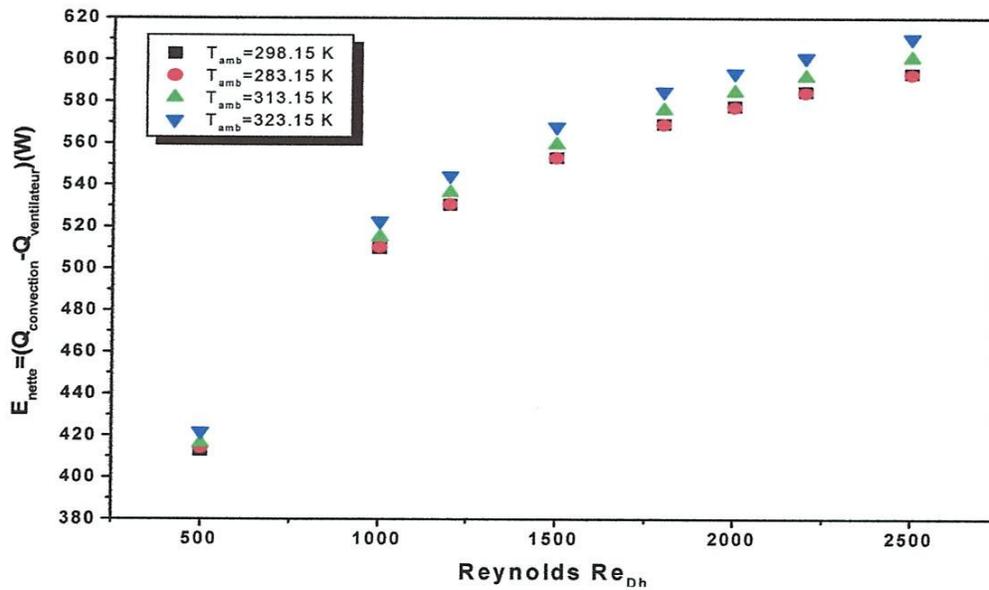


Fig. III-21. Effet du Nombre de Reynolds sur l'Energie Nette (Energie Thermique–Energie Ventilateur).

L'influence du nombre de Reynolds sur l'énergie nette correspondant à la différence entre l'énergie thermique gagnée diminuée de l'énergie perdue par pertes de charges dans les canaux de refroidissement, et qui sera compensée par le ventilateur utilisé dans le système de refroidissement par air. Dans la figure III-21, il apparaît clairement que le nombre de Reynolds est très important comme facteur favorisant le transfert de chaleur dans un écoulement laminaire et établi. Le meilleur transfert de chaleur est obtenu dans le cas d'un canal à section droite rectangulaire pour une valeur du Reynolds correspondant à la valeur critique à savoir 2500. Comme les pertes de charges sont proportionnels au carré de la vitesse d'écoulement, la puissance consommée par le ventilateur augmentera aussi avec l'augmentation de la vitesse d'écoulement de l'air, ce qui est aussi le cas de la puissance thermique gagnée par le système hybride PVT. En observant en parallèle l'effet de la température ambiante pour tenir compte de la variation de cette valeur suivant les différentes saisons de l'année et éventuels sites d'installation solaire, on remarquera qu'aucune différence n'existe pour les cas des températures ambiantes 298.15 K et 283.15 K. Cependant, pour des températures supérieures à 298.15 K, il apparaît clairement que l'énergie nette dégagée par le capteur hybride PVT à air, augmente aussi, ce qui constitue une preuve supplémentaire d'utiliser ces systèmes de cogénération d'énergie dans les régions chaudes.

### III. 7. Effet du Nombre de Canaux de Refroidissement

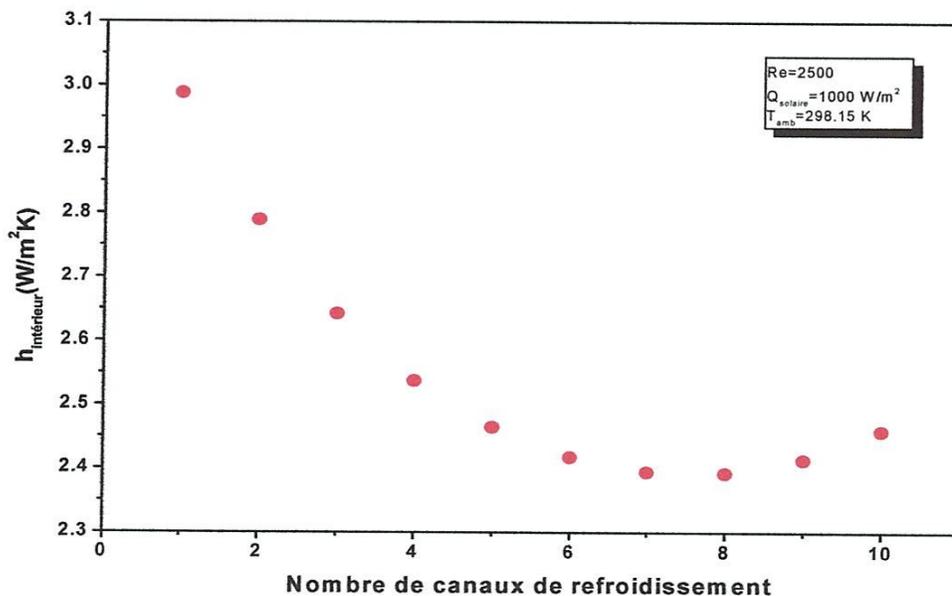


Fig. III-22. Effet du Nombre de Canaux sur le Coefficient de Convection à l'Intérieur du Canal de Refroidissement.

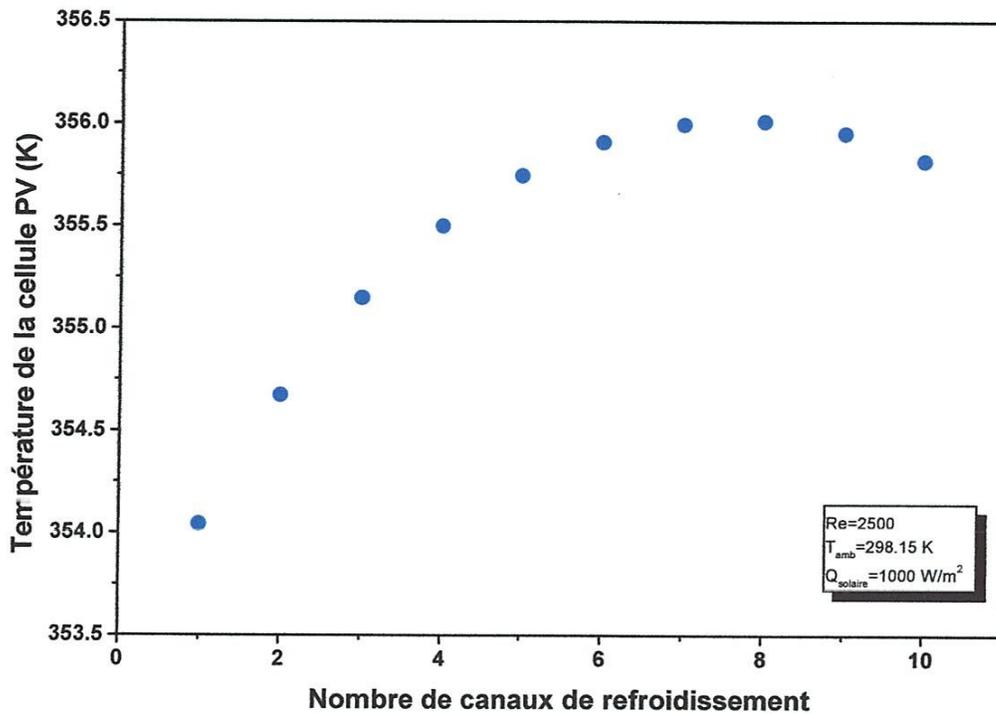
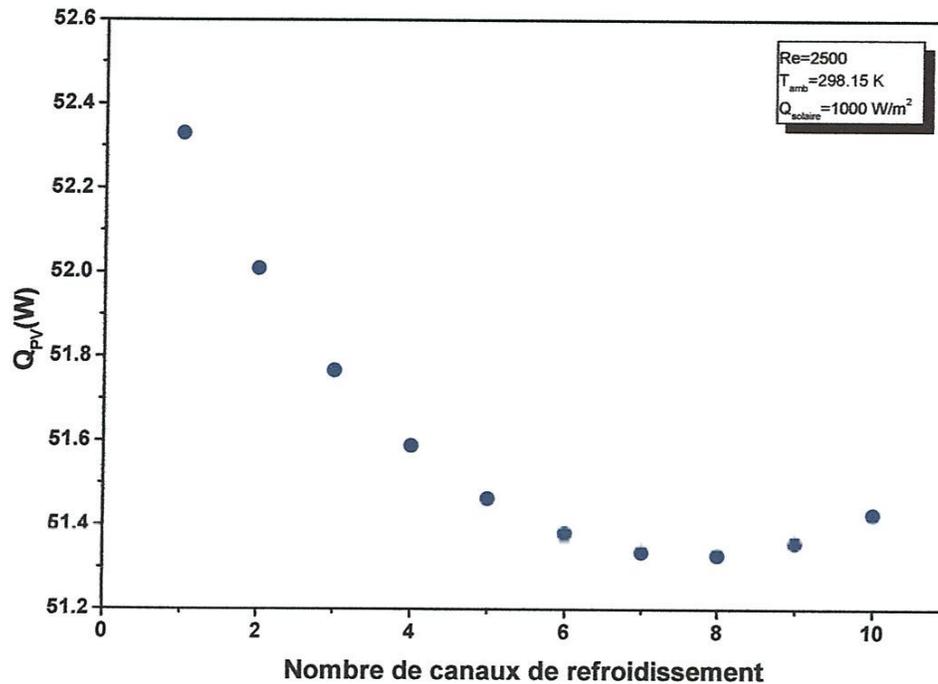


Fig. III-23. Effet du Nombre de Canaux sur le la Température de la Cellule PV.

Au début de ce chapitre, on avait présenté cet effet comme étant très subtil, et de surcroît imprévisible à priori. Sur les figures III-22, 23, 24 et 24, on remarquera que l'augmentation du nombre de canaux de refroidissement du cas où un seul canal est utilisé comme échangeur de chaleur à air jusqu'au nombre de 8 canaux, on constatera une diminution du coefficient de transfert de chaleur par convection, ce qui se traduira par une diminution du transfert de chaleur donc d'une augmentation de la température de la cellule PV et une diminution de la puissance électrique produite par effet photovoltaïque. Cependant, au-delà-de 8 canaux de refroidissement, on remarquera que ce même coefficient  $h_{int}$  commence à augmenter entraînant dans son sillage une diminution de la température de la cellule PV et donc une augmentation de la puissance électrique produite. Cet effet est observable par suite pour ce qui concerne le rendement électrique car celui-ci suit la même évolution que la puissance électrique produite.



**Fig. III-24.** Effet du Nombre de Canaux sur la Puissance Electrique Produite par effet PV.

Cependant, le rendement thermique ne suit pas la même évolution que le rendement électrique. Ceci est montré dans la figure III-25, où on remarquera que ce rendement augmente avec l'augmentation du nombre de canaux de refroidissement. En augmentant le nombre de canaux, on diminue par suite le diamètre hydraulique et on augmentera ainsi la vitesse d'écoulement dans les canaux ainsi que le débit massique (proportionnel à la vitesse), ce qui contribue à augmenter la quantité de chaleur extraite de l'échangeur multi-canaux.

Cette simulation montre d'une manière claire qu'un choix arbitraire du nombre de canaux de refroidissement, n'est pas toujours une solution idoine pour améliorer le rendement d'un capteur hybride PVT à air comme on peut le remarquer dans de nombreuses publications traitant le sujet, où ce nombre est fixé le plus souvent au hasard (en tous les cas aucune indication sur le critère de choix du nombre des canaux n'est donnée). Si pour notre exemple on prendra un échangeur à 8 ou 9 canaux, le rendement électrique sera ainsi le plus faible possible.

L'originalité de la présente étude, est qu'elle permettra à partir des dimensions réelles d'un capteur PV (sa longueur, largeur, caractéristiques électriques) de fixer le nombre exact de canaux à utiliser. Même pour le cas où on change de site (variation du flux solaire et/ou la température ambiante), le nombre de canaux maximum pour des dimensions fixés, l'alliage d'aluminium de 2-mm d'épaisseur, une hauteur du canal déterminée par la formule de Bejan, on pourra maximiser notre rendement global du capteur hybride. La production électrique

assurera non seulement le fonctionnement de ventilateur, mais il restera aussi des Watts pour d'autres utilisations.

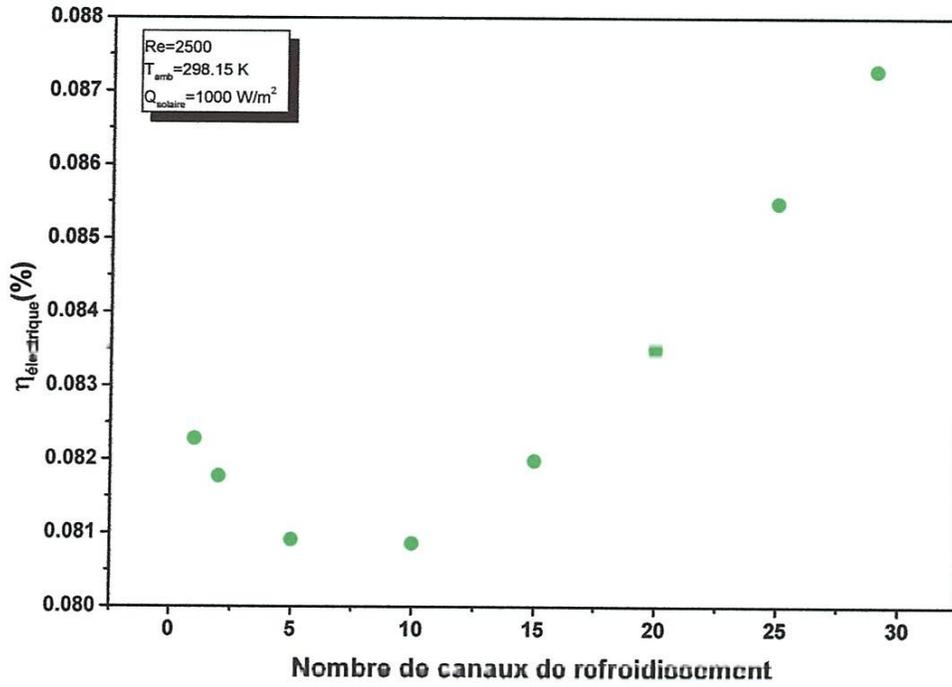


Fig. III-26. Effet du Nombre de Canaux sur le Rendement Electrique du Capteur Hybride PVT à Air.

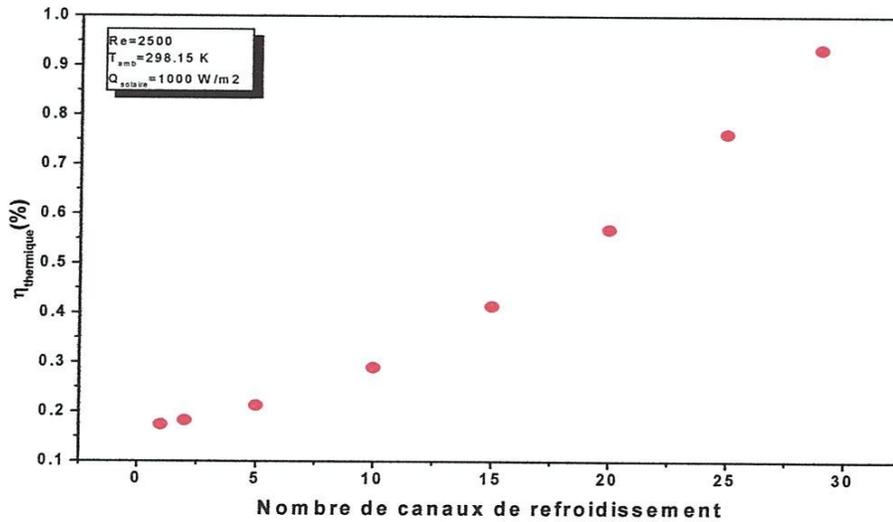


Fig. III-25. Effet du Nombre de Canaux sur le Rendement Thermique du Capteur Hybride PVT à Air.

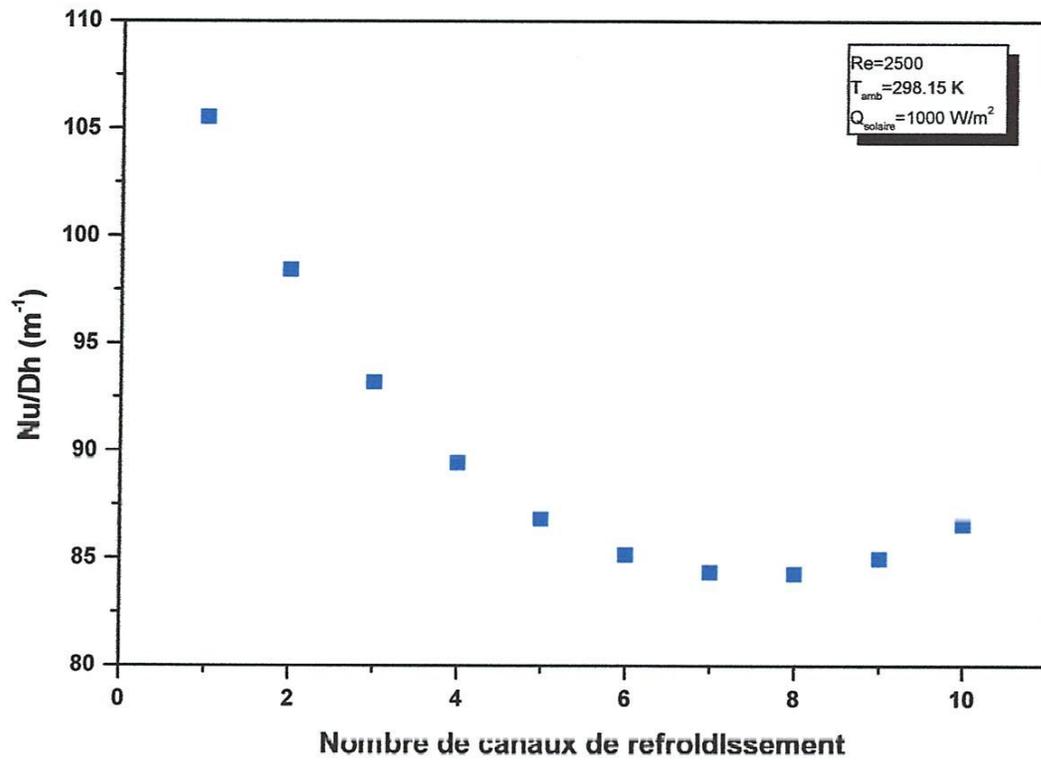


Fig. III-27. Effet du Nombre de Canaux sur le Rapport Nu(Nusselt)/ Dh (diamètre hydraulique)

---

# Conclusion

---

### **Conclusion Générale et Perspectives :**

Ce mémoire de master a été défini avec des objectifs assez précis à savoir :

- D'examiner les moyens technologiquement accessibles pour des pays en voie de développement afin de pouvoir utiliser d'une manière efficace des capteurs hybrides PVT à air. Les contraintes indiquées au début consistaient en ce que la technologie soit relativement peu coûteuse, que la réparation de ces systèmes peut être faite par le citoyen lambda.
- De modéliser le système hybride PVT à air en utilisant un PC, au lieu d'un super ordinateur, tout cela en gardant l'essence du problème du point de vue physique en proposant un modèle théorique donnant des résultats qualitatifs acceptables.
- Apprendre la méthodologie et les différentes étapes à suivre afin d'aborder un problème paraissant a priori très complexe à modéliser.

Les résultats obtenus à la fin de ce mémoire, laissent supposer que la majorité si ce n'est pas tous les objectifs assignés ont été atteints.

Quelques résultats des simulations méritent cependant qu'on s'y attarde un peu, du fait que certains d'entre eux n'apparaissent pas souvent dans les publications internationales et les thèses, on pourra citer notamment :

- ◆ Une augmentation du flux solaire incident entraînera une augmentation du rendement thermique, par contre, cet effet dégradera le rendement électrique car la température de la cellule PV augmente. Le rendement global du capteur hybride augmente car en valeur absolue le rendement thermique est supérieur au rendement électrique.
- ◆ La figure III-19 montre que le rendement thermique diminue à partir d'une température de 273.15 K jusqu'à une température de 298.15 K, puis commence à augmenter au fur et à mesure que la température augmente. Il apparaît donc qu'il existe une valeur minimale du rendement thermique.
- ◆ L'effet du nombre de canaux de refroidissement a été présenté comme étant très subtil, et de surcroît imprévisible a priori. Pour l'énergie électrique produite, il existe un point minimal obtenu lorsque le nombre de canaux est 8. Cependant, pour le rendement thermique, sa valeur augmente avec l'augmentation du nombre de canaux.

On dirait donc que la température ambiante et le nombre de canaux de refroidissement jouent des rôles similaires pour le rendement thermique et électrique, respectivement. Pour chacun d'eux une valeur minimale est atteinte lorsque l'autre continue de toujours de varier.

Finalement, une expérimentation est certainement nécessaire afin de valider les résultats des simulations, ceci surtout en tenant compte du fait qu'un seul travail similaire ayant la même configuration a été fait en Malaisie, et que malheureusement, aucun détail ni sur les dimensions ni sur les caractéristiques des matériaux utilisés dans leurs expérimentation n'a été donné, ce qui rend la validation impossible à faire (Goh Li Jin *et al.* American Journal of Applied Sciences 7 (2), pp.277-282, 2010).

---

# Références

---

**Références bibliographiques**

- [1] K.W.FORD, « Studies on the more efficient use of energy ». Editor APS New York (1975).
- [2] D.M. CHAPIN, C.S. Fuller et G.L. Pearson, Journal of Applied Physics Vol.25 (1954), p.676.
- [3] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [4] <http://lewebpedagogique.com/sciencesalecole/files/Le-mouvement-apparent-du-soleil-et-lessaisons- M1-novembre-2010-V2.pdf>.
- [5] S. Saadi, Effet des paramètres opérationnels sur les performances d'un capteur solaire plan, Mémoire de Magister en physique ; UMC, 2010.
- [6] <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5>.
- [7] J.A Duffie and W.A Beckman, Solar Energy Thermal Processes; 2<sup>nd</sup> edition, Wiley Interscience, New York, 1974.
- [8] T.Fogelman, « Système photovoltaïque pour les pays en déventement », manuel d'installation et d'utilisation, Agence Française pour la Maîtrise de l'énergie, (AFME), 1982.
- [9] A.Guen, « Contribution à l'étude des systèmes de télécommunications mobiles » Thèse de Magister, Université de Tlemcen, Février 1992.
- [10] [www.solarelectricpower.org](http://www.solarelectricpower.org).
- [11] : R.P.Mukund, «Wind and solar Power Systems », Ph.D,P.e Université merchant Marine, 1999.
- [12] GREEN.M.A. «Solar cell », Ed, University of New South Wales, 1992, p.336.
- [13] FUJISAWA T., TANI T. Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal .hybrid collector. Solar Energy Materials and Solar Cells, 1997. vol. 47, n° 1-4, pp. 135-148
- [14] SANDNES B., REKSTAD J. A photovoltaic/thermal (PV/T) collector with 2002, vol. 72, n° 1, pp. 63-73.  
polymer absorber plate experimental study and analytical model. Solar Energy, 2002.
- [15] CHOW T. T. Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. Solar Energy, 2003. 2003, vol. 75, pp. 143-152.

- [16] J., et al. Performance evaluation of photovoltaic thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, 2007.
- [17] FRAISSE G., MENEZO C., JOHANNES K. Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to comb systems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 2007.
- [18] CHOW T. Performance evaluation of photovoltaic thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, 2007. 2007, vol. 81, pp. 123-130.
- [19] HEGAZY A. Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and management*, 2000, vol. 41, n° 8, pp. 861-881.
- [20] TIWARI A., SODHA M. S., CHANDRA . Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, Vol. 90, N° 2, Pp. 175-189.
- [21] H A ZONDAG *Solar Energy* Vol. 72, No. 2, pp. 113–128, 2002
- [22] Tonui, J. and Tripanagnostopoulos, Y. (2006). "Improved PV/T solar collectors with heat extraction by forced or natural air circulation." *Renewable Energy*.
- [23] A. « Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors », *Journal of Energy Conversion and management*, Vol. 41, (2000).
- [24] W. H. Macadams, « Heat transmission », 3ème Ed., McGraw-Hill, New York (1954).
- [25] [26] Incropera and dewih.

---

# Annexe

---