

BURKINA FASO

Unité – Progrès – Justice

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR, DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ET DE L'INNOVATION
(MESRSI)



Université Ouaga I Pr. Joseph Ki-Zerbo

UFR / SEA / IFTSA

Mémoire de Fin d'Etudes en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER EN TECHNOLOGIES SOLAIRES APPLIQUEES

10/11/2016

MODELISATION ET SIMULATION D'UN CAPTEUR SOLAIRE HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE THERMIQUE

Présenté et soutenu publiquement par :

HAYIBO Koami Soulemame

Sous la direction de :

Pr. BATHIEBO D. Joseph / Université de Ouaga I

Codirigé par :

Dr. DZAGLI M. Mikesokpo / Université de Lomé

Membres du Jury :

Président : Dr. KAM Sié

Examineur : Dr. KIENO Florent

Directeur de mémoire : Pr. BATHIEBO Joseph Dieudonné

Codirecteur de mémoire : Dr. DZAGLI Milohum Mikesokpo

Année Universitaire : 2015 - 2016

Dédicaces

A *mes parents et à tous les
membres de ma famille ;*

Remerciements

Nos remerciements vont tout droit à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail et plus particulièrement :

- Au Professeur BATHIEBO Joseph Dieudonné qui, malgré ses occupations à accepter de superviser ce travail. Il a été pour nous durant notre séjour à Ouagadougou comme un deuxième père. Encore une fois merci.
- Au Docteur DZAGLI Milohum Mikesokpo qui, malgré la distance, a accepté de codiriger le présent mémoire afin de nouer des liens entre l'Université de Ouaga I et l'Université de Lomé.
- Au Docteur KAM Sié et au Docteur KIENO Florent pour avoir accepté faire partie du jury qui a jugé ce travail.
- A tout le corps enseignant de la filière TSA (Technologies Solaires Appliquées) pour son attention, sa passion et son engagement.
- A mes camarades de classe qui ont su m'accueillir et m'accepter comme l'un d'entre eux.
- A toutes mes nouvelles connaissances acquises ici à Ouagadougou pour leur soutien moral.
- Et enfin à ma famille qui, malgré la distance, continue de me soutenir dans mes études.

Merci beaucoup à toutes et à tous

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des abréviations.....	viii
Nomenclature	ix
Symboles grecs	x
Indices	x
Introduction Générale	1
Contexte	1
Objectif.....	2
Démarche à suivre.....	2
Chapitre 1 : Généralités sur les technologies de conversion de l'énergie solaire.....	4
1.1. Introduction	4
1.2. Le solaire photovoltaïque	4
1.2.1. Principe de conversion	4
1.2.2. Les différents types de technologies	6
1.2.3. Fonctionnement et caractéristiques d'une cellule <i>PV</i>	11
1.3. Le solaire thermique	17
1.3.1. Les capteurs thermiques plans	17
1.3.2. Les capteurs thermiques à concentration	20
1.4. Conclusion.....	21
Chapitre 2 : Etudes bibliographiques des capteurs <i>PVT</i>	22
2.1. Introduction	22
2.2. Description d'un capteur <i>PVT</i>	22
2.3. Etude bibliographique	24
2.4. Conclusion.....	34

Chapitre 3 : Modélisation et simulation du capteur PVT à eau	35
3.1. Introduction	35
3.2. Eléments de conception et mode de fonctionnement	35
3.3. Modèle utilisé	36
3.4. Bilan thermique du capteur	38
3.5. Bilan énergétique du capteur	46
3.6. Résolution numérique du système	49
Chapitre 4 : Résultats de la simulation et Interprétation	54
4.1. Introduction	54
4.2. Irradiation globale horaire	54
4.3. Température ambiante et température du ciel	55
4.4. Température des éléments du capteur	56
4.4.1. Influence de la vitesse du vent sur les profils de température	57
4.4.2. Influence du débit d'eau utilisé	59
4.5. Puissance et rendement électriques	59
4.6. Puissance et rendement thermique	61
4.7. Rendement global	63
4.8. Comparaison avec d'autres résultats	63
4.9. Valeurs utilisées dans la simulation	64
4.10. Conclusion	65
Conclusion générale	66
Annexes	68
A.1. Eléments de transferts thermiques	68
A.2. Propriétés de quelques corps	74
Références	76
Résumé	79

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1. 1 - Diagramme de bande de trois types de matériau (a)-Isolant, (b)-Conducteur, (c)-Semi-conducteur [1].....	5
Figure 1. 2 - Principe de fonctionnement d'une cellule <i>PV</i>	6
Figure 1. 3 - Cellule au silicium monocristallin [3].....	7
Figure 1. 4 - Cellule au silicium polycristallin [3].....	7
Figure 1. 5 - Photo d'une cellule au silicium amorphe [5].....	8
Figure 1. 6 - Schéma de principe d'une cellule organique [4]	9
Figure 1. 7 - Cellule Solaire tout organique sur substrat souple [4]	10
Figure 1. 8 - Les cellules à base de <i>GaAs</i> alimentant l' <i>ISS</i> [8].....	11
Figure 1. 9 - Schéma équivalent d'une photopile [1]	12
Figure 1. 10 - Caractéristique courant-tension d'une cellule <i>PV</i> [1].....	13
Figure 1. 11 - Représentation de la puissance d'une cellule en fonction de la tension [1]	14
Figure 1. 12 - Caractéristique $I - V$ d'un module pour différentes température [11]	16
Figure 1. 13 - Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes températures [11]	17
Figure 1. 14 - Schéma de principe d'un capteur solaire plan [13]	18
Figure 1. 15 - Capteurs moquette pour le chauffage des piscines [14].....	19
Figure 1. 16 - Capteurs sous vide (1-Absorbeur, 2-Echangeur, 3-Tube) [14].....	19
Figure 1. 17 - Capteur Solaire vitré [14].....	20
Figure 1. 18 - Différentes technologies de concentrations de l'énergie solaire [16]	21

Chapitre 2

Figure 2. 1 - Structure d'un capteur <i>PVT</i>	23
Figure 2. 2 - Détails d'un capteur <i>PVT</i> à air [1].....	23
Figure 2. 3 - Détails d'un capteur <i>PVT</i> à eau [1]	24
Figure 2. 4 - Banc d'essai du capteur hybride <i>PVT</i> [19].....	25
Figure 2. 5 - Schéma générale du système de cogénération à base des capteurs hybrides <i>PVT</i> [20]	26

Figure 2. 6 - Représentation schématique d'un capteur <i>PVT</i> plan et vitré ainsi que des phénomènes régissant son comportement thermique et électrique [21]	27
Figure 2. 7 - Production thermiques et électriques annuelles des trois configurations étudiées [21]	27
Figure 2. 8 - Distribution de la température dans le capteur hybride [22]	28
Figure 2. 9 - Maquette sous le banc d'ensoleillement artificiel [27]	29
Figure 2. 10 - Coupe transversale dans un capteur hybride <i>PVT</i> à air [28]	30
Figure 2. 11 - Variation du rendement thermique avec la vitesse du vent [28]	30
Figure 2. 12 - Variation du rendement global avec l'épaisseur du canal d'air [28]	31
Figure 2. 13 - Prototype de capteur <i>PVT</i> [29]	31
Figure 2. 14 - Diagramme simplifié d'un nouveau capteur <i>PVT</i> [31]	32
Figure 2. 15 - Distribution 3D de température dans le capteur <i>PVT</i> [32]	33
Figure 2. 16 - Capteur hybride photovoltaïque-thermique avec lame d'air enfermée (a) et sous vide (b) [33]	34

Chapitre 3

Figure 3. 1 - Modèle de capteur <i>PVT</i>	37
Figure 3. 2 - Température des différents éléments du capteur	37
Figure 3. 3 - Echanges thermiques sur la face externe de la vitre	39
Figure 3. 4 - Echanges thermiques sur la face intérieure de la vitre	40
Figure 3. 5 - Echanges énergétiques dans les cellules solaires	41
Figure 3. 6 - Echanges thermiques dans la couche de tedlar	42
Figure 3. 7 - Echanges thermiques dans l'absorbeur	43
Figure 3. 8 - Coupe géométrique du contact entre l'absorbeur et les tubes	43
Figure 3. 9 - Bilan thermique d'un volume élémentaire de fluide	45
Figure 3. 10 - Echanges thermiques dans la couche d'isolant	46
Figure 3. 11 - Analogie électrique des coefficients de perte dans le capteur	48
Figure 3. 12 - Organigramme du programme de simulation	53

Chapitre 4

Figure 4. 1 - Rayonnement solaire global	55
Figure 4. 2 - Température ambiante et du ciel	56
Figure 4. 3 - Profil de température des différents éléments du capteur	57
Figure 4. 4 - Profil de température pour un vent de 2 m/s	58
Figure 4. 5 - Profil de température pour un vent de 5 m/s	58
Figure 4. 6 - Influence du débit d'eau sur la température du fluide	59
Figure 4. 7 - Puissance électrique fournie par le capteur <i>PVT</i> et un capteur <i>PV</i>	60
Figure 4. 8 - Rendement électrique du capteur <i>PVT</i>	61
Figure 4. 9 - Puissance thermique utile.....	62
Figure 4. 10 - Rendement thermique	62
Figure 4. 11 - Rendement global du capteur <i>PVT</i>	63
Figure 4. 12 – Comparaison de l'énergie électrique récupérée	64
Figure 4. 13 – Comparaison de l'énergie thermique récupérée	64

Liste des tableaux

Chapitre 3

Tableau 3. 1 - Propriétés physiques de l'acier galvanisé	36
Tableau 3. 2 - Propriétés physiques de la laine de verre.....	36

Chapitre 4

Tableau 4. 1 - Données utilisées pour la simulation	65
---	----

Annexes

Tableau A. 1 - Propriétés physiques de quelques matériaux isolants	74
Tableau A. 2 - Propriétés physiques de quelques matériaux utilisés comme absorbeur ...	74
Tableau A. 3 - Propriétés physiques de quelques surfaces réfléchissantes	75

Liste des abréviations

Désignation	Signification
<i>2D</i>	Deux Dimensions
<i>3D</i>	Trois Dimensions
<i>ANSYS</i>	Logiciel
<i>a – Si</i>	Silicium amorphe
<i>CdTe</i>	Tellure de Cadmium
<i>CIGS</i>	Sélénium Gallium d'Indium et de Cuivre
<i>EVA</i>	Ethylène-acétate de Vinyle
<i>FLUENT</i>	Logiciel
<i>GaAs</i>	Arséniure de Gallium
<i>HOMO</i>	Highest Occupied Molecular Orbital
<i>ISS</i>	Station Spatiale Internationale
<i>LUMO</i>	Lowest Unoccupied Molecular Orbital
<i>MATLAB</i>	Logiciel
<i>PV</i>	Photovoltaïque
<i>PVGIS</i>	Logiciel
<i>PVT</i>	Photovoltaïque Thermique
<i>STC</i>	Standard Test Conditions
<i>TRNSYS</i>	Logiciel

Nomenclature

Désignation	Signification	Unité
A_{active}	Section active du module <i>PV</i>	m^2
A_v	Section du capteur <i>PVT</i>	m^2
C_p	Capacité thermique massique	J/kg.K
D_{ext}	Diamètre extérieure	m
D_{int}	Diamètre intérieure	m
e	Epaisseur	m
E_{elec}	Puissance électrique	W
F	Rendement d'irrigation	—
F_t	Facteur de transfert thermique	—
FF	Facteur de forme	—
G_i	Flux solaire incident	W/m ²
G_{cel}	Flux solaire parvenant aux cellules	W/m ²
h	Coefficient d'échange thermique	W/K.m ²
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
I_D	Courant de diode	A
I_m	Courant maximal	A
I_{PH}	Photocourant	A
K	Coefficient d'échange global	W/K.m ²
m	masse	kg
$\dot{m}_f$	Débit de fluide	kg/s
N	Nombre de tubes	—
Nu	Nombre de Nusselt	—
P_m	Puissance maximale	W
Q	Quantité de chaleur	W
Q_{utile}	Puissance thermique	W
R_S	Résistance série	Ω
R_{SH}	Résistance de shunt	Ω
Re	Nombre de Reynolds	—
t	Temps	s
T	Température	K
T_{fe}	Température du fluide en entrée	K
T_{ref}	Température <i>STC</i>	K
V	Vitesse	m/s
V_{co}	Tension en circuit ouvert	V
V_m	Tension maximale	V

Symboles grecs

Désignation	Signification	Unité
α_{cel}	Coefficient d'absorption de la cellule	—
β_{ref}	Coefficient de température du module	—
ε_v	Emissivité du verre	—
η_{PV}	Rendement électrique du capteur <i>PVT</i>	—
η_{PVT}	Rendement global du capteur <i>PVT</i>	—
η_{ref}	Rendement <i>STC</i> du module	—
η_{thq}	Rendement thermique du capteur <i>PVT</i>	—
λ	Conductivité thermique	W/m.K
σ	Constante de Boltzmann	W/m ² .K ⁴
τ_v	Coefficient de transmission du verre	—

Indices

Désignation	Signification
Indices	
<i>ciel</i>	Ciel
<i>a</i>	Air
<i>v, ext</i>	Vitre face extérieure
<i>v, int</i>	Vitre face intérieure
<i>cel</i>	Cellules PV
<i>tedlar</i>	Tedlar
<i>abs</i>	Absorbeur
<i>tube</i>	Tube
<i>f</i>	Fluide
<i>iso</i>	Isolant
<i>v – a</i>	Vitre - Air
<i>conv</i>	Convection
<i>cond</i>	Conduction
<i>ray</i>	Rayonnement
<i>tube – iso</i>	Tubes - Isolant
<i>tube – f</i>	Tubes - Fluide
<i>abs – iso</i>	Absorbeur - Isolant

Introduction Générale

Contexte

Le Soleil est une source d'énergie abondante et renouvelable. Il est à la base de toute vie sur Terre. Son énergie a longtemps été utilisée par les êtres humains sous sa forme passive. Mais avec le besoin croissant en énergie de l'humanité, la pollution et les autres problèmes environnementaux générés par l'utilisation excessive des énergies fossiles, il s'est avéré nécessaire voire crucial de trouver de nouvelles technologies de conversion de l'énergie solaire afin de l'adapter au quotidien des Hommes.

L'énergie fournie par le Soleil à la Terre est utilisée par l'Homme sous différentes formes. Depuis l'antiquité l'être humain a toujours utilisé l'énergie solaire de façon indirecte soit pour l'éclairage naturel soit pour le chauffage et la climatisation des locaux : c'est l'utilisation sous forme passive de l'énergie solaire. Plus récemment plusieurs technologies de conversion ont vu le jour pour une exploitation plus effective de cette énergie notamment la technologie photovoltaïque et la technologie thermique.

La technologie photovoltaïque permet d'obtenir de l'électricité grâce à des panneaux solaires photovoltaïques qui captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les capteurs *PV* sont capables de convertir l'énergie solaire en énergie électrique avec une efficacité allant de 5 à 20 %. Ce qui veut dire que plus de 80 % de l'énergie incidente est perdue sous forme de chaleur. Cet échauffement des panneaux a un effet négatif sur leurs performances puisque la puissance fournie diminue avec l'élévation de la température. Des études ont été alors menées et des systèmes ont été conçus pour la récupération et la valorisation de cette chaleur.

Le capteur photovoltaïque thermique ou capteur *PVT* permet de capter le rayonnement solaire et de le convertir à la fois en chaleur et en électricité ; c'est de la cogénération. Cette chaleur récupérée est en général utilisée pour le chauffage. Mais nous avons pensé qu'il serait intéressant de l'utiliser dans la production solaire du froid. Mais avant de se lancer dans cette entreprise il est important de comprendre le fonctionnement de ces capteurs.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent mémoire intitulé « Modélisation et simulation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique ».

Objectif

L'objectif de notre travail est d'étudier le fonctionnement d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique grâce à la modélisation et à la simulation. Ce travail permettra d'estimer l'énergie électrique, le rendement électrique, l'énergie thermique et le rendement thermique, ainsi que le rendement global d'un capteur *PVT*.

Démarche à suivre

Pour atteindre notre objectif, nous avons subdivisé ce travail en quatre (04) principaux chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons parcourir les généralités sur la conversion solaire photovoltaïque et thermique en mettant un accent particulier sur la conversion photovoltaïque. Nous allons voir le fonctionnement d'une cellule solaire, unité de base d'un module photovoltaïque. Nous verrons ensuite quelques paramètres caractéristiques des modules photovoltaïques et enfin les différents types de configuration de capteurs thermiques existants.

Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude bibliographique des capteurs *PVT*. Après la description des capteurs *PVT*, nous allons parcourir quelques travaux déjà réalisés dans ce domaine.

Nous décrirons dans le troisième chapitre le modèle que nous utiliserons. Après avoir énoncé les différentes équations régissant le fonctionnement de chaque élément du capteur, nous donnerons les hypothèses de travail utilisées. Nous ferons une brève description de MATLAB, le programme utilisé pour la simulation.

Finalement nous présenterons les résultats obtenus après notre simulation. Nous discuterons ces résultats et nous étudierons l'influence de quelques paramètres sur le fonctionnement du capteur *PVT*.

Une conclusion générale et les perspectives termineront notre travail.

Chapitre 1 : Généralités sur les technologies de conversion de l'énergie solaire

1.1. Introduction

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus prometteuses. Mais elle n'est pas directement utilisable dans la forme sous laquelle elle nous parvient du soleil. Les hommes ont donc développé différentes technologies afin de la convertir et de la rendre utilisable par les inventions humaines. Les deux principales technologies de conversion de l'énergie solaire développées par l'homme sont la conversion thermique et la conversion photovoltaïque. Dans ce premier chapitre nous allons voir en quoi consistent ces deux modes de conversion en mettant un accent particulier sur la conversion photovoltaïque.

1.2. Le solaire photovoltaïque

Le photovoltaïque est un mode de conversion de l'énergie solaire qui a vu le jour grâce à la découverte de l'effet photovoltaïque par le physicien Henry Becquerel en 1839. Mais en réalité ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque verra le jour dans les laboratoires Bell. Ces cellules ont longtemps été utilisées uniquement dans le domaine spatial surtout à cause de leur coût de production. Mais la crise énergétique de 1973 a attisé l'intérêt pour les applications terrestres.

1.2.1. Principe de conversion

1.2.1.1. La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un matériau ayant la propriété d'un semi-conducteur. Un semi-conducteur est un matériau dont la bande de valence est presque remplie et qui a une bande interdite relativement petite [1].

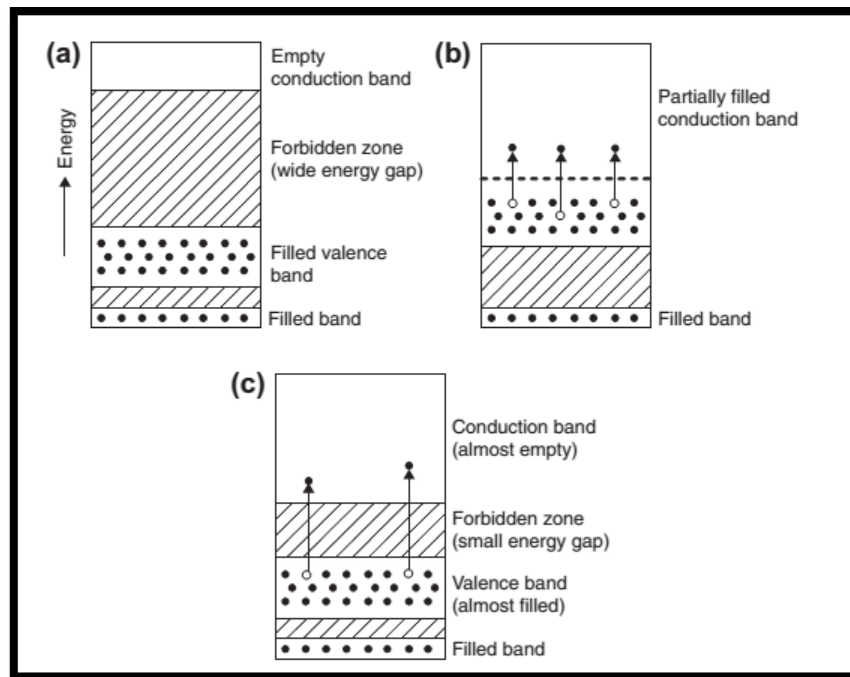


Figure 1. 1 - Diagramme de bande de trois types de matériau (a)-Isolant, (b)-Conducteur, (c)-Semi-conducteur [1]

La cellule *PV* est réalisée à partir de deux couches de semi-conducteur, une dopée *P* (dopée au bore dans le cas du silicium) et l'autre dopée *N* (dopée au phosphore dans le cas du silicium) créant ainsi une jonction *PN* avec une barrière de potentiel [2].

Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module photovoltaïque. Plusieurs modules regroupés forment un champ photovoltaïque. La cellule *PV* transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

1.2.1.2. L'effet photovoltaïque

Lorsqu'un photon pénètre la cellule photovoltaïque, il peut soit, être réfléchi, soit, être absorbé ou soit, passer à travers. Quand ce photon est absorbé par un électron de la bande de valence d'un atome, l'énergie du photon s'ajoute à l'énergie de l'électron. Si l'énergie finale de l'électron est supérieure à celle de la bande interdite du semi-conducteur, l'électron passera dans la bande de conduction où il devient un électron libre créant ainsi une paire électron-trou. Cet électron peut être retiré du matériau grâce à un champ électrique à l'avant ou à l'arrière du matériau créant ainsi un courant électrique. Si l'énergie

du photon est plus petite que la largeur de la bande interdite, l'électron n'aura pas assez d'énergie pour passer dans la bande de conduction. Cette énergie est convertie en énergie cinétique. Ce qui entraîne une augmentation de la température de la cellule. Il faut noter qu'un photon, quel que soit la valeur de son énergie ne peut libérer qu'un seul électron. Ce phénomène est la principale raison de la faible efficacité des cellules photovoltaïques [1].

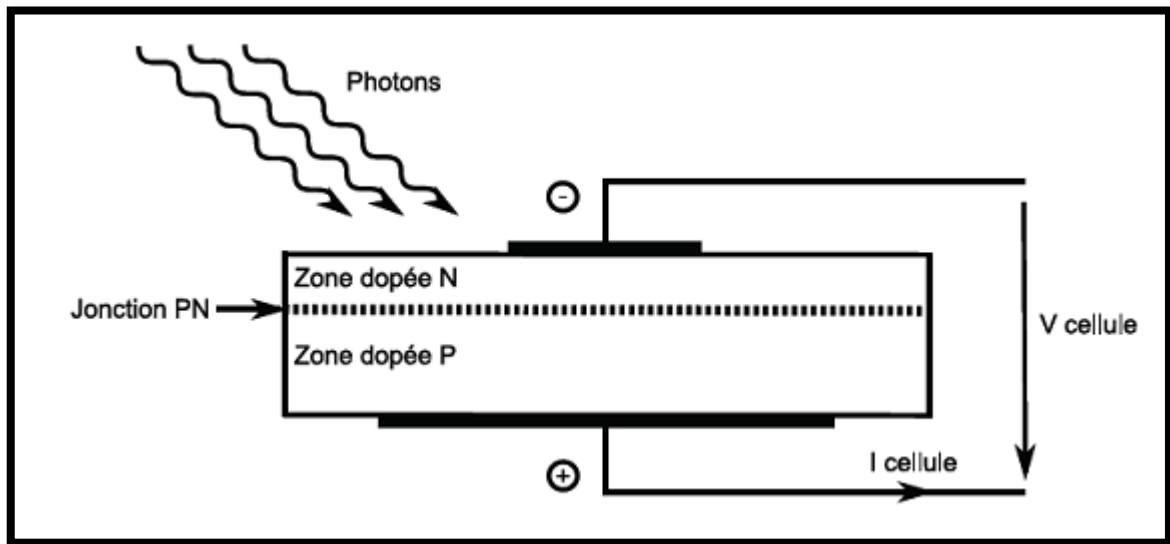


Figure 1. 2 - Principe de fonctionnement d'une cellule *PV*

1.2.2. Les différents types de technologies

Plusieurs filières technologiques existent dans le domaine du solaire *PV*. La filière du silicium reste à ce jour la filière la plus commercialisée.

1.2.2.1. Le silicium cristallin

Il domine le marché à plus de (80%). En fonction de la méthode de fabrication, on dispose de deux types de cellule au silicium cristallin : les cellules au silicium monocristallin et celles au silicium polycristallin.

La fabrication du silicium monocristallin requiert un très haut niveau de technicité. Le silicium est d'abord fondu puis lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules ont une couleur uniforme (bleu ou noir).

Ils ont un bon rendement avoisinant les 17,2 % pour les plus performants. Leur coût de production reste par contre élevé et le rendement diminue sous un faible éclairement [2].



Figure 1. 3 - Cellule au silicium monocristallin [3]

Les cellules polycrystallines aussi connues sous le nom de cellules multicristallines, sont fabriquées en utilisant plusieurs cristaux de silicium cristallin. Lors de sa fabrication le silicium polycrystallin fondu est moulé en forme de lingots qui sont ensuite coupés en tranches (wafers) très fines. Ces wafers seront assemblés pour former les cellules. Ce processus coûte moins cher que celui utilisé dans le cas du monocristallin. Les cellules polycrystallines sont par conséquent moins chères [1]. Ils ont un rendement avoisinant les 14 %. Ils sont aussi de couleur bleue mais avec des motifs [2].



Figure 1. 4 - Cellule au silicium polycristallin [3]

1.2.2.2. Le silicium amorphe

C'est du silicium non cristallisé. Il appartient à la catégorie des cellules à couches minces. Le silicium amorphe (noté a-Si) peut être directement déposé sur un substrat de verre à basse température par un procédé de dépôt chimique en phase vapeur assisté par plasma. Malgré des rendements de conversion faibles de 6 % à 7 %, cette filière tend à se développer car le prix est dérisoire par rapport au coût actuel des cellules au silicium de première génération (silicium cristallin). Le silicium amorphe, possédant un fort coefficient d'absorption, n'a besoin que d'une très faible épaisseur de silicium, de l'ordre du micron, réduisant par conséquent considérablement les coûts de matière première et le risque de pénurie liée au manque de silicium [4].

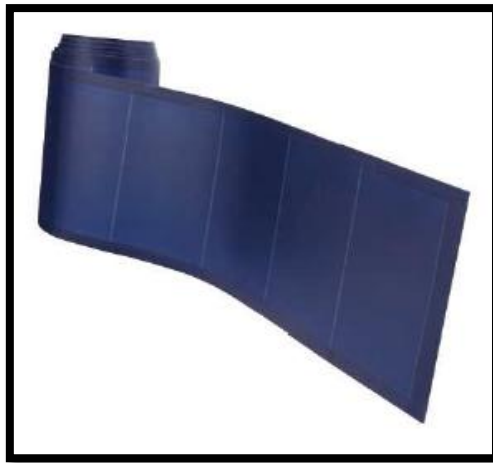


Figure 1. 5 - Photo d'une cellule au silicium amorphe [5]

1.2.2.3. Les cellules organiques

La technologie photovoltaïque bénéficie depuis quelques années des avancées technologiques en optoélectronique. Ainsi, bien que cette filière soit vraiment récente, les progrès annuels sont spectaculaires. Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [4]. Un semi-conducteur organique est un composé organique sous la forme d'un cristal ou d'un polymère, qui montre des propriétés similaires à celles des semi-conducteurs inorganiques,

ces propriétés sont la conduction par les électrons et les trous, ainsi que la présence d'une bande interdite [6].

Comme les semi-conducteurs, ils possèdent des niveaux d'énergies susceptibles d'absorber les photons en créant des paires électron-trou utilisables grâce à des transitions entre les niveaux dits *HOMO* (*Highest Occupied Molecular Orbital*) et des niveaux dits *LUMO* (*Lowest Unoccupied Molecular Orbital*). Ces niveaux correspondent respectivement à la bande de valence et à la bande de conduction. En l'absence de séparation, les paires électron-trou peuvent se recombiner en émettant des photons de la longueur d'onde correspondante (fluorescence, luminescence) plutôt que de se convertir en chaleur comme vu précédemment pour les filières inorganiques. La séparation des charges reste encore aujourd'hui un des points bloquants pour la filière organique. Si elles peuvent être séparées et transportées vers un circuit extérieur grâce à deux phases adjacentes, on obtient alors des cellules photovoltaïques d'un nouveau type tel que celle présentée ci-dessous [4].

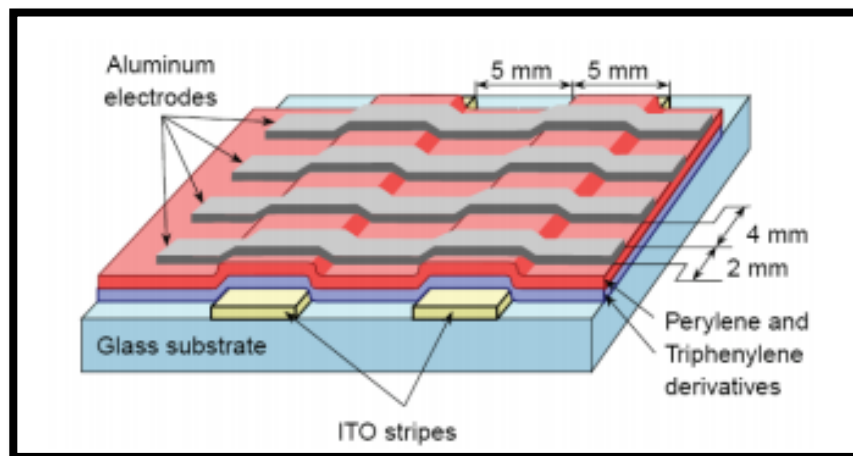


Figure 1. 6 - Schéma de principe d'une cellule organique [4]

Les progrès de cette technologie sont très rapides, des records de rendement sont très fréquemment battus (actuellement près de 6 %). Le principal frein à ces technologies est actuellement la stabilité de leurs performances ainsi que leur durée de vie (d'environ 1000 heures en 2010).

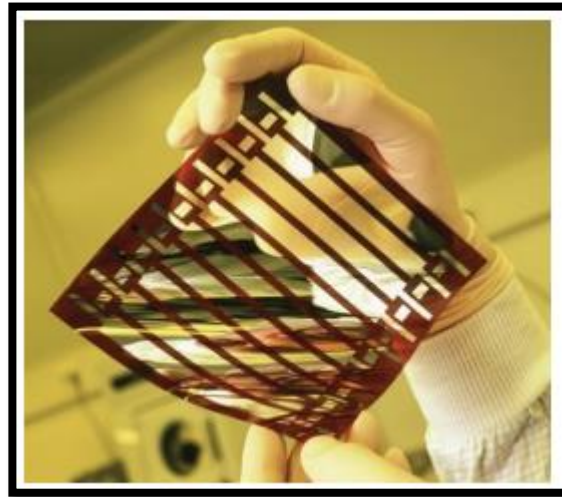


Figure 1. 7 - Cellule Solaire tout organique sur substrat souple [4]

1.2.2.4. Autres technologies

Le Tellure de Cadmium ($CdTe$) et le Sélénium de Gallium d'Indium et de Cuivre ($CIGS$) sont des technologies en couches minces qui conquièrent le marché actuel malgré une baisse de la diminution des prix du silicium cristallin due à l'émergence des firmes chinoises sur le marché. Ils sont moins chers à fabriquer et peuvent s'utiliser dans des installations de centrales photovoltaïques ($CdTe$) ou sur les toits des maisons et des commerces ($CIGS$) [1].

Les cellules en Arséniure de Gallium ($GaAs$), généralement adaptées à des applications spatiales, sont tout de même commercialisées. Elles peuvent être employées pour des applications terrestres à grande échelle. Malgré leurs coût très élevé, elles présentent un haut rendement électrique (supérieur à 30%). Cependant, elles contiennent un matériau potentiellement toxique, l'arséniure [7].



Figure 1. 8 - Les cellules à base de *GaAs* alimentant l'ISS [8]

1.2.3. Fonctionnement et caractéristiques d'une cellule *PV*

1.2.3.1. Fonctionnement

Un générateur *PV* est un assemblage de cellules solaires, de connexions, de protection et de support. Quand l'énergie solaire (photons) frappe la cellule, les électrons sont éjectés de l'atome créant ainsi des paires électron-trou. Si des conducteurs électriques sont connectés aux pôles positif et négatif, formant ainsi un circuit électrique, les électrons sont capturés sous forme de courant électrique, le photocourant (I_{ph}). Dans l'obscurité, la cellule solaire est inactive et a le fonctionnement d'une diode, c'est-à-dire une jonction p-n ne produisant ni courant ni tension. Néanmoins si elle est connectée à un générateur de tension externe, il y a apparition d'un courant nommé courant de diode (I_D). Une cellule solaire est généralement représentée par un modèle électrique à une diode. [1]. On caractérise une cellule *PV* par le tracé du courant en fonction de la tension.

Le schéma électrique équivalent d'une cellule *PV* est représenté sur la Figure 1. 9.

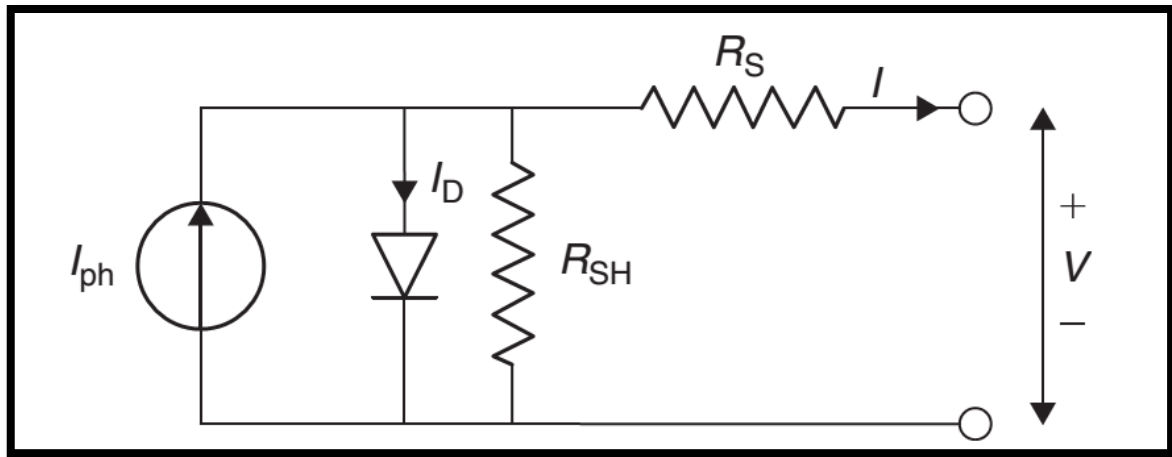


Figure 1. 9 - Schéma équivalent d'une photopile [1]

Le schéma de la Figure 1. 9 correspond au modèle « standard » à une diode, établit par Shockley pour une seule cellule *PV*, généralisé à un module *PV* en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou en parallèle [9].

R_{SH} désigne la résistance de shunt ou résistance parallèle modélisant les courants de fuite de la jonction, et R_S , la résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions [4]. R_{SH} doit être le plus grand possible et R_S le plus petit possible [1].

La loi de Kirchhoff appliquée au schéma du modèle donne le courant I débité par la cellule [10] :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{SH} \quad (1. 1)$$

Le développement de cette équation donne la formule (1. 2) :

$$I = I_{ph} - I_s \cdot \left(\exp \left[\frac{q(V + R_S \cdot I)}{nkT_c} \right] - 1 \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{SH}} \quad (1. 2)$$

Où :

- ✓ I : Courant fourni par la cellule [A]
- ✓ V : Tension aux bornes de la cellule [V]
- ✓ I_{ph} : Photocourant [A]
- ✓ I_s : Courant de saturation de la diode [A]
- ✓ R_S : Résistance série [Ω]

- ✓ R_{SH} : Résistance shunt (ou parallèle) [Ω]
- ✓ q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ C
- ✓ k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K
- ✓ n : Facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2
- ✓ T_c : Température effective de la cellule [K]

Dans le cas d'une cellule idéale, $n = 1$, $R_{SH} \rightarrow \infty$ et $R_S \rightarrow 0$. L'équation de la caractéristique pour une cellule idéale devient alors :

$$I = I_{ph} - I_s \left(\exp \left[\frac{qV}{kT_c} \right] - 1 \right) \quad (1.3)$$

La caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque est représentée sur la Figure 1. 10.

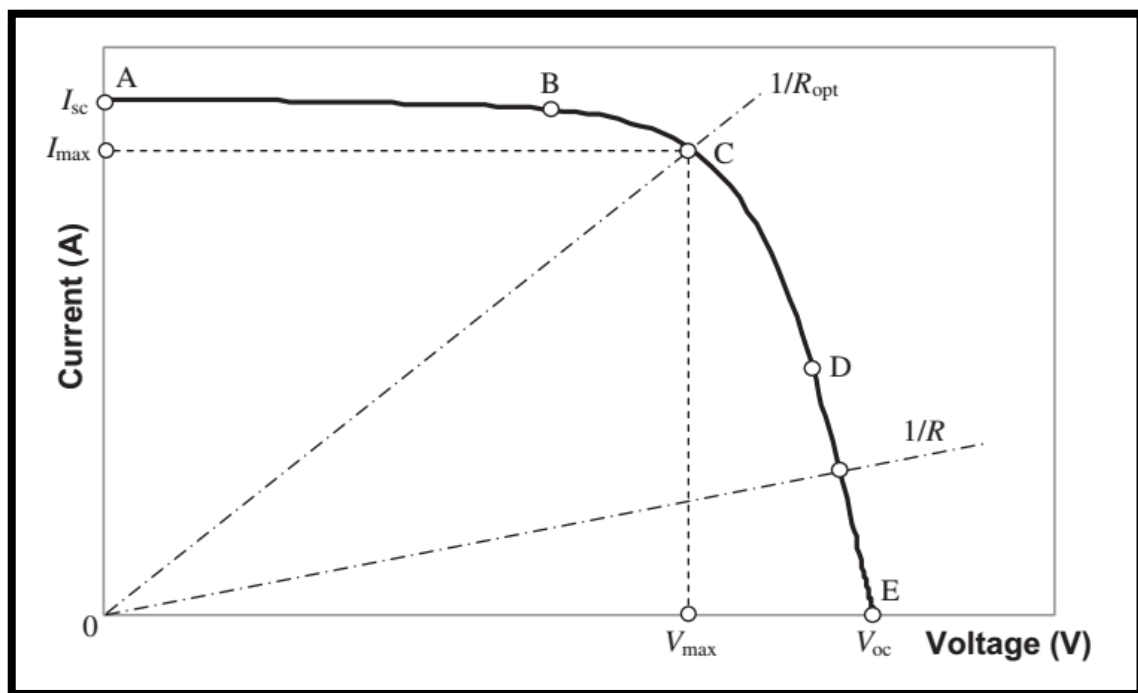


Figure 1. 10 - Caractéristique courant-tension d'une cellule PV [1]

La Figure 1. 11 correspond à la représentation d'une autre caractéristique importante des cellules PV, la puissance est présentée en fonction de la tension.

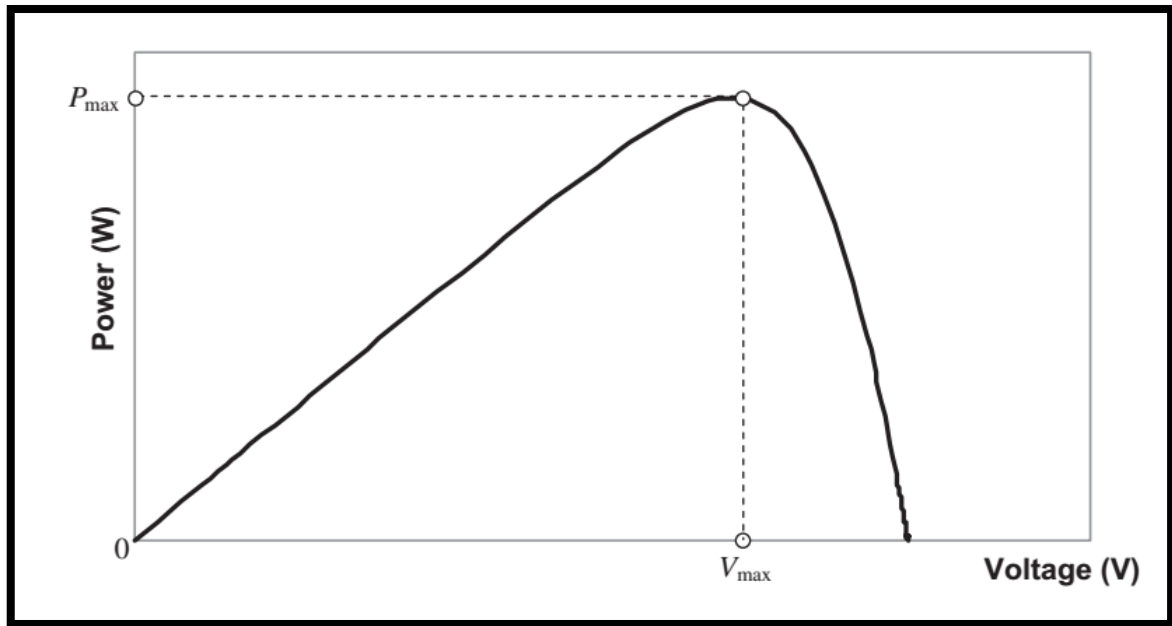


Figure 1.11 - Représentation de la puissance d'une cellule en fonction de la tension [1]

1.2.3.2. Paramètres caractéristiques d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique $I - V$ sous éclairement (Figure 1. 10), quatre (04) principales grandeurs : I_{cc} , V_{co} , I_m , et V_m interviennent dans l'étude du comportement d'une cellule solaire.

❖ Le courant de court-circuit I_{cc} :

Le courant de court-circuit I_{cc} est la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de la cellule est nulle ($V = 0$). Ainsi, en annulant la tension V dans l'équation (1. 2), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left(\exp \left[\frac{q \cdot I_{cc} \cdot R_s}{n k T_c} \right] - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{SH}} \quad (1. 4)$$

Pour la plupart des cellules solaires (dont la résistance série est faible), on peut négliger les termes contenant R_s et le courant de court-circuit se confond au photocourant.

$$I_{cc} = I_{ph}$$

❖ La tension en circuit ouvert V_{co}

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par :

$$V_{co} = \frac{nkT_c}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s} \right) \quad (1.5)$$

❖ Le point de fonctionnement $P_m (V_m, I_m)$

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance ; elle est donnée par la relation :

$$P_m = I_m \times V_m \quad (1.6)$$

Elle traduit sur la caractéristique $I - V$ le point de fonctionnement qui est situé au coude de la caractéristique $I - V$ et est appelé point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m sont aussi maximales.

❖ Le facteur de forme (FF)

Le facteur de forme (FF) « *Fill Factor* en anglais » est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \times V_{co}$). Ce facteur est donné par la relation :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} \times V_{co}} = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (1.7)$$

Ce paramètre compris entre 0 et 1 et exprimé en % qualifie la forme plus ou moins rectangulaire de la caractéristique $I - V$ de la cellule solaire.

Si celle-ci était carrée le facteur de forme serait égal à 1, la puissance P_m sera égale à ($I_{cc} \times V_{co}$). Mais, généralement le facteur de forme prend des valeurs comprises entre 0,6 et 0,85.

On note que ces quatre grandeurs caractéristiques sont sommables dans un seul paramètre, le rendement η .

❖ Le rendement η

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

Si S est la surface de la cellule (en m^2) et E l'éclairement (en W/m^2), le rendement énergétique s'écrit :

$$\eta = \frac{P_m}{S \times E} \quad (1.8)$$

Où d'après l'équation (1.7) :

$$\eta = \frac{FF \times I_{cc} \times V_{co}}{S \times E} \quad (1.9)$$

❖ Influence de la température sur les caractéristiques

L'évolution de la caractéristique $I - V$ en fonction de la température montre que le courant augmente légèrement lorsque la température s'élève et engendre une décroissance plus prononcée de la tension de circuit ouvert.

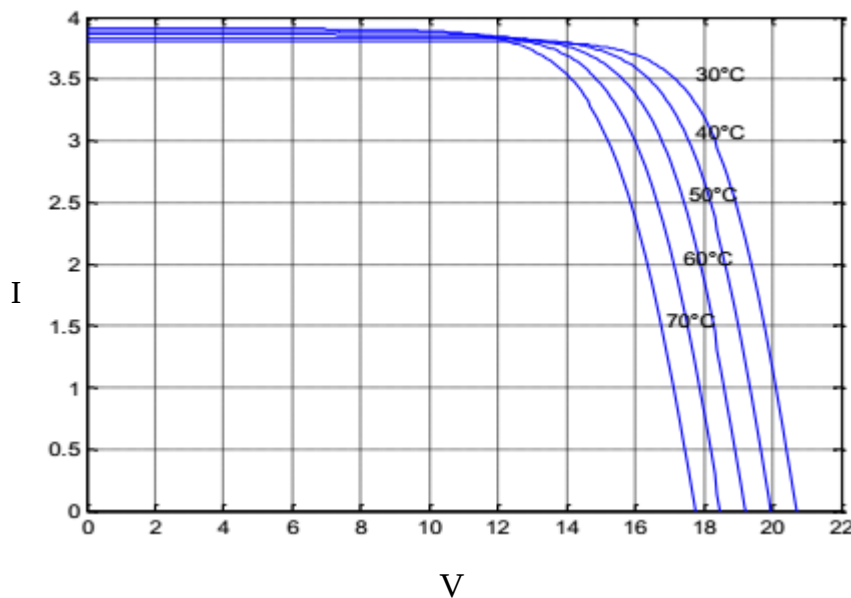


Figure 1.12 - Caractéristique $I - V$ d'un module pour différentes température [11]

La puissance délivrée par une cellule PV décroît avec la température comme nous pouvons le remarquer sur la Figure 1.13.

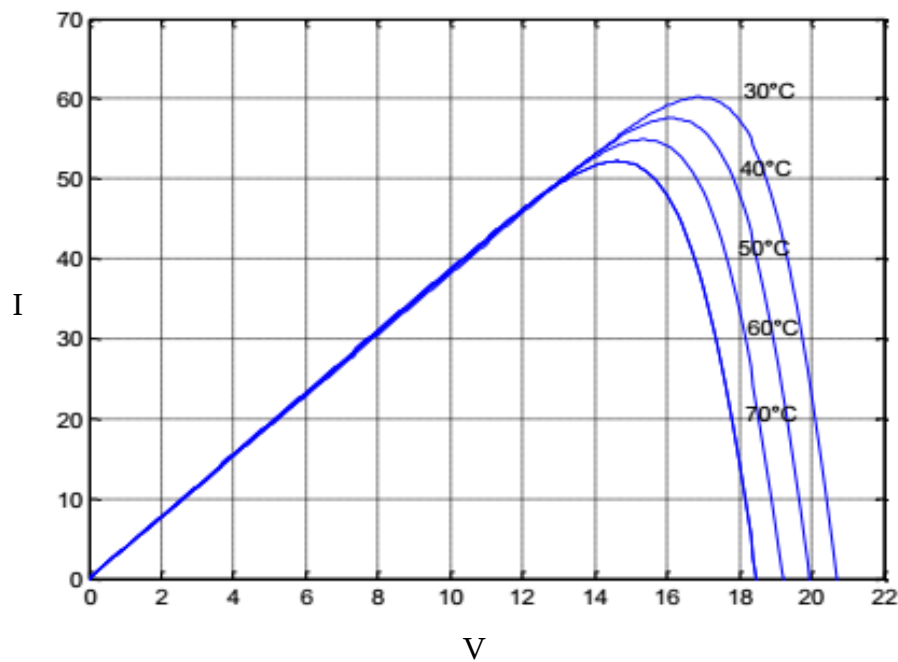


Figure 1. 13 - Caractéristique $P(V)$ d'un module pour différentes températures [11]

1.3. Le solaire thermique

L'énergie dont nous bénéficions du soleil ne nous permet pas uniquement de produire de l'électricité par la conversion photovoltaïque. Elle permet de faire bien d'autres choses telle que la production de chaleur via des capteurs thermiques avec ou sans concentration. Cette chaleur peut être utilisée directement pour le chauffage, la cuisson et la combustion. Elle peut aussi servir à produire de l'électricité grâce à des turbines à vapeurs et permet de générer du froid dans les machines frigorifiques à compression thermique.

1.3.1. Les capteurs thermiques plans

1.3.1.1. Principe de fonctionnement

Les capteurs solaires thermiques plans servent à produire de la chaleur relativement à basse température, soit entre 30 et 200 °C. La plupart d'entre eux fonctionnent sous le principe d'effet de serre pour chauffer un liquide caloporteur ou de l'air. Une surface sélective absorbe le rayonnement solaire pour convertir ce dernier en chaleur. Le rôle de la surface sélective est de capter le rayonnement de courte longueur d'onde du soleil et d'éviter de réémettre l'énergie thermique sous forme de rayonnement de longue longueur d'onde. Le

dessous de la surface absorbante est isolé de façon à éviter les pertes thermiques du panneau par conduction. Tout le panneau peut être recouvert d'un vitrage, limitant ainsi les pertes par convection. Le vitrage est lui aussi sélectif, laissant passer le rayonnement solaire, mais ne permettant pas aux ondes de chaleur de ressortir créant alors un effet de serre. Un liquide caloporteur ou l'air est utilisé afin de récupérer et de transporter la chaleur captée par la surface du panneau thermique vers son point de stockage ou d'utilisation [12].

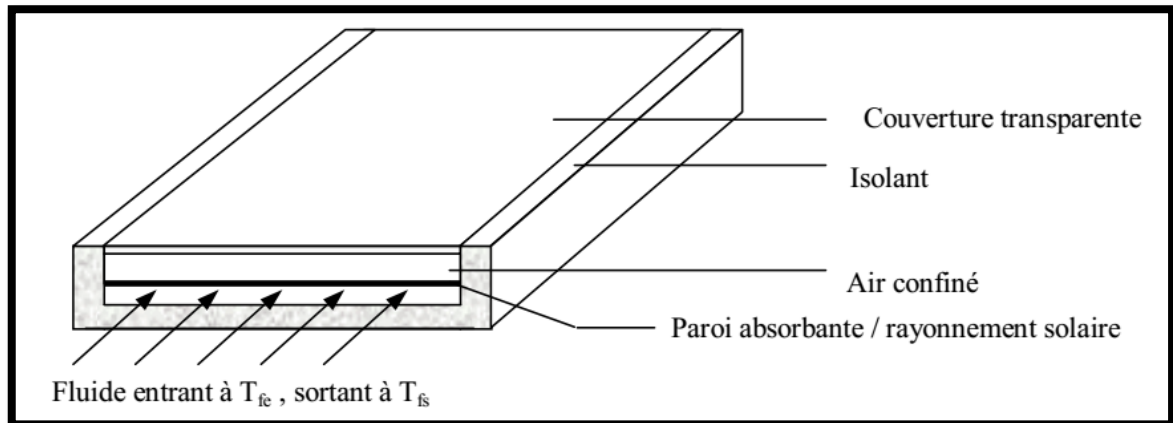


Figure 1. 14 - Schéma de principe d'un capteur solaire plan [13]

1.3.1.2. Les différents types de capteurs solaires plans

Plusieurs types de capteurs existent. Leur utilisation dépendra de la quantité de chaleur qu'on souhaite produire, le type d'installation qu'ils doivent intégrer (centrales, maisons...) et la région dans laquelle on se trouve.

❖ Les capteurs non vitrés

Ce sont les plus simples qui atteignent les niveaux de température les moins élevés et qui sont utilisés principalement pour le chauffage des piscines.



Figure 1. 15 - Capteurs moquette pour le chauffage des piscines [14]

❖ Le capteur à tube sous vide

Un capteur solaire "sous vide" est composé d'une série de tubes transparents en verre de 5 à 15 cm. de diamètre. Dans chaque tube il y a un absorbeur pour capter le rayonnement solaire et un échangeur pour permettre le transfert de l'énergie thermique. Les tubes sont mis sous vide pour éviter les déperditions thermiques convectives de l'absorbeur. Ce dernier subit un traitement sélectif pour empêcher le rayonnement.

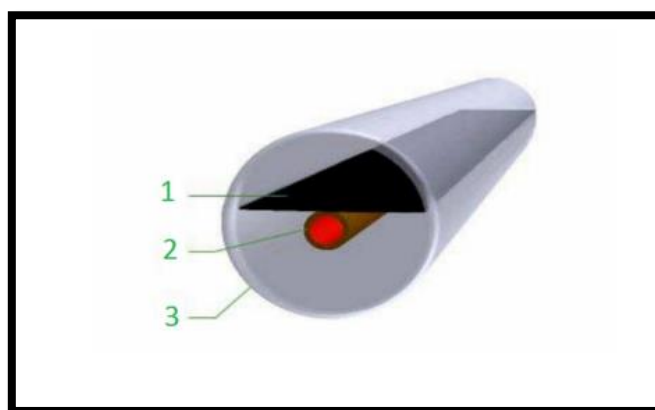


Figure 1. 16 - Capteurs sous vide (1-Absorbeur, 2-Echangeur, 3-Tube) [14]

❖ Le capteur plan vitré

L'application la plus courante du solaire thermique est le chauffe-eau solaire. On peut aussi recourir au solaire thermique pour le chauffage, soit par l'eau soit par l'air (solution la moins chère). Les systèmes solaires sont également utilisés pour le chauffage des piscines, les chauffe-eaux des hôtels, des hôpitaux, le refroidissement de l'air ou de système remplaçant le chauffage (au lieu de l'air conditionné), le dessalement de l'eau de mer dans les endroits où l'eau potable est rare. La figure ci-dessous montre une structure d'un capteur solaire à vitre [14].

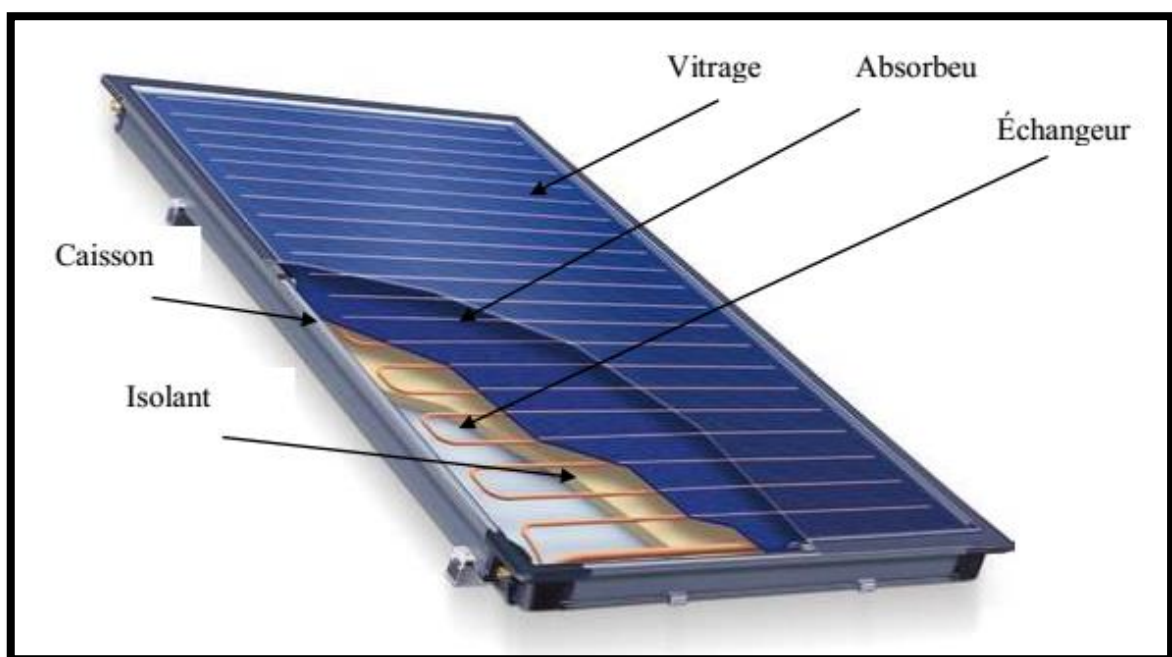


Figure 1. 17 - Capteur Solaire vitré [14]

1.3.2. Les capteurs thermiques à concentration

La concentration du rayonnement solaire permet, pour une surface de capteur donnée, de diminuer la surface de réception effective et donc de minimiser l'influence des pertes thermiques du récepteur. Ainsi la température atteinte après transformation en chaleur est plus élevée que pour des dispositifs à capteurs sans concentration (typiquement capteurs thermiques plans ou panneaux photovoltaïques). Les principaux dispositifs optiques qui permettent de concentrer l'énergie solaire mettent en œuvre des surfaces réfléchissantes

(miroirs). La forme géométrique qui donne la meilleure concentration est la parabole. On rencontre 3 filières : les paraboles à foyer mobile (« dish »), les collecteurs cylindro-paraboliques à foyer linéaire, les systèmes à tour à récepteur central (champ d'héliostats-tour) [15]. La figure ci-dessous présente les différentes technologies de concentrations de l'énergie solaire.

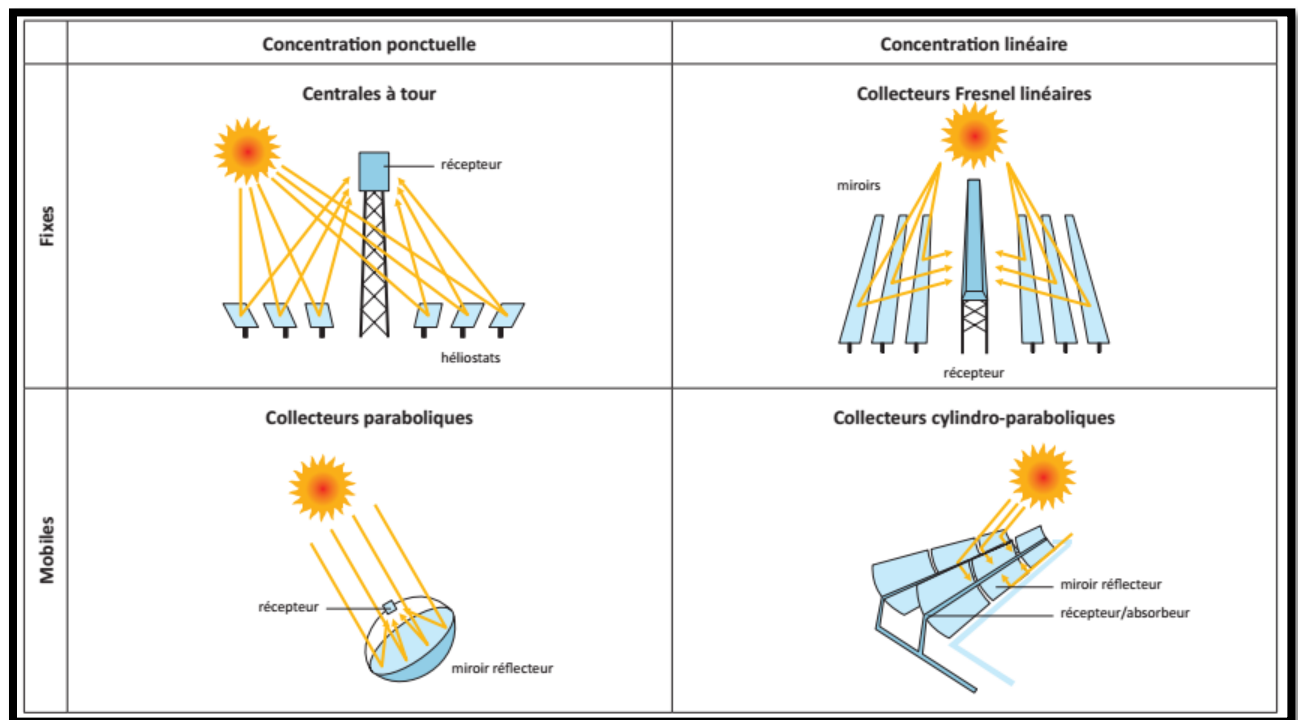


Figure 1. 18 - Différentes technologies de concentrations de l'énergie solaire [16]

1.4. Conclusion

Après une description du principe de fonctionnement des panneaux *PV*, nous avons vu que ces panneaux perdent de l'énergie lorsque leur température augmente. Ceci est dû à l'échauffement des panneaux. Cette chaleur peut être récupérée et utilisée à d'autres fins notamment le chauffage ou la production de froid. On parle alors de panneau photovoltaïque thermique. Dans le chapitre suivant nous allons décrire les panneaux *PVT* et faire une étude bibliographique des travaux déjà réalisés dans ce domaine.

Chapitre 2 : Etudes bibliographiques des capteurs *PVT*

2.1. Introduction

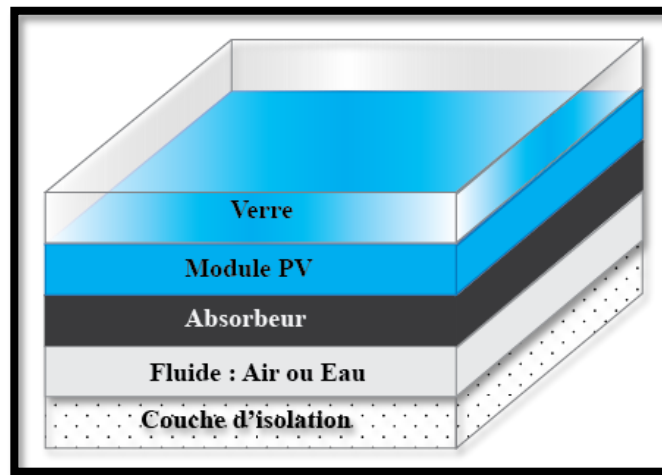
Les capteurs *PVT* permettent de produire simultanément de l'électricité et de la chaleur. Ils sont en général constitués en plus d'un panneau *PV* classique d'un absorbeur sous lequel circule un fluide caloporteur pour la récupération de la chaleur et d'un isolant. Il existe deux types de capteurs *PVT* en fonction du fluide caloporteur utilisé. On parle de capteur *PVT* à eau lorsque le fluide utilisé est l'eau et de capteur *PVT* à air dans le cas où l'air est utilisé. Mais d'autres fluides comme le glycol peuvent être utilisés. La chaleur récupérée dans ces capteurs est en général utilisée pour le chauffage dans les bâtiments. Nous allons, dans les sections suivantes, donner une revue des travaux déjà faits dans le domaine.

2.2. Description d'un capteur *PVT*

La chaleur générée par le fonctionnement des capteurs *PV* classique peut être récupérée en leur adjoignant un absorbeur ainsi qu'un fluide caloporteur. Un capteur *PVT* est constitué de :

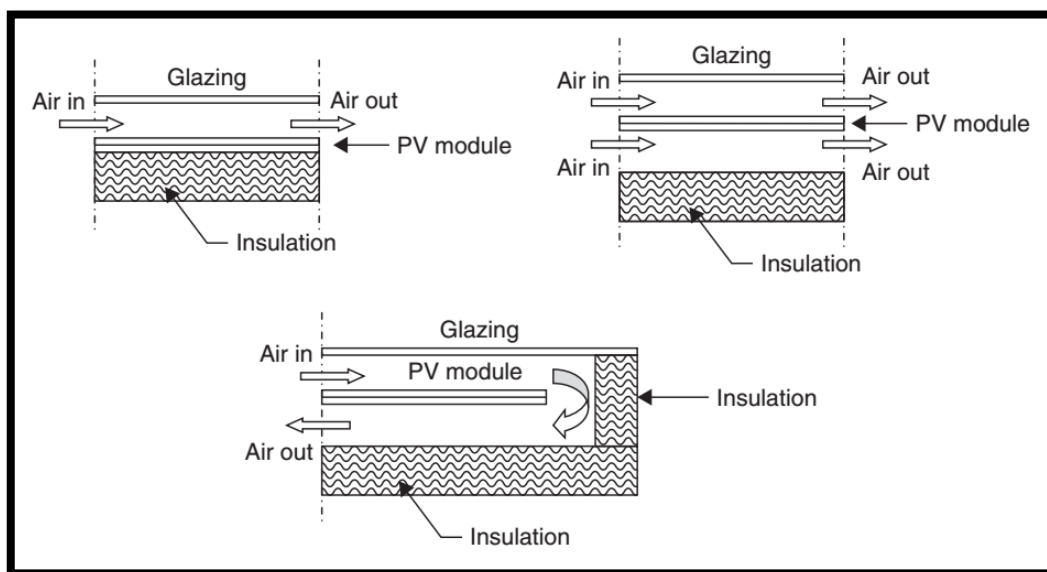
- Un module photovoltaïque classique
- Un absorbeur
- Un isolant
- Un fluide caloporteur

Dans certains cas, une vitre supplémentaire est ajoutée au-dessus du capteur *PV* afin d'en augmenter l'efficacité.

Figure 2. 1 - Structure d'un capteur *PVT*

L'absorbeur permet de récupérer la chaleur dégagée par le module *PV* et cette chaleur est véhiculée par le fluide caloporteur. L'isolant permet de limiter les pertes thermiques par les faces latérales et la face arrière du capteur.

Pour des températures ambiantes inférieures à 20 °C, l'air peut être utilisé comme fluide avec une convection naturelle. Ce système revient moins cher mais devient très vite inefficace avec l'augmentation de la température. Il existe différentes configurations de capteur *PVT* à air comme le montre la figure ci-dessous.

Figure 2. 2 - Détails d'un capteur *PVT* à air [1]

Dans le cas des températures très élevées, il est préférable d'utiliser un liquide caloporteur. On utilise principalement de l'eau en convection forcée qui circule dans des tubes soudés à l'arrière de l'absorbeur. Ceci permet d'avoir un facteur de transfert thermique beaucoup plus élevé que dans le cas des capteurs à air [1].

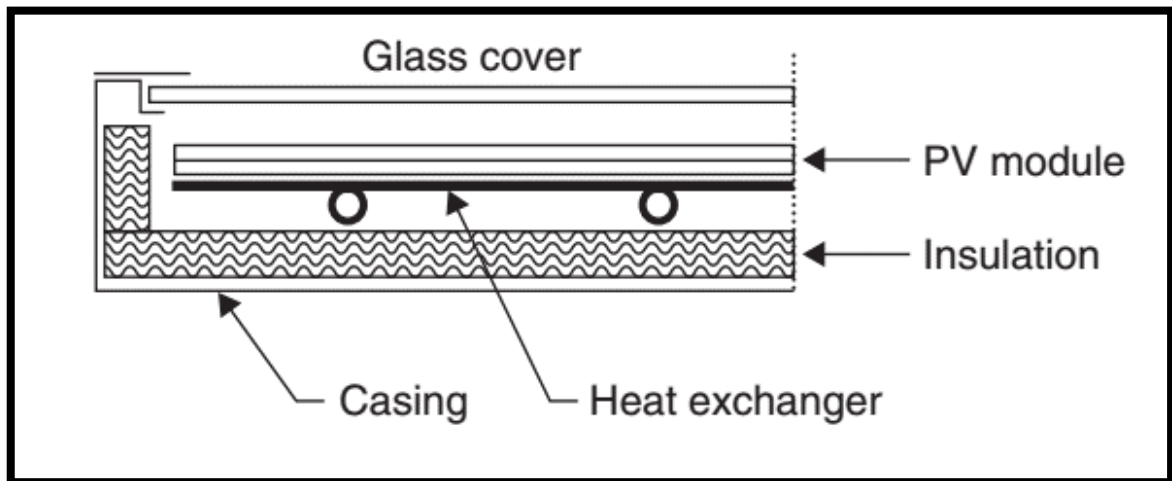


Figure 2. 3 - Détails d'un capteur *PVT* à eau [1]

La chaleur récupérée dans les capteurs *PVT* peut être utilisée dans différents domaines tels que la production d'eau chaude sanitaire, le chauffage du bâtiment et même la climatisation solaire. Dans ce dernier cas, au lieu d'utiliser un capteur thermique comme source d'énergie pour le compresseur thermique et un module *PV* pour les pompes, on utiliserait tout simplement un capteur *PVT* dont l'énergie thermique alimenterait le compresseur thermique et l'énergie électrique alimenterait les pompes et autres accessoires électriques.

2.3. Etude bibliographique

La recherche sur les capteurs solaires *PVT* a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80.

En 2003, Zondag [17] propose un état de l'art sur les capteurs solaires *PVT* hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult. Parmi les premières études recensées par Zondag, certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des

composants et d'autres sur les méthodes de modélisation. Il a comparé le rendement des différentes configurations de capteurs *PVT* existants. Il a aussi étudié l'influence de la température dans des conditions de stagnation du fluide. En l'occurrence il a démontré qu'en Europe lorsque la température du fluide dépasse les 135 °C, les risques de délamination de la couche d'*EVA* dans le module *PV* augmentent énormément. Bien que la stagnation ne soit pas fréquente dans un capteur, une attention particulière devrait être accordée à ce phénomène. [18]

Touafek [19], en 2006 a conçu expérimentalement deux prototypes de capteur solaire *PVT* afin d'en évaluer les performances thermiques et électriques et a comparé ces performances aux performances d'un capteur *PV* témoin. Un des capteurs est recouvert d'une vitre et l'autre non. Il a obtenu un rendement thermique égal à 60 % du capteur hybride sans vitre et de 70 % pour le capteur hybride avec vitre. Le rendement électrique a été amélioré pour le capteur non recouvert par rapport au capteur témoin. Par contre, pour le capteur recouvert, il a été diminué de 18 % par rapport au capteur témoin.



Figure 2. 4 - Banc d'essai du capteur hybride *PVT* [19]

En 2007, Touafek et al. [20] ont mené une étude sur un système de cogénération par des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques destinés à l'habitat. Ils ont présenté la variation des quantités d'énergies électriques et thermiques globales produites par le système *PVT*. La figure ci-dessous montre une description générale de leur système.

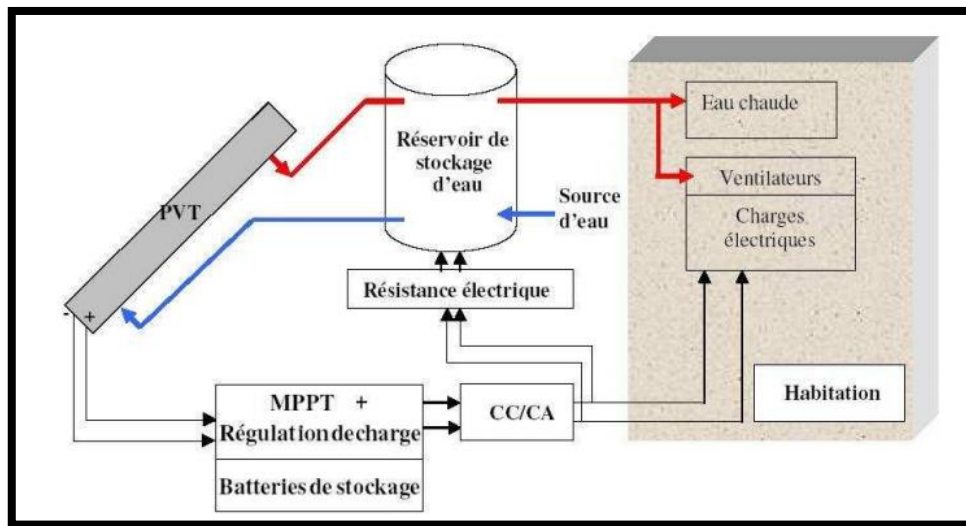


Figure 2. 5 - Schéma générale du système de cogénération à base des capteurs hybrides *PVT* [20]

Ces chercheurs ont estimé l'énergie thermique et l'énergie électrique produites par le système et leur modélisation a donné une production thermique entre 300 et 900 W_{th} entre 08 h et 22 h, c'est pour cela qu'il faut utiliser le stockage par réservoir d'eau pour assurer le fonctionnement pendant l'absence du rayonnement solaire.

DUPEYRAT [21] a étudié les performances énergétiques de capteurs solaires hybrides couplés à un système de production d'eau chaude sanitaire. Il a mis au point un modèle numérique dans l'environnement *TRNSYS* et a démontré qu'une installation intégrant un capteur *PVT* pourrait être compétitive face à des installations solaires standards. Le modèle prend en considération les caractéristiques thermo-physiques et électriques du capteur ainsi que le couplage des phénomènes complexes régissant le comportement thermique et électrique du composant. Les phénomènes principaux régissant le comportement du composant *PVT* sont représentés sur la Figure 2. 6.

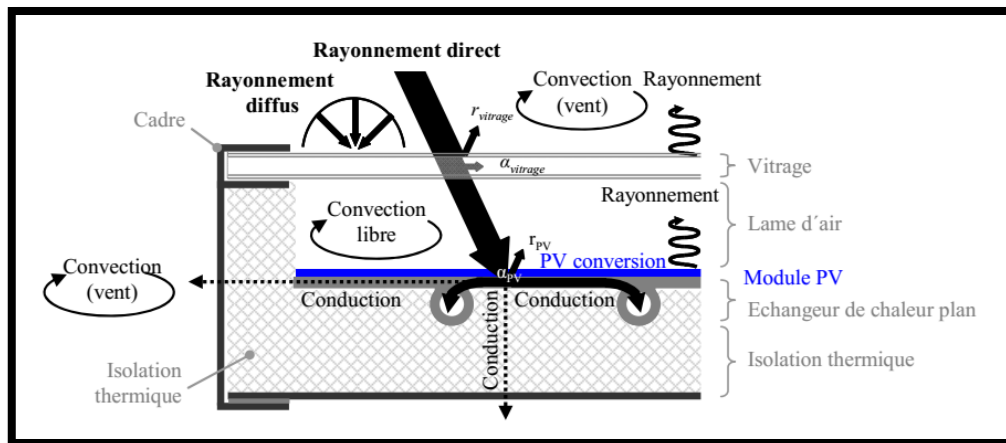


Figure 2. 6 - Représentation schématique d'un capteur *PVT* plan et vitré ainsi que des phénomènes régissant son comportement thermique et électrique [21]

Afin de faire ressortir l'intérêt du capteur hybride, cet auteur a fait une comparaison entre les performances de l'installation *PVT* étudiée et d'installations purement solaire thermique et purement solaire *PV* de même surface (Figure 2. 7)

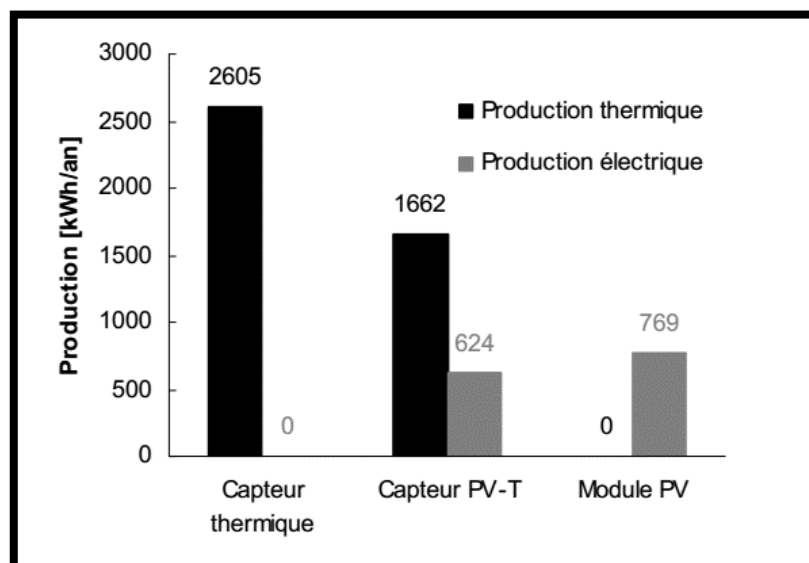


Figure 2. 7 - Production thermiques et électriques annuelles des trois configurations étudiées [21]

Touafek et al. [22] ont en 2008 présenté une étude par simulation numérique sur le comportement thermique des capteurs hybrides à travers l'élaboration de la cartographie

thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique. Les résultats obtenus permettent de dire que le panneau photovoltaïque est un générateur d'énergie calorifique qui peut être exploité pour chauffer de l'eau, ou pour préchauffer l'espace, ou bien encore l'associer avec une pompe à chaleur pour la climatisation.

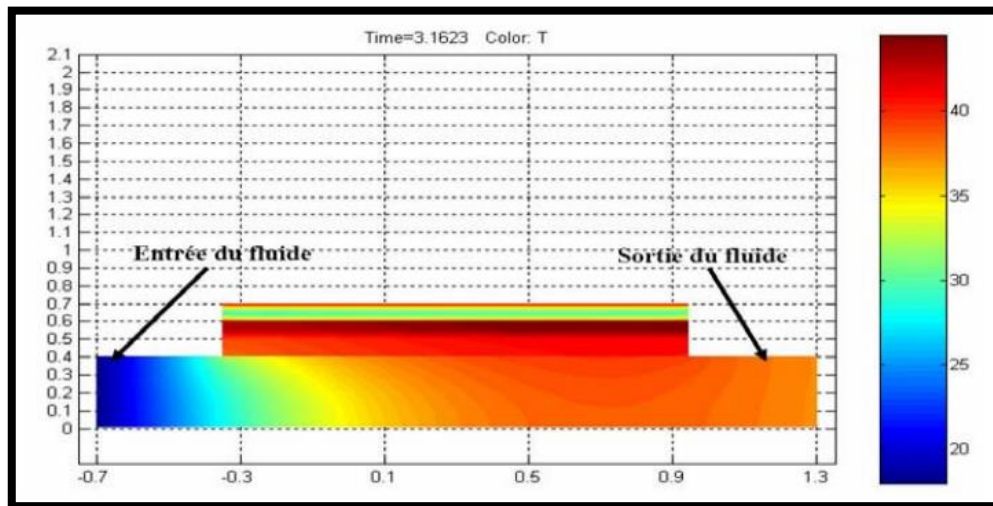


Figure 2. 8 - Distribution de la température dans le capteur hybride [22]

Dans la même année Zondag [23] a, dans une revue sur les capteurs *PVT*, fait l'historique des capteurs à air et à eau et énuméré les différents axes de recherches dans le domaine. Cette revue est une véritable mine d'or sur les sujets d'études des capteurs *PVT*.

En 2012, Khelifa et Touafek [24] ont étudié l'influence des paramètres internes et externes sur les performances électriques et thermiques des capteurs *PVT*. Ils ont prouvé que l'augmentation de la distance entre les tuyauteries du fluide caloporteur et celle de la vitesse du vent favorisent l'évacuation de la chaleur du panneau photovoltaïque. Ceci permet d'améliorer les performances électriques et thermiques de ces capteurs. Les récentes observations de Boulfaf en 2016 contredirait cette conclusion.

En effet Boulfaf [25] a utilisé la méthode des éléments finis afin d'étudier le profil de température des capteurs à air. Il a étudié l'influence de la vitesse du vent sur le capteur et a montré une diminution des performances du capteur avec l'augmentation de la vitesse du vent.

Dans la même optique Boubekri [26] a étudié les performances électriques et thermiques d'un capteur hybride *PVT* à eau. Le modèle mathématique développé est basé sur le phénomène de transfert d'énergie dans les différents composants du capteur. Il a discrétisé les équations de transfert par la méthode des différences finies. Il a pu ainsi mettre en évidence l'impact direct de différents paramètres, notamment l'angle d'inclinaison du capteur et le débit massique d'eau sur l'efficacité totale du capteur. Il a remarqué que l'augmentation de l'angle inclinaison entraîne une diminution de la production électrique du capteur. Par contre l'augmentation du débit massique de l'eau entraîne une augmentation de l'efficacité globale du panneau.

Assoa [27] a réalisé une étude des performances thermiques d'un capteur solaire photovoltaïque thermique hybride à air intégrable au système de ventilation des bâtiments. Le système se compose de modules photovoltaïques comportant une lame d'air isolée pouvant être ventilée ou non en sous-face. Une modélisation en 2D et en régime permanent du composant suivant une approche nodale est tout d'abord présentée. Ces résultats numériques sont validés à partir d'une étude expérimentale menée sur une maquette soumise à un simulateur solaire, en conditions d'ensoleillement contrôlées.

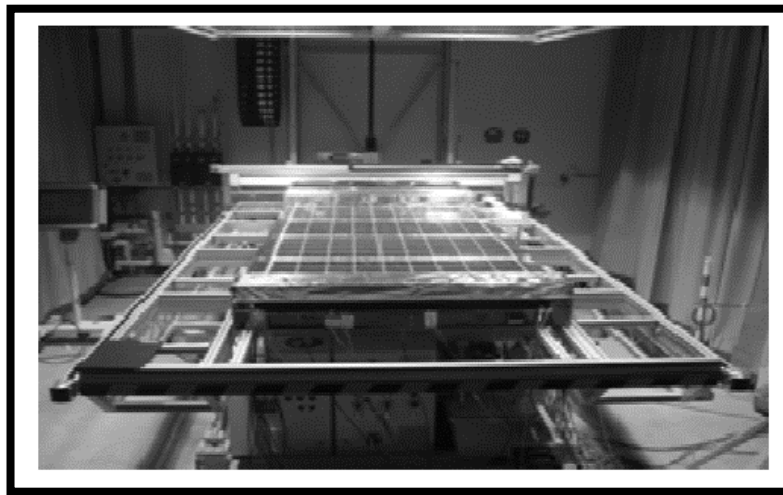


Figure 2. 9 - Maquette sous le banc d'ensoleillement artificiel [27]

Ghellab [28] a réalisé en 2013 une étude technico-économique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique à air, où il a évalué l'effet de la variation de la vitesse du vent et

de l'épaisseur du canal d'air sur les différents rendements, tout comme l'évolution de la fonction coût/rendement, en prenant différents types d'isolants.

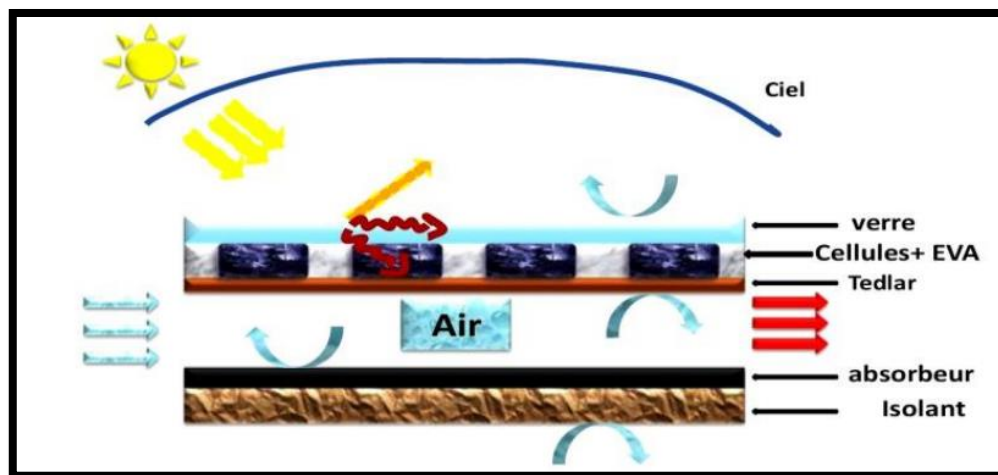


Figure 2. 10 - Coupe transversale dans un capteur hybride PVT à air [28]

La simulation a été réalisée en prenant comme lieu la région de Jijel et comme jour le 10 Juillet. Il a constaté que la croissance de la vitesse du vent ou bien l'élévation de la profondeur du canal d'air font diminuer les rendements thermique et global du système comme le montrent les figures ci-dessous. Il a aussi déterminé une épaisseur optimale d'isolant de 0,1 m.

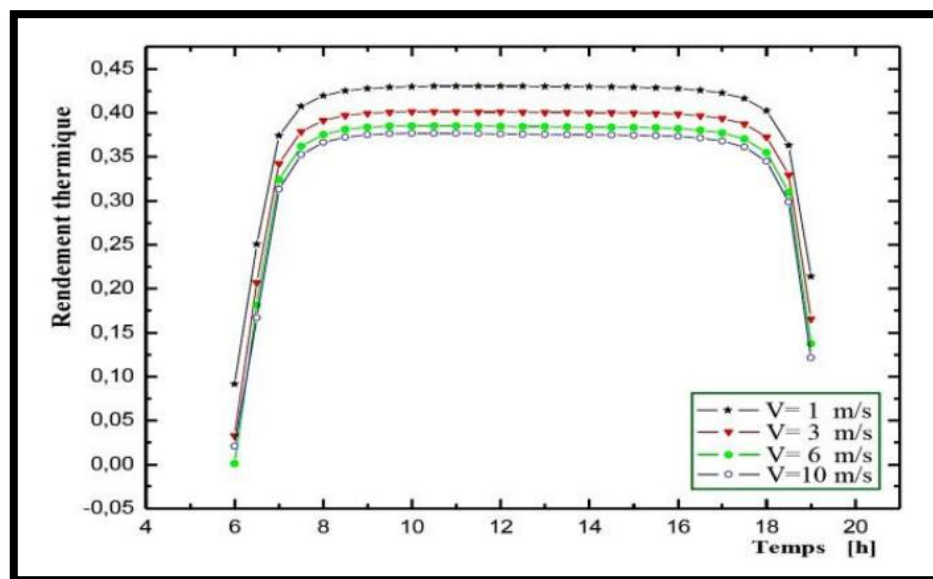


Figure 2. 11 - Variation du rendement thermique avec la vitesse du vent [28]

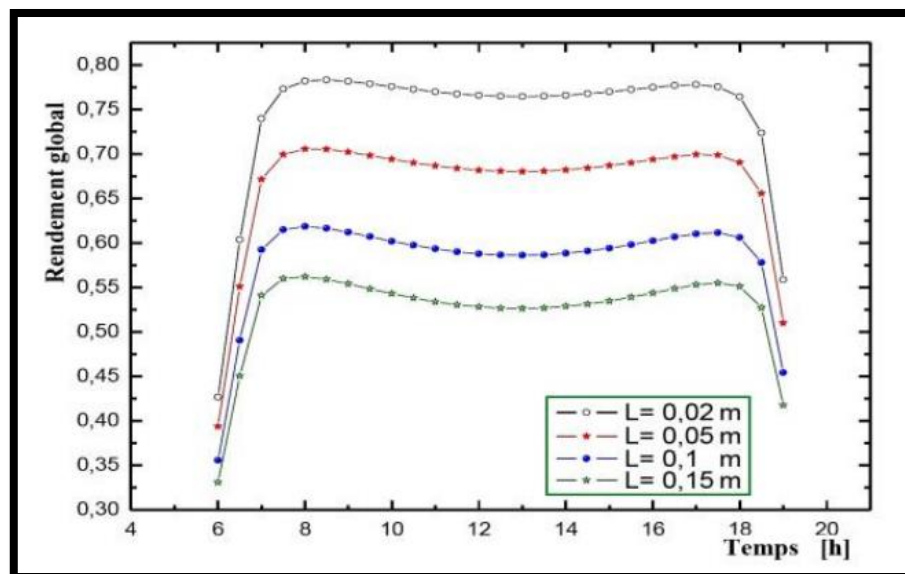


Figure 2. 12 - Variation du rendement global avec l'épaisseur du canal d'air [28]

Ben Cheikh El Hocine et Marir-Benabbas [29] ont développé un concept de capteur hybride photovoltaïque thermique qui consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Il est caractérisé par une combinaison sandwich séparant air et eau. Le fluide caloporteur est canalisé, ce qui permet une circulation forcée. La face inférieure est isolée et ne comporte pas d'absorbeur.

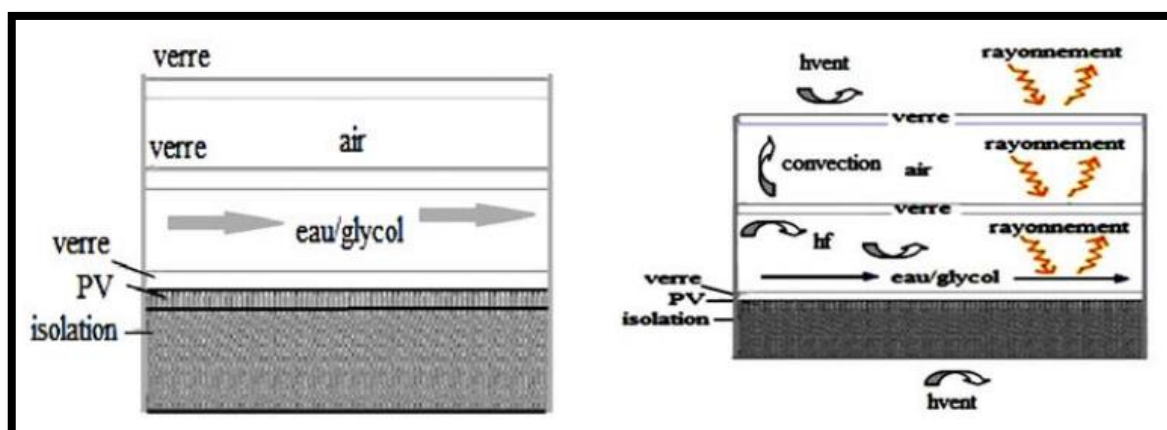


Figure 2. 13 - Prototype de capteur PVT [29]

En 2015, Nemati, Vadiee et Yaghoubi [30] ont réalisé une étude exergetique et économique d'un capteur *PVT* commercialisé dans différentes conditions climatiques de

l'Iran. L'étude exergetique est utilisée afin de déterminer non seulement la quantité d'énergie produite mais aussi sa qualité. Une modélisation du système sur *Matlab* et *TRNSYS* leur a permis de montrer que le système est économiquement viable surtout dans les zones marginalisées. Ils ont prouvé que les performances d'un système *PVT* sont extrêmement liées aux conditions climatiques et financières de la zone d'implantation.

Toujours en 2015, Ben Cheik El Hocine [31] a validé un modèle empirique de capteur *PVT* à air et à eau. Il a développé un modèle thermique afin d'évaluer les paramètres thermiques d'un capteur *PVT* tel que la température de sortie du fluide, la température de la cellule *PV*, l'efficacité thermique et la chaleur utile récupérable. Une amélioration du capteur est proposée en effectuant une correction sur le coefficient d'échange global du capteur. Il a prouvé que l'utilisation de l'acier galvanisé comme matériau absorbeur est plus économiquement rentable que l'utilisation du cuivre. Le modèle thermique utilisé est représenté sur la figure ci-dessous. Un rendement thermique de 54,51 % a été atteint pour le capteur *PVT* à eau et 16,24 % pour celui à air. L'efficacité électrique est de l'ordre de 11,12 % dans les deux cas.

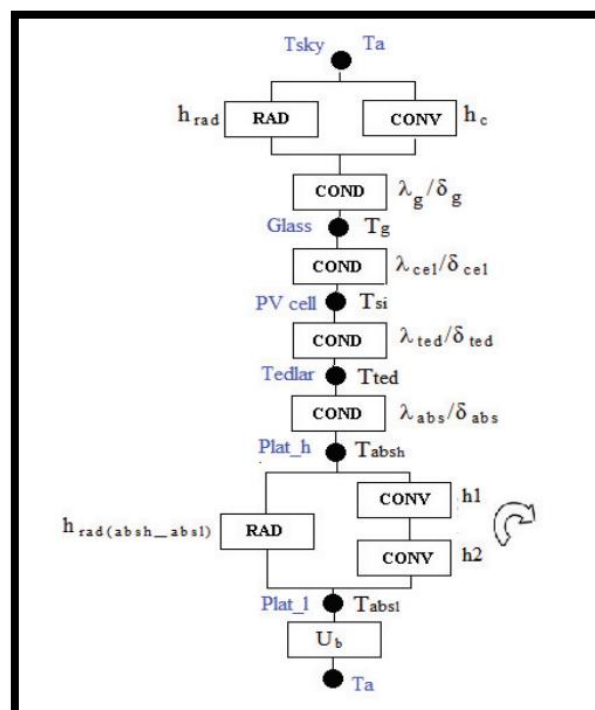


Figure 2. 14 - Diagramme simplifié d'un nouveau capteur *PVT* [31]

Encore en 2015, Khelifa [32] a analysé un capteur *PVT* en utilisant la dynamique calculatoire des fluides (*CFD*) pour une meilleure compréhension des transferts thermiques dans ce genre de système. A cet effet, il a utilisé deux logiciels. *ANSYS 14* a été utilisé pour étudier le mouvement du fluide et les transferts thermiques dans le capteur. Le second logiciel utilisé est *FLUENT* qui a servi à modéliser les transferts thermiques entre les cellules et le fluide. Il a trouvé grâce à ces logiciels les profils de température en 3D du capteur comme le montre la Figure 2. 15

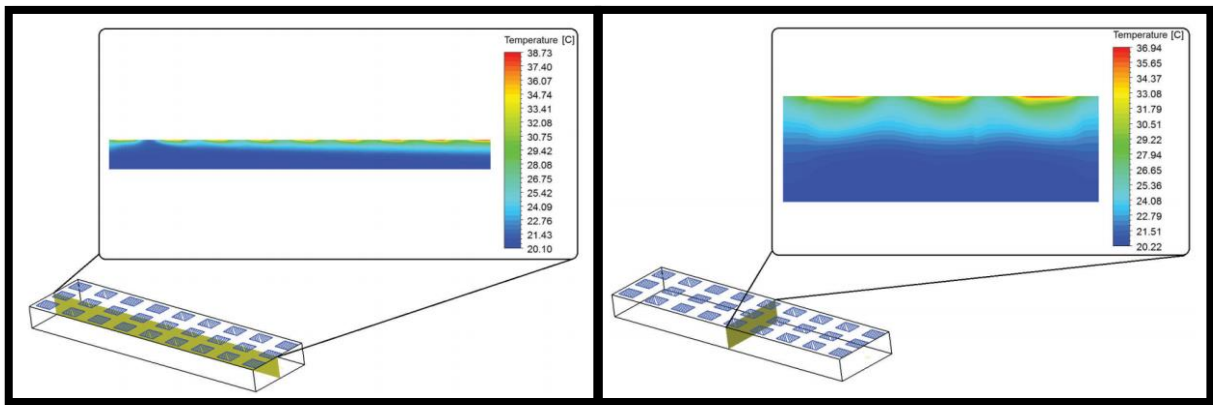


Figure 2. 15 - Distribution 3D de température dans le capteur *PVT* [32]

Noughlega et al. [33] ont récemment fait l'analyse des performances thermiques et électriques de deux types de capteurs solaires hybrides *PVT* à air intégrables en toitures des bâtiments. Deux modèles sont proposés :

- Dans le premier modèle, les cellules *PV* sont isolées avec une lame d'air confinée et
- Dans le second modèle, l'isolation est faite avec un gap vide.

Ils ont effectué la modélisation des transferts de chaleur dans les systèmes en 2D et en régime transitoire suivant l'approche nodale. Ils ont démontré que le capteur hybride *PVT* sous vide est thermiquement plus performant que celui avec la lame d'air confinée. Un débit optimal maintenu par un ventilateur permet aussi de le rendre électriquement performant.

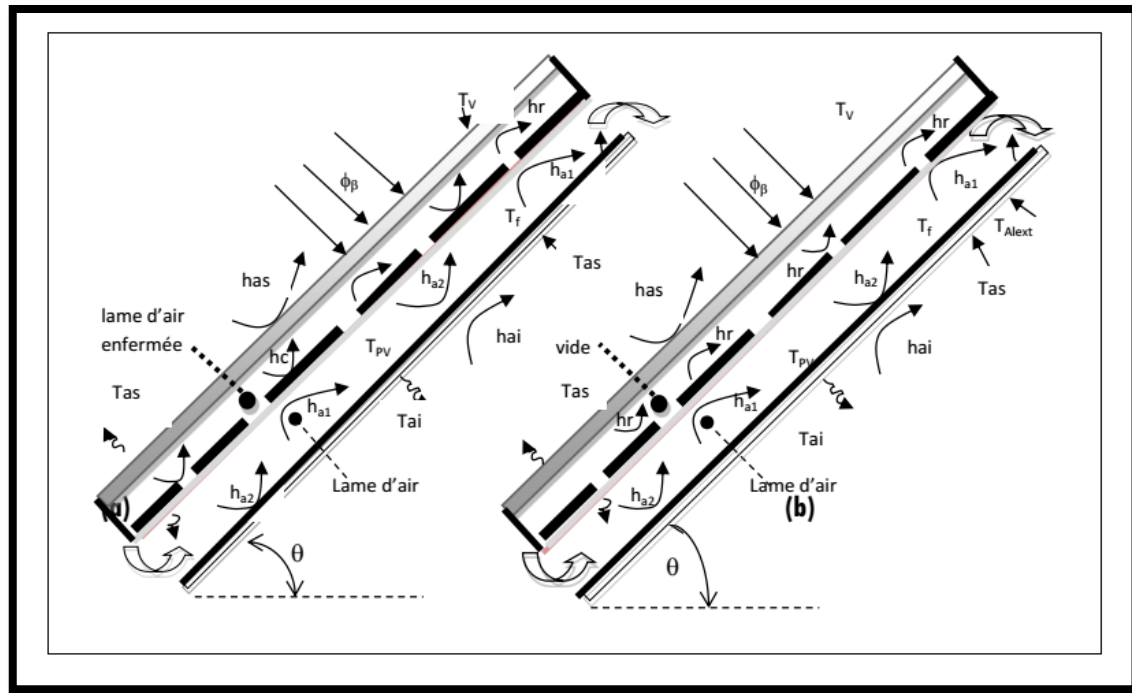


Figure 2. 16 - Capteur hybride photovoltaïque-thermique avec lame d'air enfermée (a) et sous vide (b) [33]

2.4. Conclusion

Au vu de cette synthèse bibliographique nous voyons l'intérêt d'étudier et de maîtriser le fonctionnement d'un capteur hybride *PVT*. La plupart des études menées par le passé utilisent l'énergie thermique récupérée pour le chauffage. Nous pensons utiliser cette énergie pour la production de froid pour nos prochaines études. Mais dans ce document nous allons dans le prochain chapitre faire une simulation d'un capteur *PVT* en régime permanent afin de déterminer les performances énergétiques des capteurs *PVT* dans la zone subtropicale.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation du capteur PVT à eau

3.1. Introduction

La modélisation informatique est la capacité de simuler numériquement l'évolution des phénomènes physiques de grande ampleur. Cette méthode s'avère très utile dans le domaine énergétique. Dans notre cas présent, en l'absence d'un prototype expérimental, nous allons utiliser cette méthode pour évaluer les différents paramètres de fonctionnement d'un capteur hybride. Le modèle étudié est un capteur *PVT* à eau puisque la zone d'étude est la ville de Ouagadougou avec des températures locales très élevées.

Les capteurs solaires hybrides *PVT* sont des capteurs qui en plus de produire de l'électricité fournissent de la chaleur. Ils ont donc à la fois le comportement d'un capteur *PV* classique superposé au comportement d'un capteur thermique plan simple vitrage.

3.2. Eléments de conception et mode de fonctionnement

Un capteur hybride *PVT* à eau est constitué du haut vers le bas de :

- Un module *PV*
- Une plaque absorbante (absorbeur)
- Tubes de circulation de l'eau
- Une couche d'isolant en face arrière.

3.2.1. Le panneau *PV*

Le panneau *PV* regroupe la vitre en face avant, la couche de cellules *PV* et une couche de tedlar. Il permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Son rapport de conversion étant faible une grande partie de cette énergie est convertie en chaleur et transmise à la couche de tedlar. Dans un panneau *PV* classique la couche de tedlar est en contact avec

l'air ambiant qui le refroidit. Mais dans les hybrides, cette couche de tedlar est en contact avec une plaque absorbante.

3.2.2. La plaque absorbante et le fluide caloporteur

La plaque absorbante reçoit la chaleur produite par le panneau et se charge de la transmettre à l'eau à travers un système de tubes soudés sous la plaque et de même nature que cette dernière. La nature de la plaque reste déterminante pour l'efficacité du système. Nous utiliserons de l'acier galvanisé dont les avantages (meilleure absorption de chaleur et coût de production faible) ont été démontrés par Ben Cheik El Hocine et al. [31]. Les propriétés physiques de l'acier galvanisé sont données dans le Tableau 3. 1.

Tableau 3. 1 - Propriétés physiques de l'acier galvanisé

Métal	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur massique (J/kg.K)	Masse volumique (kg/m ³)
Acier galvanisé	65	465	7833

3.2.3. L'isolant

Comme dans tout système thermique, l'isolant permet d'éviter les pertes de chaleur dans l'air ambiant. Il doit être choisi de manière à ce que sa température extérieure avoisine la température ambiante. L'isolant que nous avons choisi est la laine de verre dont les propriétés physiques sont données dans le Tableau 3. 2.

Tableau 3. 2 - Propriétés physiques de la laine de verre

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg.K)
Laine de verre	0,036	40	840

3.3. Modèle utilisé

Les figures Figure 3. 1 et Figure 3. 2 montrent la représentation géométrique du capteur hybride ainsi que les paramètres utilisés pour exprimer les différentes températures.

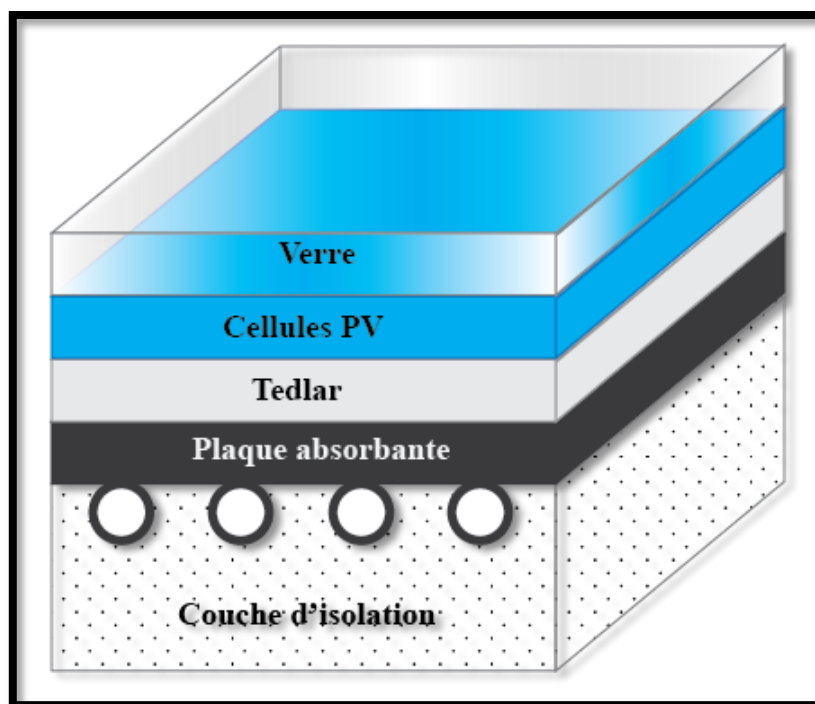


Figure 3. 1 - Modèle de capteur PVT

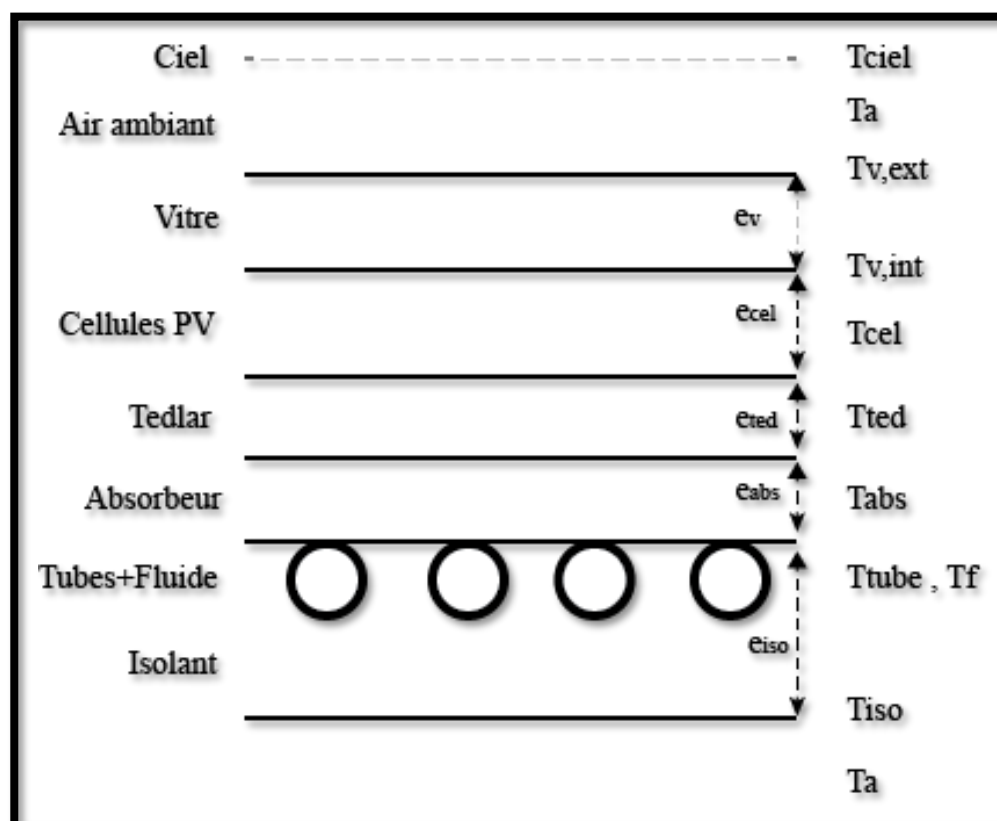


Figure 3. 2 - Température des différents éléments du capteur

Où :

- T_{ciel} : Température du ciel
- T_a : Température ambiante
- $T_{v,ext}$: Température de la face extérieure de la vitre
- $T_{v,int}$: Température de la face intérieure de la vitre
- T_{cel} : Température des cellules PV
- T_{ted} : Température de la couche de tedlar
- T_{abs} : Température de la plaque absorbante
- T_{tube} : Température des tubes
- T_f : Température du fluide
- T_{iso} : Température de la face extérieure de l'isolant

3.4. Bilan thermique du capteur

Le but de l'étude est de déterminer les températures des différentes couches ainsi que l'énergie électrique et l'énergie thermique produites et les rendements correspondants. Les équations de bilan qui sont décrites ci-dessous sont des équations de transfert de chaleur en régime transitoire. Le principe de conservation de l'énergie sera utilisé pour chaque élément. Il est représenté par une équation bilan de la forme suivante :

$$\text{Variation de l'Energie Interne} = \text{Energie Reçue} - \text{Energie Perdue}$$

Ce bilan sous forme mathématique donne pour un élément i :

$$m_i C_{p_i} \frac{dT_i}{dt} = Q_{recue} - Q_{perdue} \quad (3. 1)$$

3.4.1. La face extérieure de la vitre

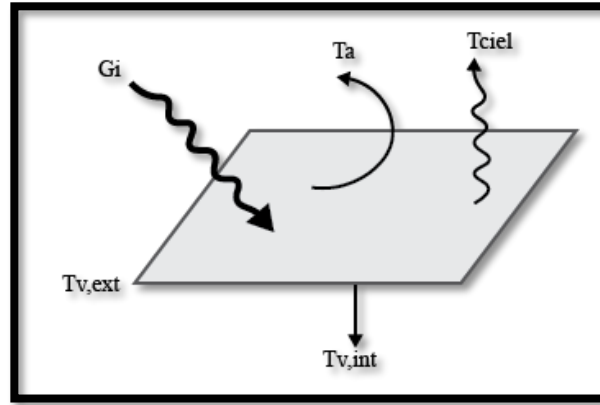


Figure 3. 3 - Echanges thermiques sur la face externe de la vitre

La face extérieure de la vitre reçoit de l'énergie solaire. Il en perd une partie par convection avec l'environnement, une autre partie par rayonnement avec le ciel et transmet une partie par conduction à sa face intérieure. On a :

$$m_v C p_v \frac{dT_{v,ext}}{dt} = G_{v,ext} - Q_{v-a}^{conv} - Q_{v-ciel}^{ray} - Q_v^{cond} \quad (3. 2)$$

✓ $G_{v,ext}$ est la puissance solaire incidente sur le capteur solaire (W/m^2)

Il est donné par :

$$G_{v,ext} = A_v \times G_i \quad (3. 3)$$

- A_v : surface du capteur ou de la vitre (m^2)
- G_i : flux solaire incident sur le capteur (W/m^2)

✓ Q_{v-a}^{conv} est l'énergie perdue par convection dans l'environnement

$$Q_{v-a}^{conv} = h_{v-a}^{conv} A_v (T_{v,ext} - T_a) \quad (3. 4)$$

- h_{v-a}^{conv} est le coefficient de transfert convectif ($W/m^2.K$). Il se calcule par la corrélation donnée par Duffie et Beckman [34].

$$h_{v-a}^{conv} = 2,8 + 3V_{vent} \quad (3. 5)$$

V_{vent} : vitesse du vent (m/s)

✓ Q_{v-ciel}^{ray} est l'énergie perdue par rayonnement vers le ciel

$$Q_{v-c}^{ray} = \varepsilon_v \sigma A_v (T_{v,ext}^4 - T_{ciel}^4) \quad (3.6)$$

- ε_v : l'émissivité du verre
- σ : constante de Boltzmann
- T_{ciel} : température du ciel (K). Elle se calcule de façon empirique par la formule :

$$T_{ciel} = 0,0552 T_a^{1,5} \quad (3.7)$$

✓ Q_v^{cond} est l'énergie transmise par conduction à la face intérieure de la vitre

$$Q_v^{cond} = h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) \quad (3.8)$$

$$h_v^{cond} = \frac{\lambda_v}{e_v} \quad (3.9)$$

- λ_v : conductivité thermique du verre (W/m.K)
- e_v : épaisseur du verre (m)

Le bilan énergétique de la face extérieure de la vitre devient alors:

$$m_v C_p \frac{dT_{v,ext}}{dt} = A_v G_i - h_{v-a}^{conv} A_v (T_{v,ext} - T_a) - \varepsilon_v \sigma A_v (T_{v,ext}^4 - T_{ciel}^4) - h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) \quad (3.10)$$

3.4.2. La face intérieure de la vitre

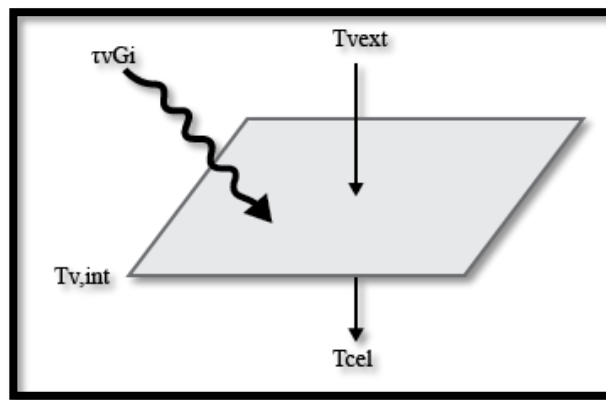


Figure 3. 4 - Echanges thermiques sur la face intérieure de la vitre

Les échanges sur la face intérieure de la vitre se traduisent par :

$$m_v C p_v \frac{dT_{v,int}}{dt} = G_{v,int} + Q_v^{cond} - Q_{cel}^{cond} \quad (3.11)$$

$$m_v C p_v \frac{dT_{v,int}}{dt} = A_v G_i \tau_v + h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) - h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) \quad (3.12)$$

$$h_{cel}^{cond} = \frac{\lambda_{cel}}{e_{cel}} \quad (3.13)$$

- λ_{cel} : conductivité thermique des cellules (W/m.K)
- e_v : épaisseur des cellules (m)

3.4.3. La cellule solaire

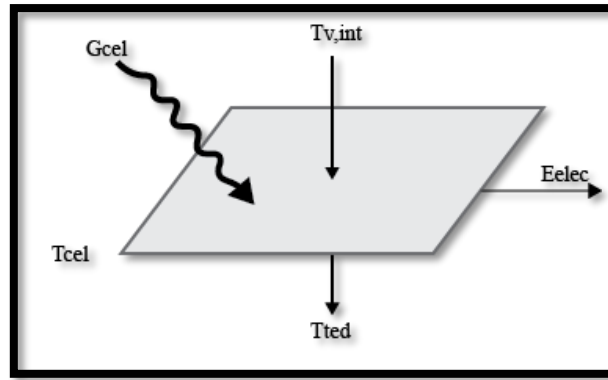


Figure 3. 5 - Echanges énergétiques dans les cellules solaires

Dans la cellule solaire, en plus de l'énergie transmise par conduction à la couche de tedlar, on soustrait à l'énergie reçue, la production électrique du panneau.

$$m_{cel} C p_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = G_{cel} + Q_{cel}^{cond} - Q_{ted}^{cond} \quad (3.14)$$

$$G_{cel} = A_v G_i \tau_v \alpha_{cel} - E_{elec} = A_v G_i (\tau_v \alpha_{cel} - \eta_{PV}) \quad (3.15)$$

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{cel} - T_{ref})] \quad (3.16)$$

- η_{PV} : rendement électrique de la cellule
- β_{ref} : coefficient de température du rendement
- α_{cel} : absorptivité de la cellule

On a alors :

$$m_{cel}Cp_{cel}\frac{dT_{cel}}{dt} = A_v G_i (\tau_v \alpha_{cel} - \eta_{PV}) + h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) - h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) \quad (3.17)$$

$$h_{ted}^{cond} = \frac{\lambda_{ted}}{e_{ted}} \quad (3.18)$$

- λ_{ted} : conductivité thermique du tedlar (W/m.K)
- e_{ted} : épaisseur du tedlar (m)

3.4.4. La couche de tedlar

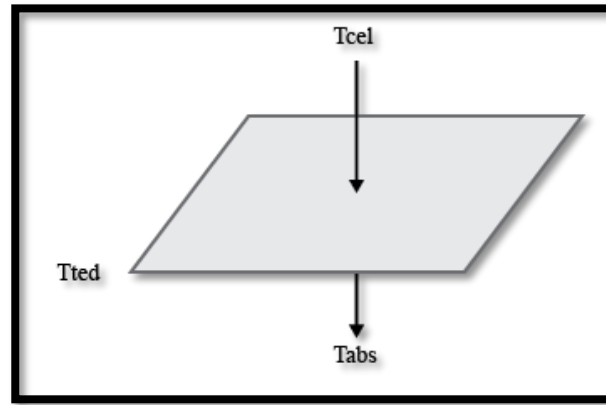


Figure 3. 6 - Echanges thermiques dans la couche de tedlar

Dans la couche de tedlar on a :

$$m_{ted}Cp_{ted}\frac{dT_{ted}}{dt} = Q_{ted}^{cond} - Q_{abs}^{cond} \quad (3.19)$$

$$m_{ted}Cp_{ted}\frac{dT_{ted}}{dt} = h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) - h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) \quad (3.20)$$

$$h_{abs}^{cond} = \frac{\lambda_{abs}}{e_{abs}} \quad (3.21)$$

- λ_{abs} : conductivité thermique de l'absorbeur (W/m.K)
- e_{abs} : épaisseur de l'absorbeur (m)

3.4.5. La plaque absorbante (absorbeur)

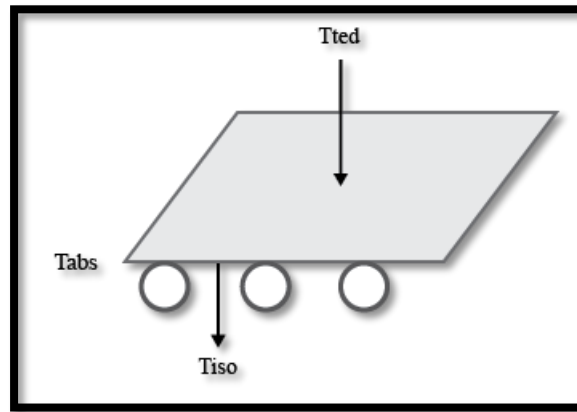


Figure 3. 7 - Echanges thermiques dans l'absorbeur

Les échanges dans la plaque absorbante sont comme suit :

$$m_{abs} C p_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = Q_{abs}^{cond} - Q_{tube}^{cond} - Q_{iso}^{cond} \quad (3. 22)$$

$$m_{abs} C p_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) - h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) - h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{abs} - T_{iso}) \quad (3. 23)$$

La figure ci-dessous représente la géométrie du contact entre la plaque absorbante et les tubes.

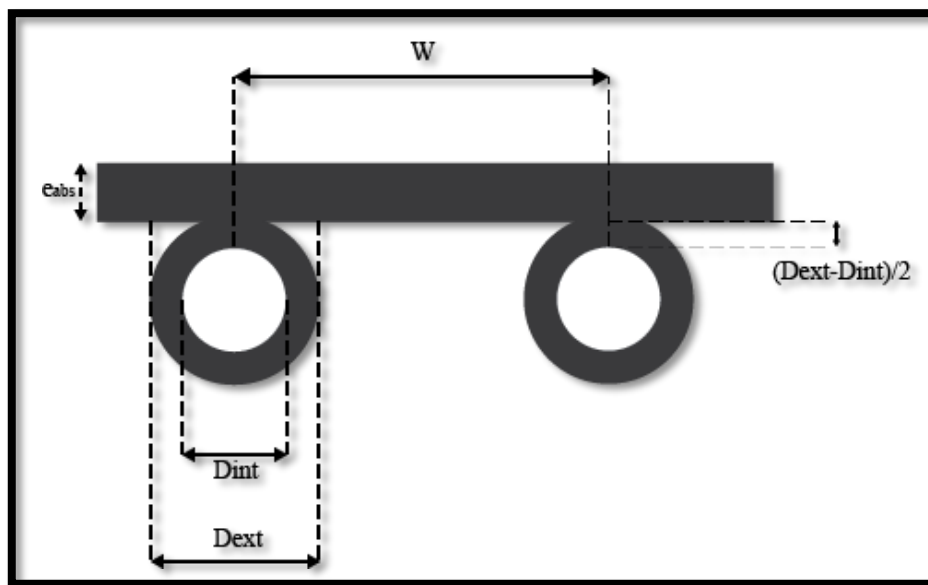


Figure 3. 8 - Coupe géométrique du contact entre l'absorbeur et les tubes

On fait l'hypothèse que la température de l'absorbeur reste constante dans la partie située au-dessus d'une tuyauterie, c'est-à-dire une longueur D_{ext} (Voir Figure 3. 8). La température de la plaque n'est donc supposée varier que sur une longueur égale à $W - D_{ext}$ séparant deux tuyauteries [35]. On a lors les différentes valeurs des coefficients de transferts et des surfaces utilisées dans la formule précédente.

$$h_{tube}^{cond} = \left(\frac{e_{abs}}{\lambda_{abs}} + \frac{\frac{D_{ext} - D_{int}}{2}}{\lambda_{abs}} \right)^{-1} \quad (3. 24)$$

$$A_{abs-tube} = A_v \frac{W - D_{ext}}{W} \quad (3. 25)$$

$$A_{abs-iso} = A_v \left(1 - \frac{W - D_{ext}}{W} \right) \quad (3. 26)$$

$$h_{iso}^{cond} = \frac{\lambda_{iso}}{e_{iso}} \quad (3. 27)$$

- λ_{iso} : conductivité thermique de l'isolant (W/m.K)
- e_{iso} : épaisseur de l'isolant (m)

3.4.6. Le tube

Les tubes reçoivent la chaleur de l'absorbeur et l'échange avec le fluide ainsi que l'isolant

$$m_{tube} C_{p_{tube}} \frac{dT_{tube}}{dt} = Q_{tube}^{cond} - Q_f^{cond} - Q_{iso}^{cond} \quad (3. 28)$$

$$m_{tube} C_{p_{tube}} \frac{dT_{tube}}{dt} = h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) - h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) - h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) \quad (3. 29)$$

$$A_{tube-iso} = \frac{D_{ext}}{2} \pi L \quad (3. 30)$$

$$A_{tube-f} = D_{int} \pi L \quad (3. 31)$$

$$h_f^{conv} = \frac{\lambda_f Nu}{D_{int}} \quad (3. 32)$$

- λ_f : conductivité thermique du fluide (W/mK)
- Nu : nombre de Nusselt

$$Nu = \begin{cases} 4,36, & \text{si } Re \leq 2300 \\ 0,023Re^{0,8}Pr^{0,33}, & \text{si } Re > 2300 \end{cases} \quad (3.33)$$

- Re : nombre de Reynolds

$$Re = \frac{VD_{int}}{\nu} \quad (3.34)$$

- V : vitesse de l'eau dans le tube
- ν : viscosité cinématique

3.4.7. Le fluide dans le tube

La variation de la température de sortie du fluide est régie par :

$$m_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = Q_f^{cond} + q'_u \quad (3.35)$$

q'_u : représente la quantité de chaleur absorbée par le fluide par mètre de longueur du tube.

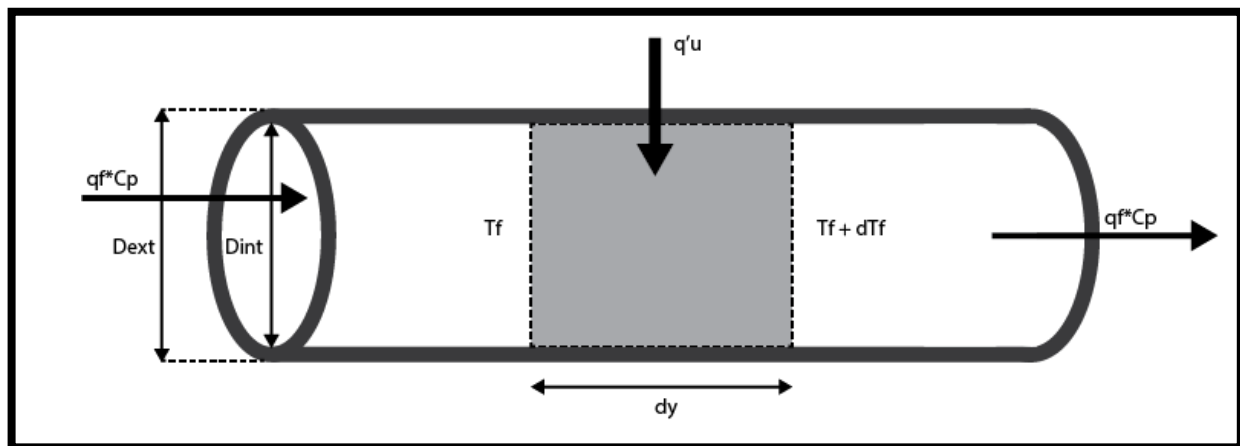


Figure 3. 9 - Bilan thermique d'un volume élémentaire de fluide

Elle est donnée par la résolution de l'équation de la chaleur en régime permanent [1].

$$\dot{m} C_{p_f} dT_f = q'_u dy \quad (3.36)$$

$$q'_u = NWF[S - K(T_f - T_a)] \quad (3.37)$$

N est le nombre de tubes. K est le coefficient global d'échange, F , le rendement d'irrigation, et S le rayonnement solaire utilisable. Les transferts sont alors représentés par :

$$m_f C_{p_f} \frac{dT_f}{dt} = h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) + nWF[S - K(T_f - T_a)] \quad (3.38)$$

3.4.8. La couche d'isolant

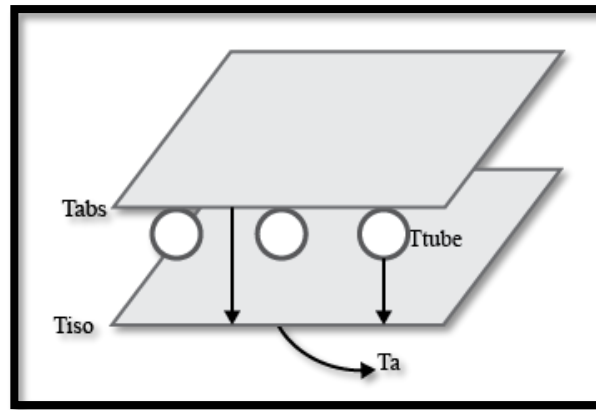


Figure 3.10 - Echanges thermiques dans la couche d'isolant

Les transferts dans la couche d'isolant sont traduits par la relation suivante :

$$m_{iso} C_{p_{iso}} \frac{dT_{iso}}{dt} = h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) + h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{abs} - T_{iso}) - h_{iso}^{conv} (T_{iso} - T_a) \quad (3.39)$$

$$h_{v-a}^{conv} = 2,8 + 3V_{vent} \quad (3.40)$$

3.5. Bilan énergétique du capteur

3.5.1. Chaleur utile transférée au fluide

La chaleur utile récupérable dans un capteur hybride se donne par la même formule que celle des capteurs thermiques plans. On a donc :

$$Q_{utile} = A_v F_t [S - K(T_{fe} - T_a)] \quad (3.41)$$

Le rayonnement solaire utilisable pour le système thermique est réduit par rapport au cas d'un capteur thermique seul puisqu'une partie est convertie en électricité par les cellules PV [31]. Ce qui nous donne le coefficient $(\tau\alpha)_{eff}$

$$S = (\tau\alpha)_{eff} G_i = \left(\tau_v \alpha_{cel} - \tau_v \eta_{PV} \frac{A_{active}}{A_v} \right) G_i \quad (3.42)$$

- A_{active} : Surface réelles de captation des cellules PV.

Le facteur de transfert thermique F_t est donné :

$$F_t = \dot{m}_f C_{p_f} \left[1 - \exp \left(- \frac{FK}{\dot{m}_f C_{p_f}} \right) \right] \quad (3.43)$$

Il représente le rapport du flux thermique réel reçu par le fluide sur celui qui serait récupéré si la surface absorbante était isotherme [35].

- F est le rendement d'irrigation

$$F = \frac{1}{K} W \left\{ \frac{1}{h_f^{conv} \pi D_{int}} + \frac{1}{K[D_{ext} + (W - D_{ext})F']} \right\}^{-1} \quad (3.44)$$

Il correspond au rapport de la résistance thermique absorbeur-air ambiant sur la résistance thermique fluide-air ambiant.

$$F' = \frac{\tanh \left(m \frac{W - D_{ext}}{2} \right)}{m \frac{W - D_{ext}}{2}} \quad (3.45)$$

$$m = \sqrt{\frac{K}{\lambda_{abs} e_{abs}}} \quad (3.46)$$

Le coefficient K est le coefficient d'échange global du système. Il englobe les pertes en avant, en arrière et sur les faces latérales du système. Dans notre cas, on suppose que les surfaces latérales sont bien isolées. Le schéma suivant montre le schéma électrique équivalent du système.

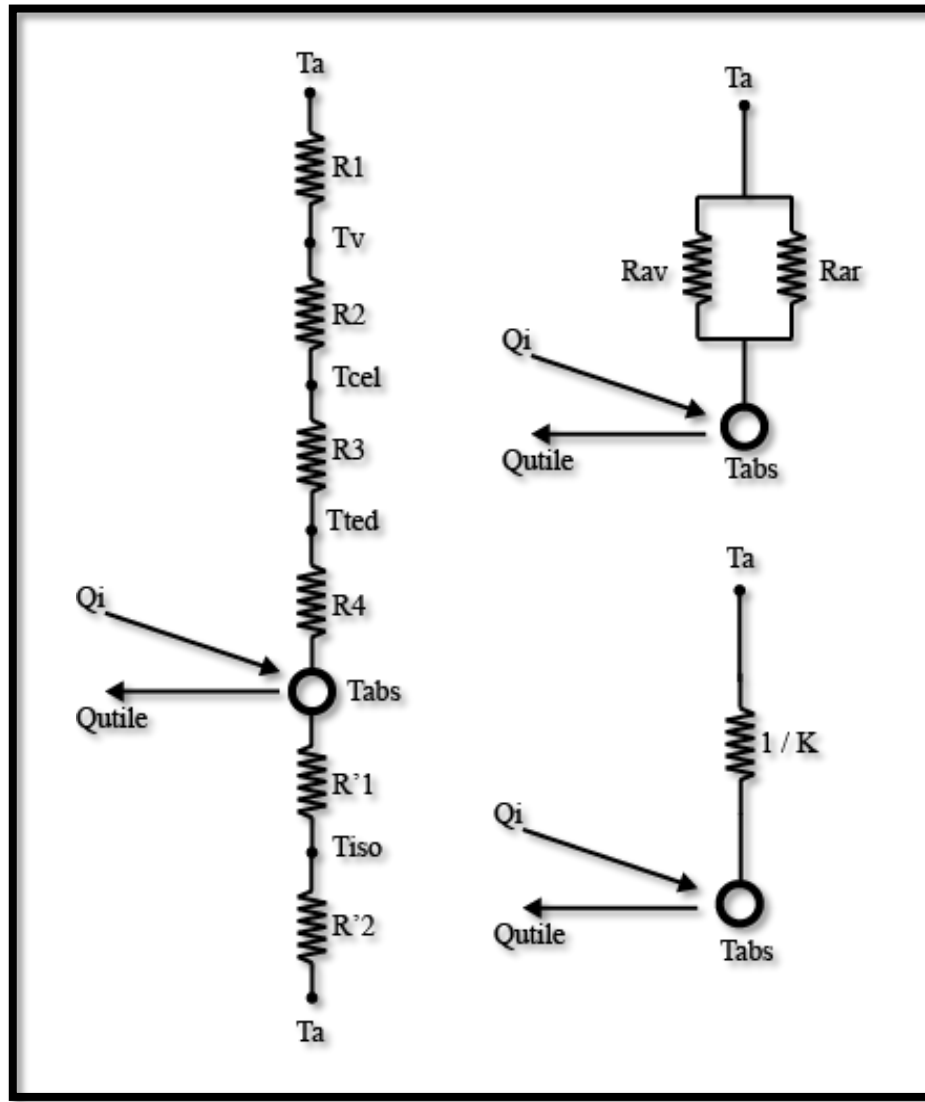


Figure 3. 11 - Analogie électrique des coefficients de perte dans le capteur

Soit R_{av} la résistance thermique équivalente en avant du capteur et R_{ar} celle en arrière, on a :

$$R_1 = \frac{1}{h_{v-a}^{conv} + h_{v-ciel}^{ray}} ; R_2 = \frac{1}{h_v^{cond}} ; R_3 = \frac{1}{h_{cel}^{cond}} ; R_4 = \frac{1}{h_{ted}^{cond}}$$

$$R_{av} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4$$

$$R'_1 = \frac{1}{h_{iso}^{cond}} ; R'_2 = \frac{1}{h_{iso}^{conv}}$$

$$R_{ar} = R'_1 + R'_2$$

Le coefficient d'échange global K est alors donné par :

$$K = \frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_{av}} + \frac{1}{R_{ar}} \quad (3.47)$$

3.5.1. La production électrique et les rendements PV , thermique et global

La production électrique E_{elec} se calcule par la relation :

$$E_{elec} = A_v G_i \times \eta_{PV} \quad (3.48)$$

Le rendement thermique du capteur solaire photovoltaïque thermique PVT est calculé par la relation suivante [35]:

$$\eta_{thq} = \frac{Q_{utile}}{A_v G_i} = F_t \left[(\tau\alpha)_{eff} - K \frac{T_{fe} - T_a}{G_i} \right] \quad (3.49)$$

Le rendement PV est :

$$\eta_{PV} = \eta_{ref} [1 - \beta_{ref} (T_{cel} - T_{ref})] \quad (3.50)$$

On a alors un rendement global η_{PVT} de :

$$\eta_{PVT} = \frac{E_{elec} + Q_{utile}}{A_v G_i} = \eta_{thq} + \eta_{PV} \quad (3.51)$$

3.6. Résolution numérique du système

L'un des aspects importants de la résolution du problème est le calcul des températures des différentes couches du système. Cela revient à résoudre le système d'équations différentielles suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l}
 m_v C p_v \frac{dT_{v,ext}}{dt} = A_v G_i - h_{v-a}^{conv} A_v (T_{v,ext} - T_a) - \varepsilon_v \sigma (T_{v,ext}^4 - T_{ciel}^4) \\
 \quad - h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) \\
 m_v C p_v \frac{dT_{v,int}}{dt} = A_v G_i \tau_v + h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) - h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) \\
 m_{cel} C p_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = A_v G_i (\tau_v \alpha_{cel} - \eta_{PV}) + h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) \\
 \quad - h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) \\
 m_{ted} C p_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) - h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) \\
 m_{abs} C p_{abs} \frac{dT_{abs}}{dt} = h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) - h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) \\
 \quad - h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{abs} - T_{iso}) \\
 m_{tube} C p_{tube} \frac{dT_{tube}}{dt} = h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) - h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) \\
 \quad - h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) \\
 m_f C p_f \frac{dT_f}{dt} = h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) + nWF [S - K(T_f - T_a)] \\
 m_{iso} C p_{iso} \frac{dT_{iso}}{dt} = h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) + h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{tube} - T_{iso}) \\
 \quad - h_{iso}^{conv} (T_{iso} - T_a)
 \end{array} \right.$$

3.6.1. Hypothèses d'études

Avant d'entamer les calculs alphanumériques il est nécessaire de préciser certaines hypothèses de calcul :

- ✓ Le transfert de chaleur est considéré à une seule dimension à travers les couches du système.
- ✓ Le débit massique est uniforme dans les tubes de capteur.
- ✓ Le transfert de chaleur à partir des bords du capteur est négligeable.
- ✓ La vitesse du vent sur la face du capteur est supposé constante.
- ✓ Le flux d'énergie reçu par le capteur est en fonction du temps
- ✓ Les propriétés physiques des matériaux ne sont pas en fonction de la température
- ✓ Les propriétés physiques du fluide sont en fonction de la température
- ✓ Les températures des composants du capteur *PVT* sont en fonction de temps
- ✓ La poussière et la saleté sur le collecteur sont négligeables

❖ Hypothèse simplificatrice

Dans la pratique, la variation dans le temps de l'enthalpie des composants du capteur est faible, c'est-à-dire que les termes en $m_i C p_i$ peuvent être négligés. Nous pouvons donc raisonnablement faire l'hypothèse d'un fonctionnement quasi stationnaire du capteur. Cette hypothèse a pour conséquence de simplifier les équations sans toutefois masquer l'évolution temporaire des phénomènes qui restent liés au flux solaire variable dans le temps [36].

En appliquant cette hypothèse le système d'équation devient :

$$\left\{ \begin{array}{l} A_v G_i - h_{v-a}^{conv} A_v (T_{v,ext} - T_a) - \varepsilon_v \sigma (T_{v,ext}^4 - T_{ciel}^4) - h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) = 0 \\ A_v G_i \tau_v + h_v^{cond} A_v (T_{v,ext} - T_{v,int}) - h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) = 0 \\ A_v G_i (\tau_v \alpha_{cel} - \eta_{PV}) + h_{cel}^{cond} A_v (T_{v,int} - T_{cel}) - h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) = 0 \\ h_{ted}^{cond} A_v (T_{cel} - T_{ted}) - h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) = 0 \\ h_{abs}^{cond} A_v (T_{ted} - T_{abs}) - h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) - h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{abs} - T_{iso}) = 0 \\ h_{tube}^{cond} A_{abs-tube} (T_{abs} - T_{tube}) - h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) - h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) = 0 \\ h_f^{conv} A_{tube-f} (T_{tube} - T_f) + nWF [S - K(T_f - T_a)] = 0 \\ h_{iso}^{cond} A_{tube-iso} (T_{tube} - T_{iso}) + h_{iso}^{cond} A_{abs-iso} (T_{tube} - T_{iso}) - h_{iso}^{conv} (T_{iso} - T_a) = 0 \end{array} \right.$$

Plusieurs méthodes existent pour résoudre ce genre d'équation dont la méthode Cholesky.

La simulation a été faite sous MATLAB.

3.6.2. Procédure de simulation

La procédure utilisée dans la simulation est la suivante :

- Entrée des paramètres du système :
 - Ensoleillement
 - Température ambiante
 - Caractéristiques des différents éléments du capteur
 - Initialisation des températures
- Calcul des constantes indépendantes de la température
 - Résistance thermique
 - Coefficients d'échange par conduction

- Coefficient d'échange par convection avec l'air
- Calcul des paramètres dépendant de la température
 - Coefficient d'échange par rayonnement
 - Coefficient d'échange par conduction dans le fluide
 - Coefficient d'échange global
- Résolution du système d'équation et détermination des nouvelles températures
- Calcul des performances électrique et thermique
- Exécution de la boucle
- Affichage des résultats sous forme de courbes

Ces étapes sont résumées dans l'organigramme suivant :

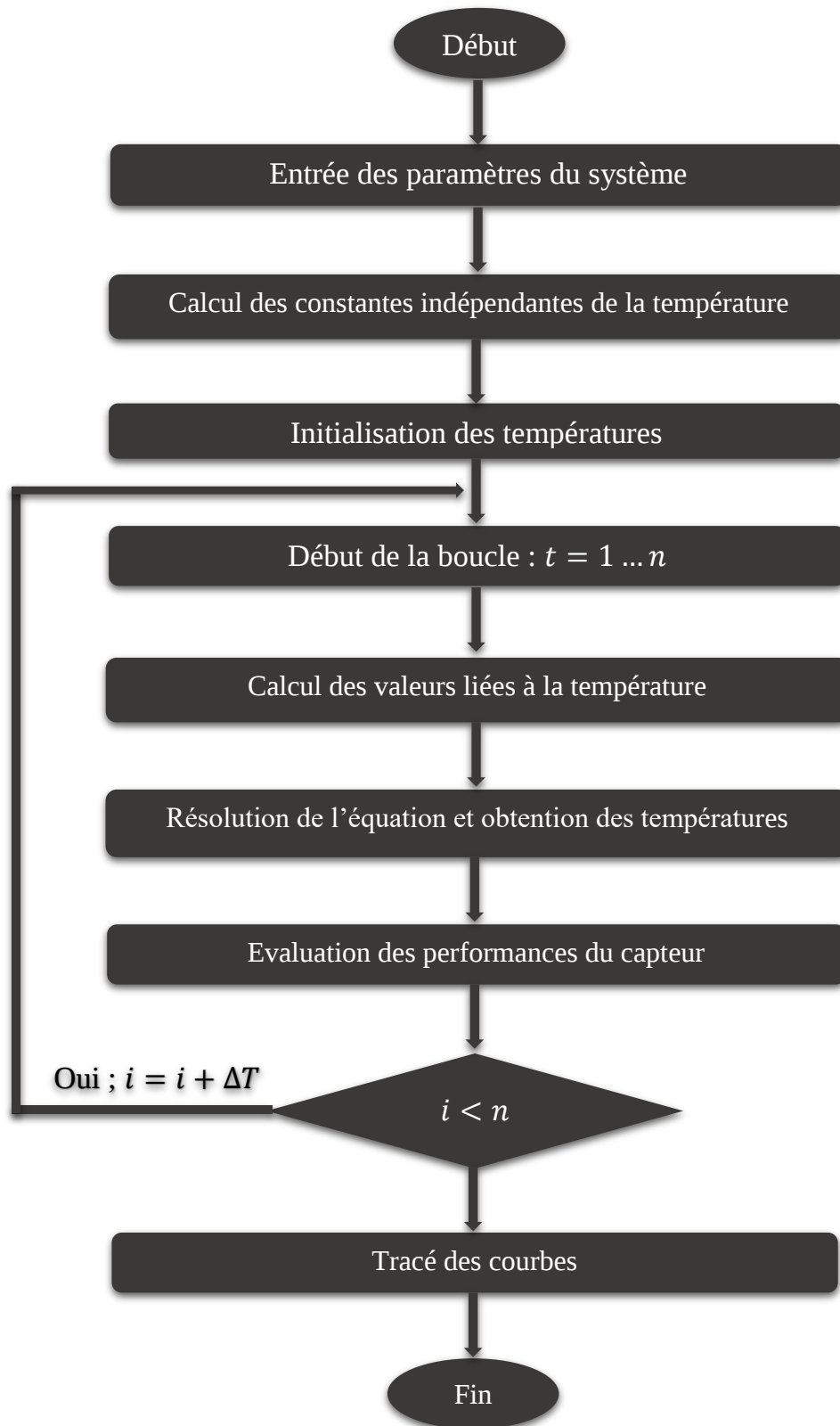


Figure 3. 12 - Organigramme du programme de simulation

Chapitre 4 : Résultats de la simulation et Interprétation

4.1. Introduction

Le modèle décrit dans le chapitre précédent grâce aux différentes équations nous a permis d'effectuer une simulation dans MATLAB. Nous présentons dans cette partie les différents résultats que nous avons obtenus. Nous avons estimé la température des différentes couches du capteur *PVT*. Nous avons aussi évalué l'énergie électrique produite et le rendement du capteur ainsi que l'énergie thermique théoriquement récupérable. Par la suite, nous avons étudié l'influence de la variation de la vitesse du vent et du débit d'eau sur les profils de température du capteur. Le jour choisi pour la simulation est le 01 Avril et le lieu est la ville de Ouagadougou.

4.2. Irradiation globale horaire

L'irradiation solaire est un facteur critique des capteurs photovoltaïques thermiques. La production du capteur *PVT* est donc directement déterminée par l'intensité du rayonnement incident. Plusieurs méthodes existent pour l'évaluation de ce rayonnement. Il peut être mesuré grâce à des appareils comme le pyréliomètre ou le pyranomètre. Il peut être aussi obtenu par simulation ou grâce à des mesures satellitaires ou des logiciels de calcul en ligne. C'est par cette dernière méthode que nous avons obtenu les valeurs du jour pour lequel les simulations ont été faites.

Le site web *PVGIS* offre des données de rayonnement fiable. *PVGIS* est une application en ligne gratuite et un excellent outil de simulation qui permet de calculer gratuitement la production de systèmes photovoltaïques connectés au réseau en Europe et en Afrique (et également pour sites isolés en Afrique). A l'aide de son interface Google Maps intégré, il est très facile d'obtenir les données de production d'un système *PV* à partir des données

d'ensoleillement précises du site (intégrant notamment les masques lointains liés au relief, collines, montagnes). Par ailleurs *PVGIS* propose des cartes d'ensoleillement (irradiation en kWh/m²) et de température précises haute définition de toute l'Europe, de l'Afrique et du Proche-Orient. Il dispose de deux principales bases de données : Hélioclim et Climate-SAF.

Nos résultats sur le rayonnement solaire global sont représentés sur la Figure 4. 1. On note que les maxima d'irradiation sont obtenus entre 11 h et 13 h.

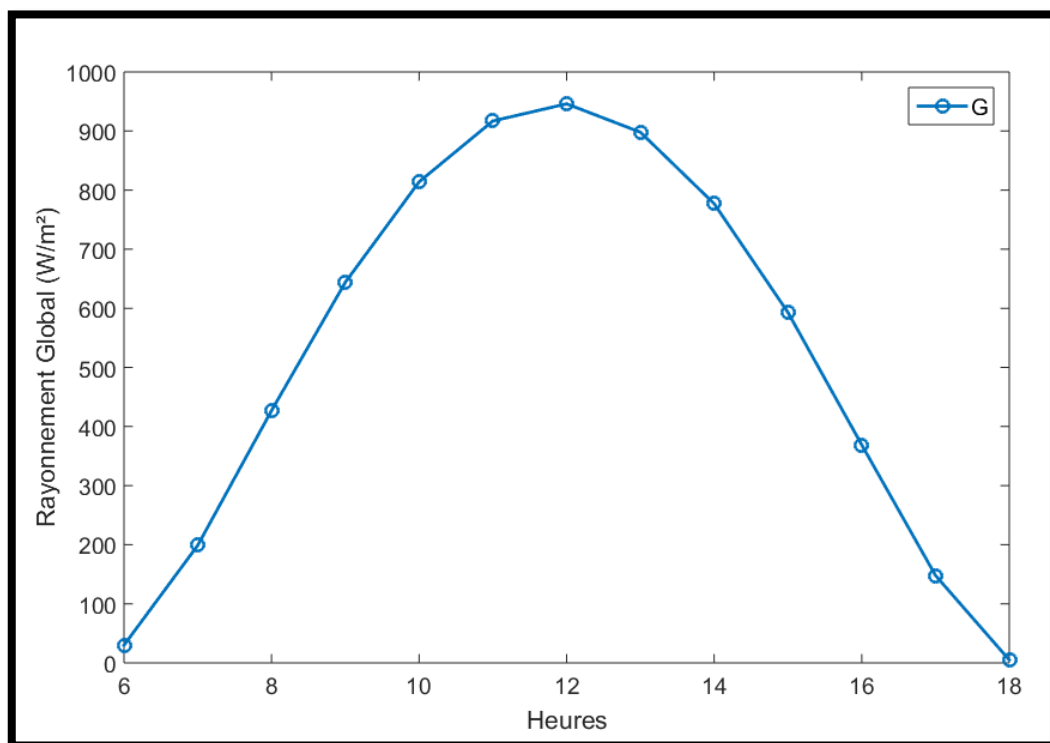


Figure 4. 1 - Rayonnement solaire global

4.3. Température ambiante et température du ciel

La température ambiante a été obtenue par des données de station météorologiques pour le jour considéré pour la simulation. On note la similarité entre la courbe de la température ambiante et celle du ciel. Nous rappelons la formule donnant la température du ciel en fonction de la température ambiante :

$$T_{ciel} = 0,0552T_a^{1,5}$$

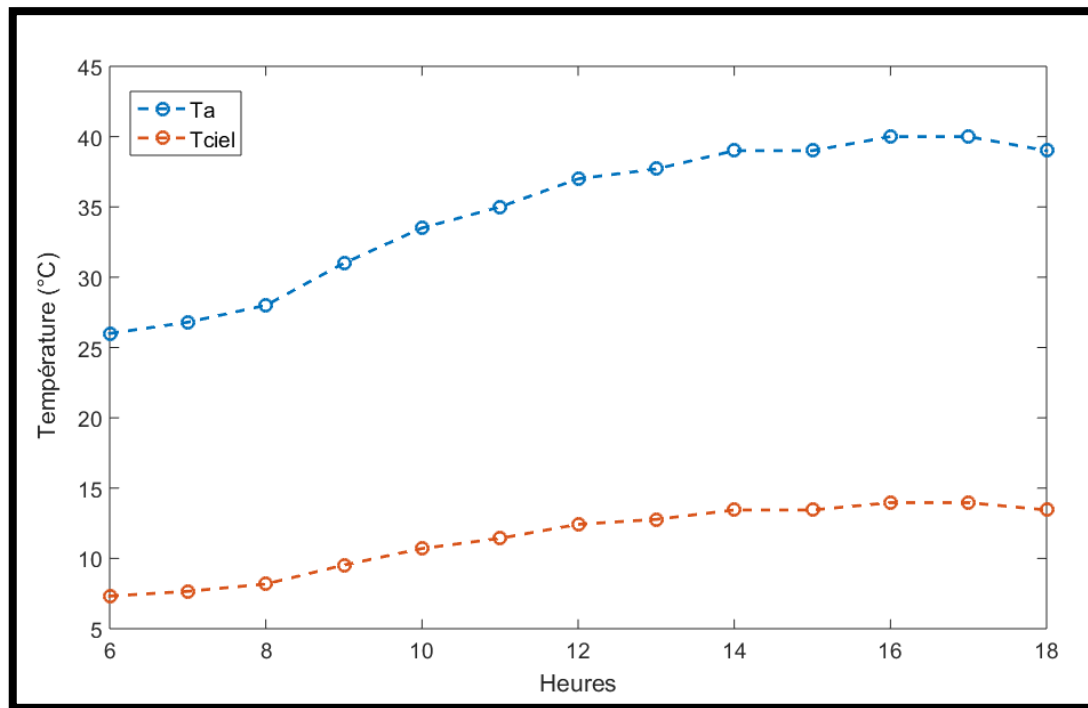


Figure 4. 2 - Température ambiante et du ciel

4.4. Température des éléments du capteur

La figure ci-dessous donne la température des différents éléments du capteur en fonction du temps. La température de l'isolant a la même allure que la température ambiante. Ce qui est parfaitement normal puisque l'isolant est dimensionné de façon à empêcher les échanges de chaleur entre le capteur et l'environnement.

La température de la vitre est plus basse que celle des éléments à l'intérieur du capteur comme l'absorbeur et la cellule *PV*. Nous constatons ici un échauffement de la cellule *PV*. Ce qui va entraîner la réduction de son rendement ainsi que la puissance électrique produite. Par contre on récupérera une quantité non négligeable de chaleur qui fera augmenter le rendement énergétique global du capteur comme nous le verrons plus bas.

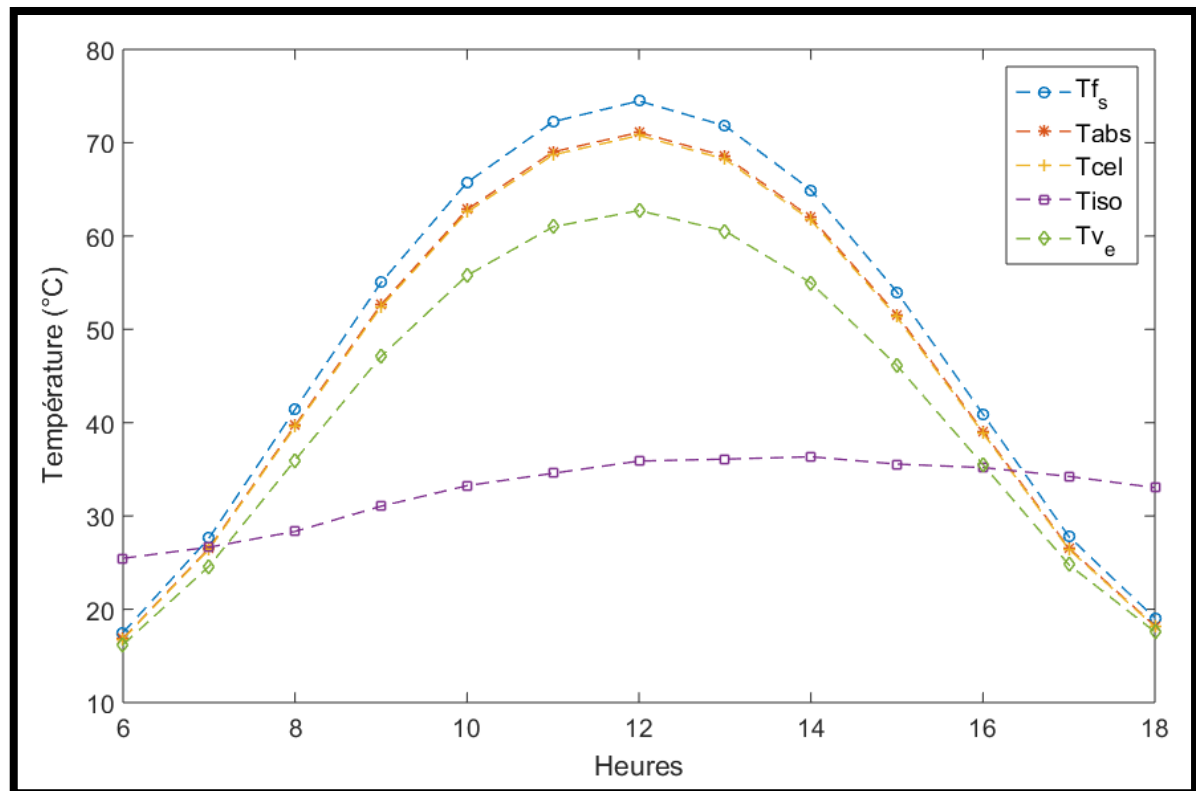


Figure 4. 3 - Profil de température des différents éléments du capteur

4.4.1. Influence de la vitesse du vent sur les profils de température

La Figure 4. 4 et la Figure 4. 5 montrent respectivement les profils de température des éléments du capteur à des vitesses de vent de 2 m/s et 5 m/s. On remarque en premier la constance de la température de l'isolant. Ce qui veut dire que l'extérieur de l'isolant n'est pas trop influencé par la variation des paramètres externes. Par contre, les autres températures ont subi une baisse significative de 5 °C environ due à l'augmentation du coefficient d'échange par convection de la vitre extérieure avec l'air. L'augmentation de la vitesse du vent entraîne donc un refroidissement du capteur.

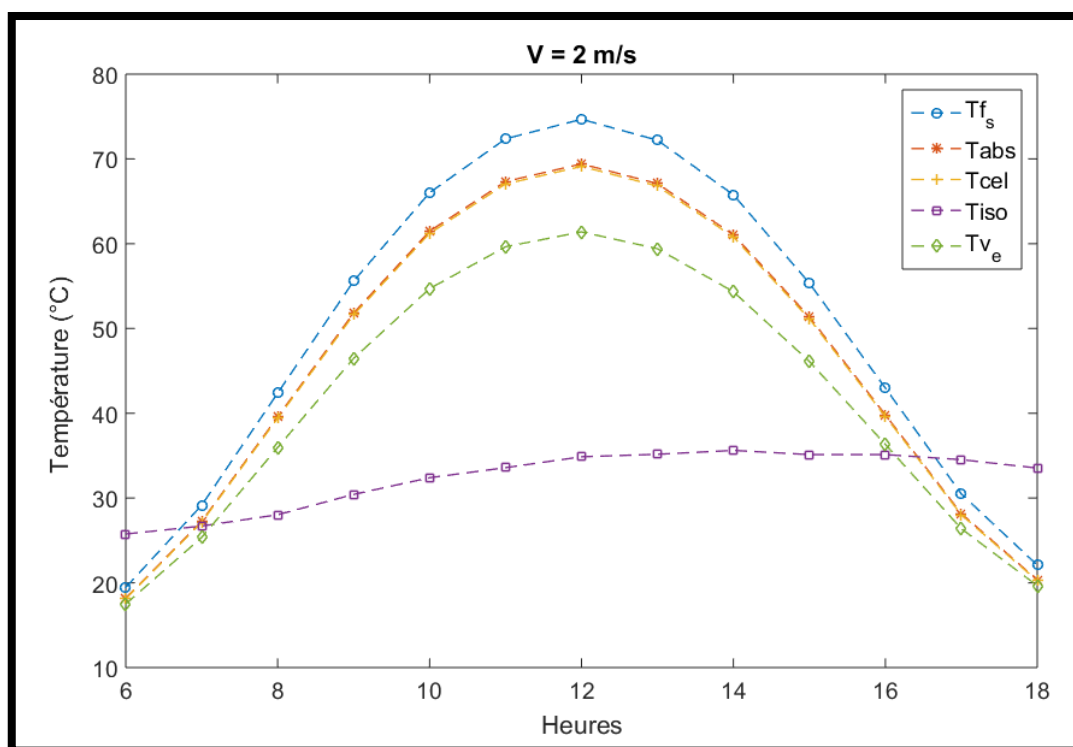


Figure 4. 4 - Profil de température pour un vent de 2 m/s

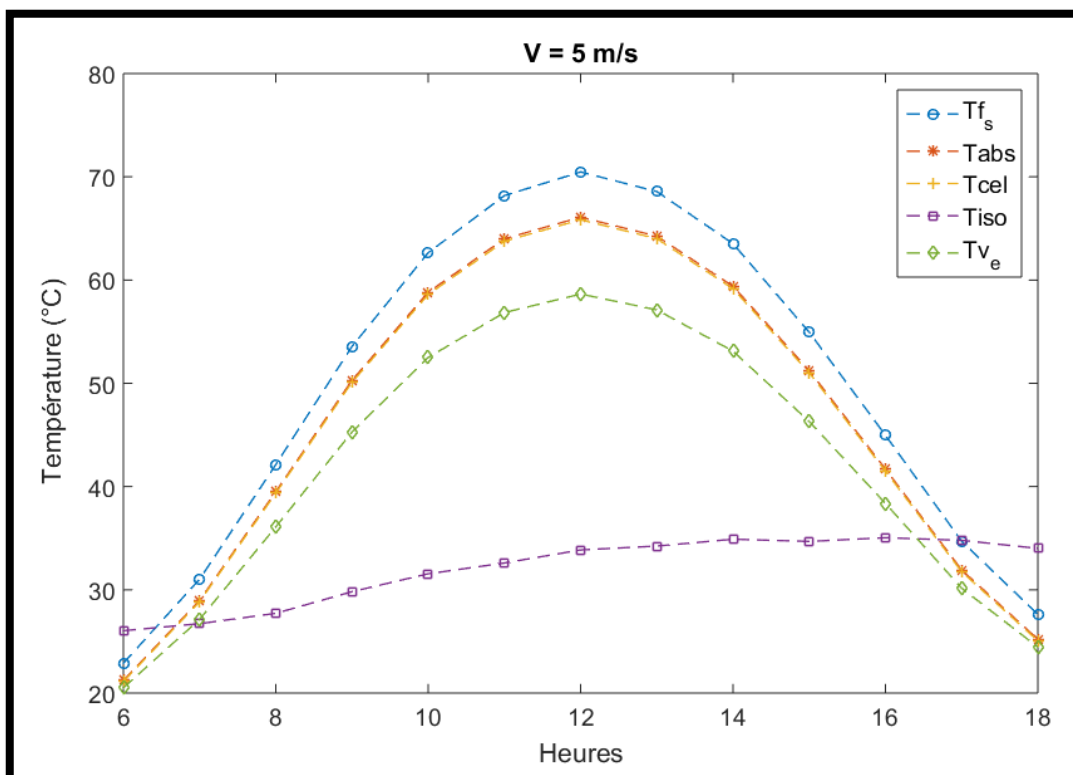


Figure 4. 5 - Profil de température pour un vent de 5 m/s

4.4.2. Influence du débit d'eau utilisé

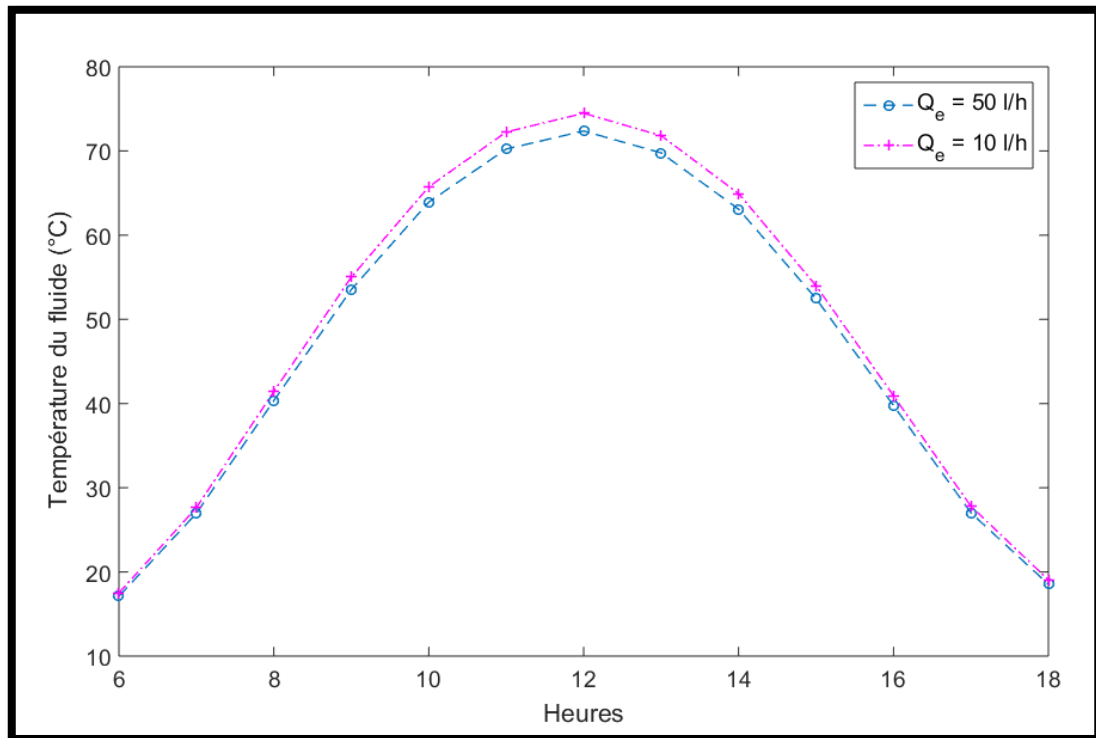


Figure 4. 6 - Influence du débit d'eau sur la température du fluide

La Figure 4. 6 montre que l'augmentation du débit d'eau entraîne une diminution de la température du fluide dans le tube. Cette augmentation entraîne une augmentation de la vitesse de l'eau dans le tube qui entraîne à son tour la diminution du coefficient d'échange par convection de l'eau. La quantité de chaleur reçue par l'eau est alors réduite de même que sa température.

4.5. Puissance et rendement électriques

La puissance électrique fournie par le capteur *PVT* tout comme les profils de température sont fonction de l'irradiation d'où sa forme en cloche. Nous avons tracé sur la figure ci-dessous la puissance électrique fournie par le capteur *PVT* et celle fournie par un capteur *PV* simple de même puissance (250 Wc).

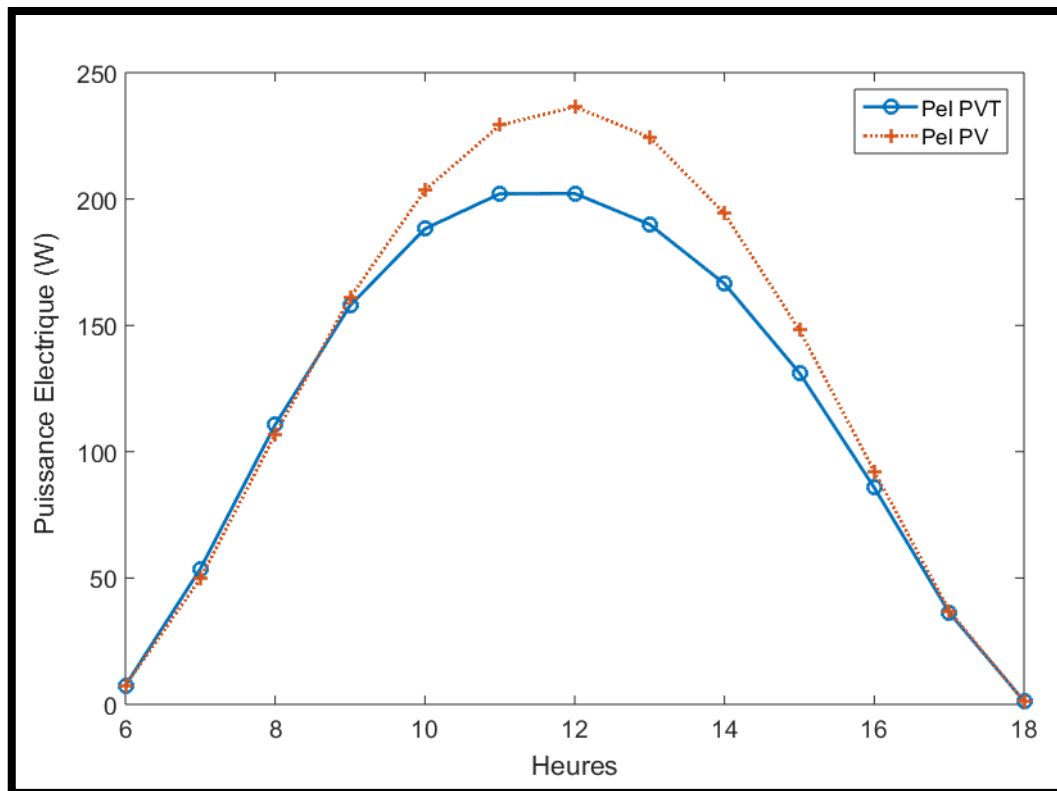
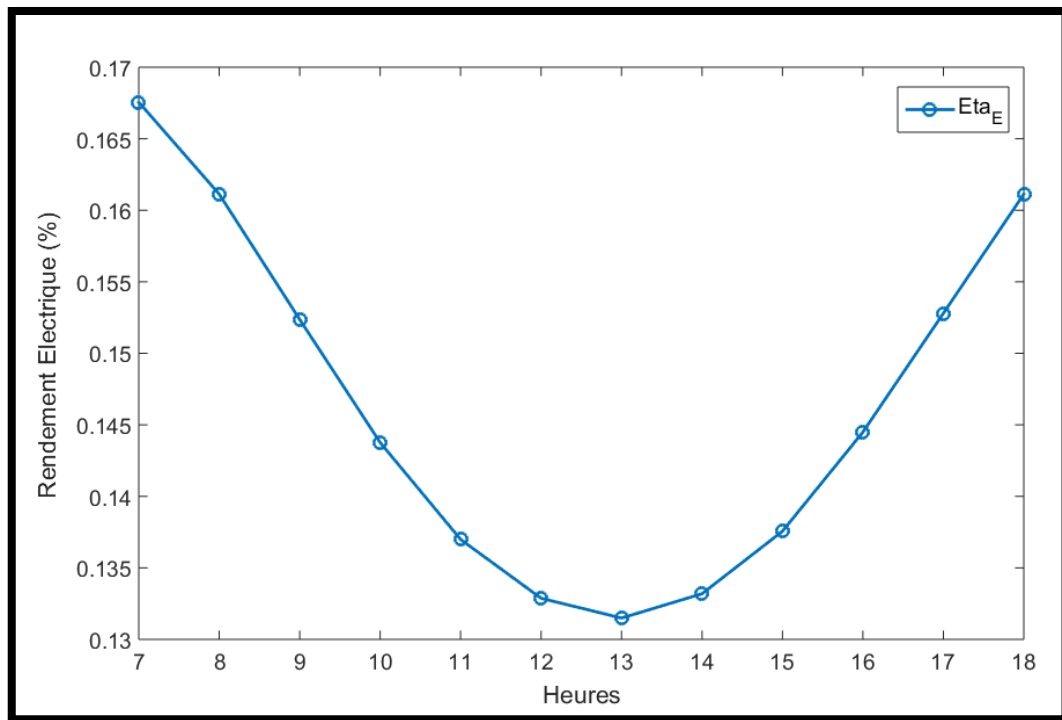


Figure 4. 7 - Puissance électrique fournie par le capteur *PVT* et un capteur *PV*

Les deux puissances ont la même allure mais nous remarquons que le capteur *PVT* fournit une puissance électrique légèrement inférieure à la puissance d'un panneau *PV* simple. Ceci est surtout dû au fait que l'arrière du module *PV* est bien ventilé et permet donc une évacuation efficace de la chaleur. Par contre, dans le capteur *PVT*, du fait que la chaleur est véhiculée par un fluide en contact avec le panneau via l'absorbeur et du fait de la présence de l'isolant thermique à l'arrière du panneau, un échauffement du panneau s'ensuit. Ce qui entraîne alors une diminution de la puissance électrique fournie.

Le rendement électrique correspondant est représenté sur la figure ci-dessous.

Figure 4. 8 - Rendement électrique du capteur *PVT*

4.6. Puissance et rendement thermique

La puissance thermique récupérable d'un capteur *PVT* varie tout au long de la journée avec un maximum à 12 h qui correspond à la valeur maximale de l'ensoleillement. Cette puissance est intimement liée au débit d'eau qui circule dans les tubes sous l'absorbeur et se fera ressentir sur le rendement global du capteur. Les deux figures ci-dessous représentent respectivement la puissance thermique utile ainsi que le rendement thermique correspondant.

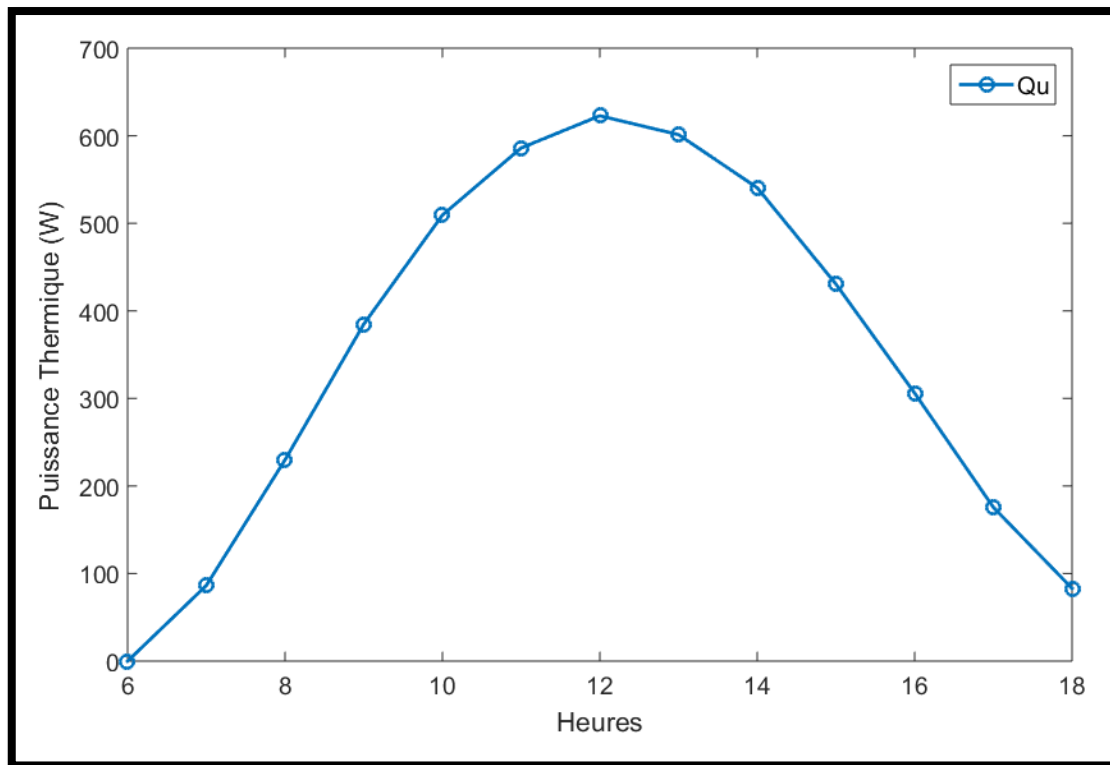


Figure 4. 9 - Puissance thermique utile

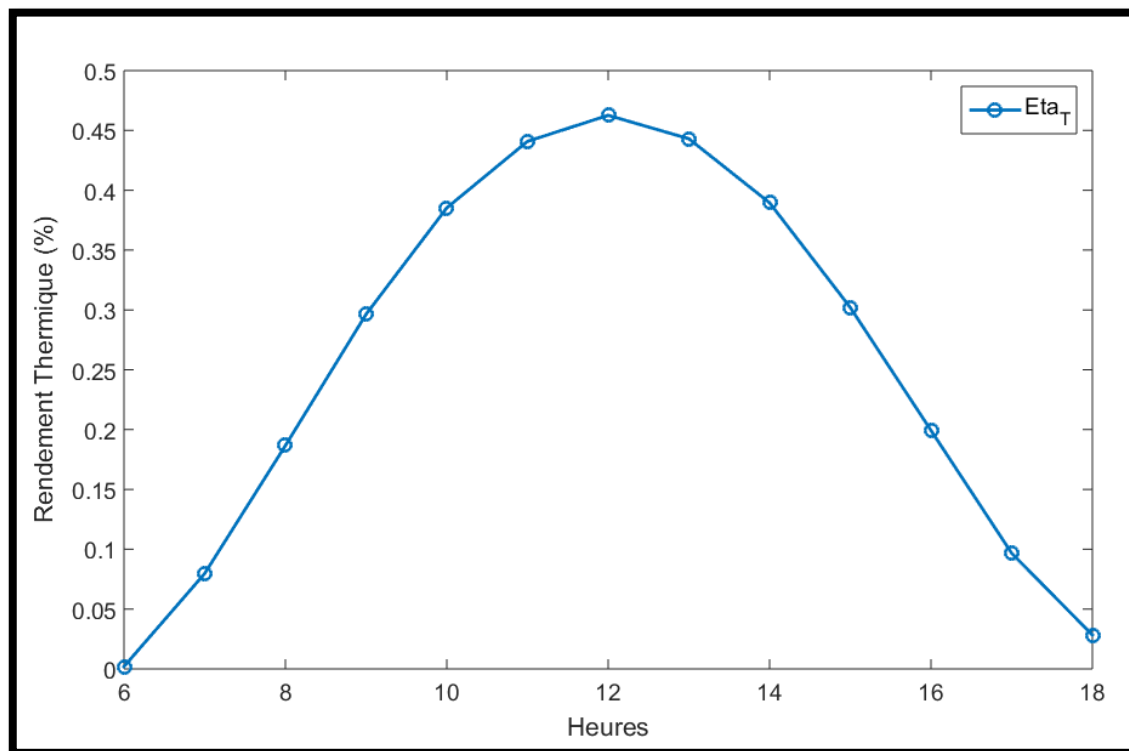


Figure 4. 10 - Rendement thermique

4.7. Rendement global

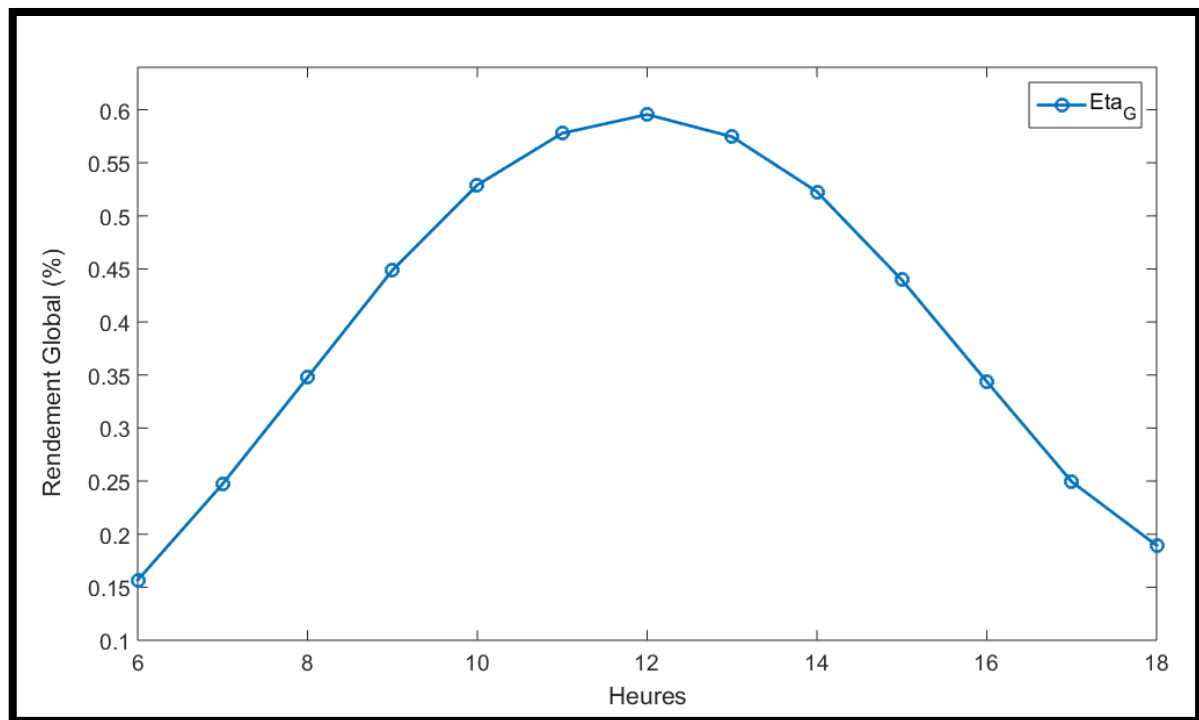
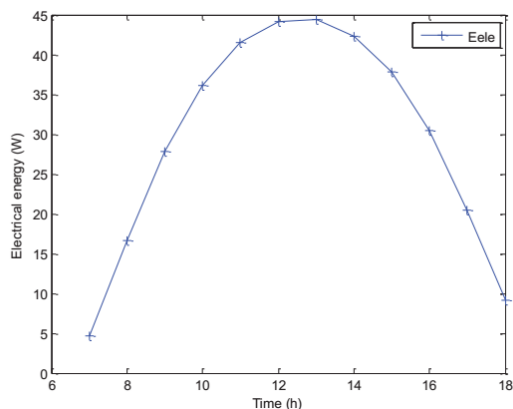


Figure 4. 11 - Rendement global du capteur *PVT*

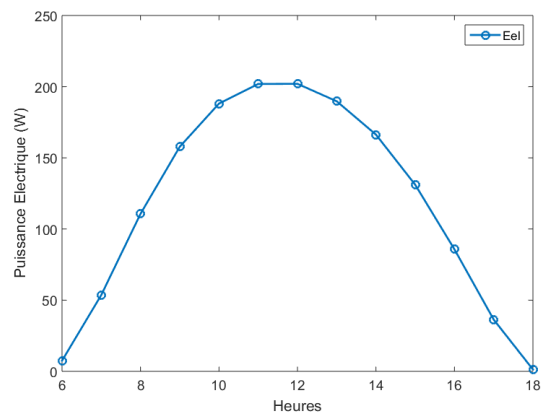
Le rendement global du capteur *PVT* peut s'élever jusqu'à 57 % à 12 h quand l'ensoleillement est à son maximum. Le rendement global représente plus de trois (03) fois le rendement d'un capteur *PV* simple. En cogénération un capteur *PVT* ne produit pas autant d'énergie électrique qu'un capteur *PV* simple mais son rendement énergétique global est bien plus grand.

4.8. Comparaison avec d'autres résultats

Nous avons ci-dessous les résultats des travaux de Ben cheikh el Hocine et al. [31] qui ont travaillé sur la simulation des capteurs *PVT* dans la zone du Maghreb avec comme fluide l'air et l'eau. Ils ont utilisé un panneau de 50 Wc d'efficacité électrique 15% incliné d'un angle de 35°.

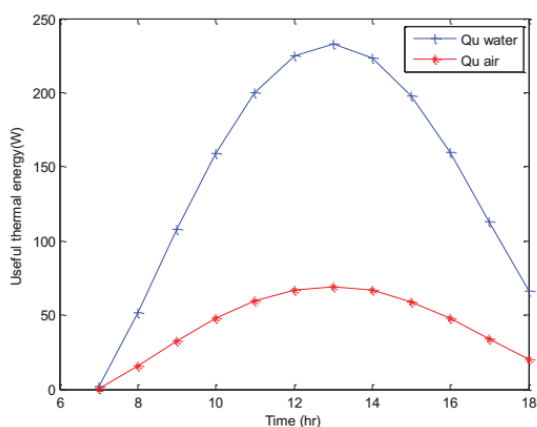


Résultat de Ben cheikh el Hocine

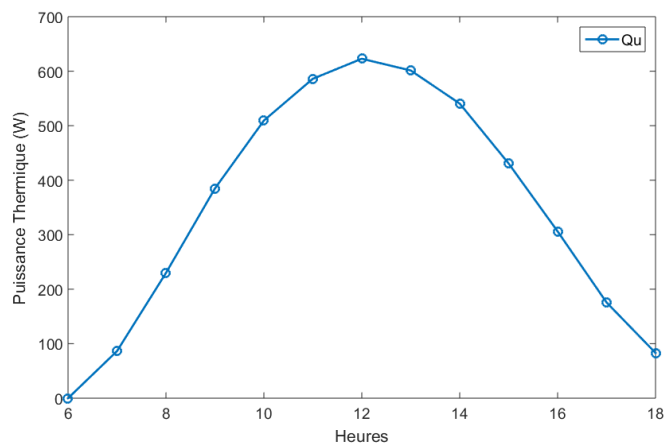


Notre résultat

Figure 4. 12 – Comparaison de l'énergie électrique récupérée



Résultat de Ben cheikh el Hocine



Notre résultat

Figure 4. 13 – Comparaison de l'énergie thermique récupérée

On note la forme en cloche de l'énergie électrique et de l'énergie thermique récupérée avec des maxima entre 12 h et 14 h. L'allure de ces courbes est en accord avec nos résultats.

4.9. Valeurs utilisées dans la simulation

Les principales valeurs utilisées dans la simulation sont dans le tableau suivant.

Tableau 4. 1 - Données utilisées pour la simulation

Paramètres	Valeurs
Modèle du module <i>PV</i>	Canadian Solar <i>CS6P</i>
Puissance <i>STC</i> du module <i>PV</i>	250 Wc
Rendement maximal du module <i>PV</i>	15,54 %
Longueur du capteur	1,638 m
Largeur du capteur	0,982 m
Coefficient de transmission du verre	0,98
Emissivité du verre	0,88
Conductivité thermique du verre	1 W/m.K
Epaisseur du verre	0,0032 m
Absorptivité de la cellule	0,85
Conductivité thermique de la cellule	0,036 W/m.K
Epaisseur des cellules <i>PV</i>	0,0003 m
Conductivité thermique du tedlar	0,36 W/m.K
Epaisseur du tedlar	0,0002 m
Conductivité thermique de l'acier galvanisé	65 W/m.K
Epaisseur de l'absorbeur	0,003 m
Conductivité thermique de la laine de verre	0,041 W/m.K
Epaisseur de l'isolant	0,05 m
Diamètre intérieur du tube	0,02 m
Diamètre extérieur du tube	0,03 m
Vitesse du vent	1 m/s

4.10. Conclusion

La simulation du problème dans Matlab nous a donné des résultats intéressants. Nous avons obtenus les profils de température des différentes couches du capteur et nous avons déterminé l'énergie électrique ainsi que l'énergie thermique susceptible d'être recueillie d'un capteur *PVT*.

Conclusion générale

Dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, nous avons choisi comme thème les capteurs *PVT*. Le but de notre travail est la modélisation et la simulation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique afin de comprendre son fonctionnement pour ainsi l'appliquer dans nos futures études à la production solaire du froid.

Nous avons dans un premier temps parcouru les technologies de conversion de l'énergie solaire classiques existantes notamment la conversion solaire photovoltaïque et la conversion solaire thermique. Un accent particulier a été mis sur la technologie photovoltaïque. Au terme de ce parcours, il en est ressorti que les panneaux *PV* perdent une grande partie du rayonnement incident sous forme de chaleur.

Une description des capteurs *PVT* a été faite suivie d'une étude bibliographique. De l'étude bibliographique, nous avons dégagé l'importance de comprendre le fonctionnement des capteurs *PVT* puisqu'ils ont un rendement exergétique meilleur que les capteurs *PV* ou les capteurs thermiques pris séparément.

Nous avons ensuite modélisé le comportement thermique du capteur *PVT* par des équations de transfert de chaleur. Nous avons travaillé en régime quasi stationnaire puisque la variation de l'enthalpie des éléments n'est pas très sensible au temps et varie avec l'ensoleillement. La résolution du système a été faite sous MATLAB.

Les résultats que nous avons obtenus nous ont permis de comprendre le comportement thermique des différents éléments d'un capteur *PVT* ainsi que l'effet de quelques paramètres externes sur son fonctionnement. Nos résultats ont été comparés avec les résultats présents dans la littérature et sont en accord avec des résultats obtenus au Maghreb.

Nous sommes convaincus que les capteurs *PVT* peuvent s'avérer économiquement plus rentables que les capteurs *PV* simples si le coût du système de récupération de chaleur n'est pas élevé. Il est donc nécessaire de chercher les matériaux les plus adaptés (coefficient

d'échange thermique élevé et faible coût) dans la conception de ces capteurs. Une analyse économique comparative entre les deux types de capteurs permettrait de déterminer la rentabilité des deux systèmes. Une étude plus poussée de l'influence des paramètres externes et internes pourra être réalisée en régime transitoire afin d'avoir une maquette sur laquelle se baser pour créer des prototypes. Tout ceci représente un large champ de perspectives d'études pour le futur.

Nous espérons continuer ce travail en thèse par la création d'un prototype de capteur *PVT* fabriqué avec des matériaux locaux que nous appliquerons à la production solaire du froid.

Annexes

A.1. Eléments de transferts thermiques

A.1.1. Rayonnement

Un corps noir dont la surface absorbe l'intégralité d'un rayonnement incident quelles que soient la longueur d'onde et la direction de celui-ci. C'est un absorbeur parfait. L'énergie totale rayonnée par un corps noir est donnée par la formule de Stefan-Boltzmann :

$$E_b = \sigma T^4$$

Avec $\sigma = 5,67.10^{-8} \text{ W/m}^2.\text{K}^4$ la constante de Stefan.

Le corps noir sert de référence pour les surfaces réelles. Les corps réels n'absorbent pas tout le rayonnement incident. Lorsqu'un rayonnement frappe la surface d'un corps réel, une fraction de celui-ci est réfléchi, une autre absorbée et enfin une troisième peut être transmise si le corps est transparent. On a :

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

- ρ : le facteur de réflexion
- α : le facteur d'absorption
- τ : le facteur de transmission.

Le facteur d'émission ε est défini comme étant le rapport de l'énergie émise par une surface (ou émittance énergétique) sur l'énergie qu'elle émettrait si elle pouvait être considérée comme noire. On a donc :

$$\varepsilon = \frac{E}{E_b}$$

La loi de Kirchhoff permet d'écrire : $\varepsilon = \alpha$

Le rayonnement émis alors par un corps réel s'écrit alors :

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Un corps placé à l'air libre échange avec son environnement une quantité de chaleur Q :

$$Q = \varepsilon_c \sigma (T_c^4 - T_\infty^4)$$

A.1.2. Conduction

La conduction est le moyen par lequel la chaleur circule de proche en proche dans un matériau ou passe d'un corps à un autre en contact physique direct, par simple interaction moléculaire. Les molécules du secteur le plus chaud se heurtent vivement entre elles et transmettent leur énergie de vibration aux molécules voisines. Le flux de chaleur va toujours des zones chaudes vers les zones moins chaudes.

Dans un matériau solide la conduction thermique est régie par l'équation dit de la chaleur qui s'écrit :

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \Delta T + P$$

Dans laquelle P est une puissance dissipée par unité de volume du milieu. Ce peut être une puissance apportée par une réaction chimique exothermique (prise du béton par exemple), par effet Joule (résistance électrique noyée dans le matériau), par fission de noyaux d'un matériau nucléaire (uranium)...

Si aucune puissance n'est dissipée dans le milieu, on obtient l'équation différentielle suivant qui exprime l'évolution de la température en fonction du temps t :

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \alpha \Delta T = 0$$

Equation dans laquelle $\alpha = \frac{\lambda}{\rho C_p}$, appelé diffusivité, est une caractéristique du matériau étudié.

Si de plus on considère un régime permanent avec un écoulement monodirectionnel suivant la direction x , l'équation précédente s'écrit :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

Ce qui donne :

$$T = Ax + B$$

A et B sont deux constantes dépendantes des conditions aux limites.

Le flux de chaleur qui traverse un solide est donné par l'équation de Fourier :

$$\vec{q} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}$$

λ est la conductivité du matériau. Elle dépend en toute rigueur de la température mais compte tenu des écarts de température relativement faible en énergie solaire, on peut la considérer constante.

Lorsque le gradient de température est monodirectionnel suivant x par exemple, on a :

$$q = -\lambda \frac{dT}{dx}$$

Pour deux solides accolés (structure de mur composé) on a :

$$q = -\lambda_1 \frac{T_i - T_1}{e_1} = -\lambda_2 \frac{T_2 - T_i}{e_2}$$

Une similitude électrique permet d'écrire

$$T_1 - T_i = R_1 q$$

Et

$$T_i - T_2 = R_2 q$$

Avec R_i la résistance thermique

$$R_i = \frac{e_i}{\lambda_i}$$

On a alors :

$$T_1 - T_2 = (R_1 + R_2)q = Rq$$

Ou encore :

$$q = K(T_1 - T_2)$$

K est la conductance thermique globale du mur. C'est l'inverse de la résistance thermique.

$$K = \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2}}$$

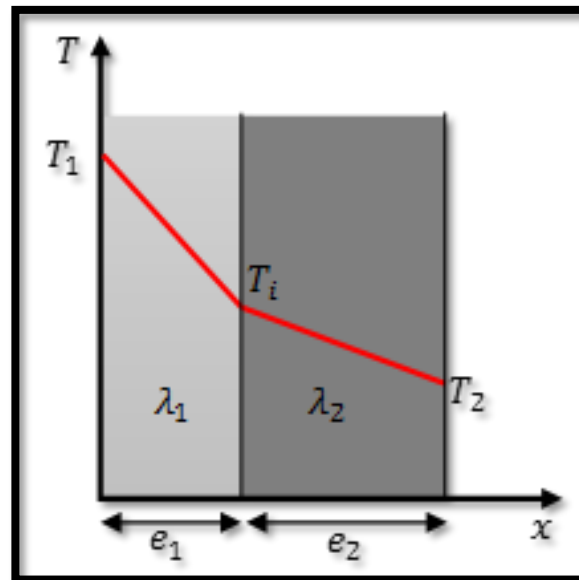


Figure A. 1 - Mur composé

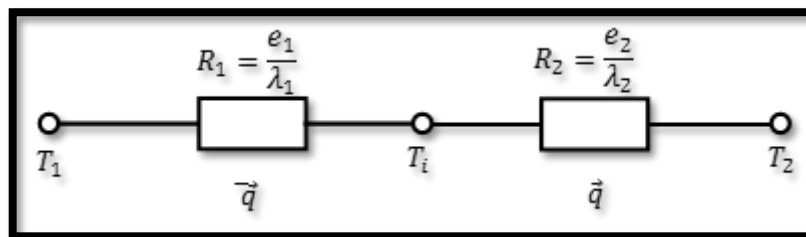


Figure A. 2 - Similitude électrique

A.1.3. Convection

La convection est un mode de transfert de la chaleur qui a lieu uniquement dans les fluides.

Le transfert par convection peut être :

- Forcée : Dans ce cas les mouvements du fluide sont dus alors à une action extérieure, pompe, ventilateur etc. La convection forcée est plus efficace que la convection naturelle d'un point de vue des échanges thermiques.
- Naturelle : Le mouvement du fluide est alors dû à des différences de densité entre régions à température différentes.

Dans les deux cas, la densité de flux thermique échangée entre une paroi solide et un fluide s'écrit :

$$\varphi = h(T_p - T_\infty)$$

- T_p : la température de la paroi
- T_∞ : température de référence du fluide.

Le problème se ramène alors au calcul de h .

L'analyse dimensionnelle met en évidence un certain nombre de groupements sans dimension qui sont utilisés dans les corrélations empiriques de calcul du coefficient d'échange thermique par convection. Dans le système international d'unités, h est en $W/m^2.K$.

Il faut d'abord connaître les caractéristiques du fluide concerné :

- ρ : masse volumique (kg/m^3)
- μ : viscosité dynamique (PI)
- λ : conductivité thermique ($W/m.K$)
- C_p : chaleur massique ($J/kg.K$)

Les nombres sans dimension que l'on rencontre sont les suivants, avec x la longueur caractéristique (en m) :

- Nombre de Reynolds

$$Re_x = \frac{\rho \cdot c \cdot x}{\mu}$$

Avec c , la vitesse caractéristique en m/s

- Nombre de Prandtl

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$$

- Nombre de Grashoff

$$Gr_x = \frac{\rho^2 \cdot g \cdot \Delta T \cdot x^3}{\mu^2 \cdot T}$$

Avec $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, ΔT écart de température caractéristique et T la température.

- Nombre de Nusselt

$$Nu_x = \frac{h \cdot x}{\lambda}$$

La méthode ci-dessous est utilisée pour déterminer le coefficient de transfert pour des problèmes de convection simples (géométrie bien définie), en régime permanent :

- Rechercher la géométrie à laquelle se rapporte le système étudié.
- Définir le type de convection impliqué : convection forcée ou naturelle ?
- Détermination du régime d'écoulement
 - En convection forcée, on calcule le nombre de Reynolds et on le compare à la valeur critique donnée dans les formules de corrélation.
 - En convection naturelle, on calcule le nombre de Grashoff ou de Rayleigh et on le compare à la valeur critique donnée dans les formules de corrélation.
- On calcule alors la valeur du nombre de Nusselt correspondante.
- On calcule ensuite le coefficient d'échange thermique h à l'aide de la formule suivante :

$$Nu = \frac{h \cdot x}{\lambda}$$

$$\Rightarrow h = \frac{Nu \cdot \lambda}{x}$$

- Enfin on détermine la puissance thermique échangée par :

$$\phi = \varphi \cdot S$$

$$\Rightarrow \phi = hS(T_p - T_\infty)$$

A.2. Propriétés de quelques corps

Tableau A. 1 - Propriétés physiques de quelques matériaux isolants

Matériau	Conductivité thermique (W/m.K)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg.K)
Mousse de polyuréthane	0,029	30	1600
Laine de verre	0,036	40	840
Polystyrène expansé	0,04	20	1500
Laine de roche	0,04	40	840
Silicate de calcium	0,052	200	920
Bois de pin	0,118	500	1210
Papier	0,14	700	1340
Caoutchouc pur	0,153	1200	2170
PVC	0,166	1380	1000

Tableau A. 2 - Propriétés physiques de quelques matériaux utilisés comme absorbeur

Métal	Conductivité thermique (W/m.K)	Chaleur massique (J/kg.K)	Masse volumique (kg/m ³)
Acier galvanisé			
Cuivre	384	398	8900
Acier inoxydable	14	460	7800
Aluminium	204	879	2700

Tableau A. 3 - Propriétés physiques de quelques surfaces réfléchissantes

Matériau	Noms commerciaux	Transmittivité (%)	Masse volumique (kg/m ³)	Chaleur massique (J/kg.K)	Conductivité thermique (W/m.K)
Verre à vitre		85 – 92	2700	840	0,93
Polycarbonate	Makrolon; Lexan	82 – 89	1200	1260	0,2
Polyméthacrylate	Altuglas; Plexiglas	89 – 92	1200	1460	0,2
Polyester armé		77 – 90	1400	1050	0,21
Polytéréphtalate d'éthylène	Mylar; Terphane	84	1,38	1170	0,25
Polyfluoroéthylène propylène	Teflon; FEP	97	2,15	1170	0,25
Polyfluorure vinyle	Tedlar	93	1,5	1380	0,12

Références

- [1] S. A. Kalogirou, *Solar Energy Engineering - Processes and Systems*, 2e éd., Oxford: Elsevier, 2014.
- [2] C. Benbouza, «Production et performances des capteurs hybrides (PV/T) à eau intégrés dans le bâtiment - cas de l'Algérie -,» Mémoire de Magister - Université de Constantine1, 2014.
- [3] Wikipedia, «Cellule Photovoltaïque,» 22 Septembre 2016. [En ligne]. Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Cellule_photovolta%C3%AFque. [Accès le 14 Octobre 2016].
- [4] S. Petibon, «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques,» Thèse de doctorat - Université de Toulouse, 2009.
- [5] H. Kamelia, «Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque : Etude Comparative,» Mémoire de Magister, 2012.
- [6] B. B. Hacène, «Modélisation et simulation des cellules solaires à base de P3HT : PCBM (effet de la mobilité et la vitesse de recombinaison en surface),» Thèse de doctorat - Université de Tlemcen, 2014.
- [7] A. Khelifa, «Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T,» Mémoire de Magistère - Université de Batna, 2011.
- [8] Science-MAG, «Station Spatiale Internationale,» 27 Avril 2012. [En ligne]. Available: <http://www.sciences-mag.fr/2012/04/iss-micro-organisme-mutants-attaque-station-spatiale-internationale/>. [Accès le 14 Octobre 2016].
- [9] B. Zakaria, «Contribution à la modélisation d'une cellule solaire,» Mémoire de Magistère - Université de Béchar, 2009.
- [10] A. Zaatri et S. Belhour, «Reconstitution de la caractéristique I – V et détermination de la puissance d'un système photovoltaïque,» *Revues des Energies Renouvelables*, pp. 563-574, 2009.
- [11] R. Merahi, R. Chenni et M. Houbes, «Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab,» *Journal of Scientific Research*, pp. 223-227, 2010.
- [12] F. Pronovost, «Développement d'un concentrateur solaire dans une perspective d'exploitation durable de l'énergie solaire,» Mémoire - Université de Laval, 2010.
- [13] J. Yves, *Thermique Solaire*, 2011.

- [14] F. Kalla, «Conversion thermodynamique de l'énergie solaire : Etude et modélisation d'un capteur solaire,» Mémoire de Magistère - Université de Batna, 2014.
- [15] A. Ferriere et G. Flamant, Captation, transformation et conversion de l'énergie solaire par les technologies à concentration, IMP - CNRS, 2005.
- [16] Syndicat des énergies renouvelables, *Principe de fonctionnement du solaire thermodynamique*, Paris, 2010.
- [17] D. d. V. ., W. v. H. ., R. v. Z. H.A. Zondag, «The yield of different combined PV-thermal collector designs,» *Solar Energy*, pp. 253-269, 2003.
- [18] Z. H. A. et v. H. W. G. J., «Stagnation temperature in PVT collectors».
- [19] T. K, M. A et H. M, «Etude expérimentale du capteur hybride photovoltaïque thermique,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 9, n° 13, pp. 143-154, 2006.
- [20] K. Touafek, W. Bendaikha-Touafek, A. Malek et M. H. e. L. Serir, «Etude d'un système de cogénération par les capteurs hybrides photovoltaïques thermiques destiné à l'habitat,» *Revue des Energies Renouvelables*, pp. 177-180, 2007.
- [21] P. DUPEYRAT, Y. BAI, G. KWIATKOWSKI, G. FRAISSE et C. MENEZO, «Performances énergétiques de capteurs solaires hybrides PV-T pour la production d'eau chaude sanitaire».
- [22] ., K., H. M., M. A. et B.-T. W., «Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 11, n° 11, pp. 153-165, 2008.
- [23] H. Zondag, «Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, pp. 891-959, 2008.
- [24] A. Khelifa et K. Touafek, «Etude de l'influence des paramètres externes et internes sur le capteur hybride photovoltaïque thermique (PVT),» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 15, n° 11, pp. 67-75, 2012.
- [25] N. Boulfaf, J. Chaoufi, A. Ghafiri et A. Elorf, «Thermal Study of Hybrid Photovoltaic Thermal (PV-T) Solar Air Collector Using Finite Element Method,» *INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH*, vol. 6, n° 11, 2016.
- [26] M. Boubekri, A. Chaker et A. Cheknane, «Numerical approach for performance study of hybrid PV/Thermal collector,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 12, n° 13, pp. 355-368, 2009.
- [27] Y. B. ASSOA et B. BOILLOT, «Etude des performances thermiques d'un capteur solaire photovoltaïque thermique hybride à air intégrable au système de ventilation des bâtiments».

- [28] A. Ghellab, A. Kaabi, S. Annane et C. Brieche, «Les retombées technico-économiques d'un capteur hybride photovoltaïque / thermique à air,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n° 13, pp. 425-440, 2013.
- [29] H. B. C. E. Hocine et M. Marir-Benabbas, «Etude des performances électriques et thermiques d'un capteur hybride PVT,» *Revue des Energies Renouvelables*, vol. 16, n° 12, pp. 257-268, 2013.
- [30] S. N. Jahromia, A. Vadiee et M. Yaghoubi, «Exergy and economic evaluation of a commercially available PV/T collector for different climates in Iran,» *Energy Procedia*, pp. 444-456, 2015.
- [31] H. Ben cheikh el hocine, K. Touafek, F. Kerrou, H. Haloui et A. Khelifa, «Model Validation of an Empirical Photovoltaic Thermal (PV/T) Collector,» *Energy Procedia*, pp. 1090-1099, 2015.
- [32] A. Khelifa, T. K, H. Ben Moussa, T. I, H. Ben cheikh El hocine et H. H, «Analysis of a Hybrid Solar Collector Photovoltaic Thermal (PVT),» *Energy Procedia*, vol. 74, pp. 835-843, 2014.
- [33] Y. NOUGBLEGA, J. C. DUPRE, K. ATCHONOU GLO, A. GERMANEAU, F. HESSER, M. BANNA, K. NAPO, J. CHAOUFI, C. VALLEE et A. STRABONI, «Conception et réalisation des capteurs hybrides photovoltaïque-thermiques sous vide ou avec lame d'air confinée,» *Afrique SCIENCE*, vol. 11, n° 12, pp. 12-23, 2015.
- [34] J. A. Duffie et W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Fourth éd., John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013.
- [35] J. Bernard, *Energie solaire. Calculs et optimisation*, Paris: Ellipse, 2011.
- [36] I. TABET, «Étude, Réalisation et simulation d'un capteur solaire,» Thèse de doctorat - UNIVERSITE DES FRERES MENTOURI CONSTANTINE, 2016.
- [37] S. Bensalem, «Effet de la température sur les paramètres caractéristiques des cellules solaires,» Mémoire de Magistère - Université Ferhat Abbas-Setif, 2011.

Résumé

Le but du présent travail est la modélisation et la simulation d'un capteur solaire photovoltaïque thermique ou capteur *PVT* en vue de la compréhension de son fonctionnement et l'estimation de ses performances électriques et thermiques. Nous avons sur ce, passé en revue les généralités sur les différentes technologies de conversion de l'énergie solaire dans un premier temps. Un accent particulier est mis sur la conversion photovoltaïque. Puis nous avons décrit le capteur solaire *PVT* et juste après nous avons donné un aperçu de travaux déjà réalisés sur ces capteurs. Ensuite un modèle thermique représenté par des équations de conservation de l'énergie et de transfert de chaleur nous a permis de mener une simulation. De la simulation, nous avons obtenus les profils de température ainsi que l'énergie électrique, l'énergie thermique, le rendement électrique et le rendement global du capteur. Les résultats obtenus nous ont permis de déterminer que le capteur *PVT* a des performances électriques moins élevées qu'un capteur *PV* et des performances thermiques moins élevées qu'un capteur thermique. Par contre son avantage réside dans le fait que son rendement global est beaucoup plus élevé que celui d'un capteur *PV* seul et thermique seul. Il peut donc s'avérer rentable si le coût du système de récupération de la chaleur est faible.

Mots-clés : *PV*; *PVT*; Cogénération; Capteur hybride.

Abstract

The main goal of this work is the modeling and simulation of a hybrid photovoltaic thermal solar collector or *PVT* collector. This will allow us to better understand its operation mode and have an idea on its electrical and thermal performance. First, we studied the general aspects of solar energy conversion with a focus on photovoltaic technology. We then gave a description of *PVT* solar collector and an overview of some works that have already been performed on this type of collectors. Mathematical equations were used to describe the thermal model. The simulation gave us temperature profiles of the different components of the collector. We also obtained the electrical energy, the useful thermal energy, and the electrical, thermal and global yields of the collector. Furthermore the results allowed us to find out that the *PVT* collector has a lower electrical performance compared to a *PV* collector and a lower thermal performance compared to that of a thermal collector. But the main advantage of a *PVT* collector lies in the fact that its overall performance is much higher than that of a *PV* collector or thermal collector only. A *PVT* collector can be economically viable if the cost of the heat recovery system is low.

Keywords: *PV*; *PVT*; Cogeneration; Hybrid collector.