

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BATNA FACULTE DES SCIENCES



MÉMOIRE

Présenté au

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ENERGETIQUE APPLIQUEE
ECOLE DOCTORALE DES ENERGIES RENOUVELABLES
DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA MATIERE

Pour l'obtention du diplôme

Magister en physique

Option : ENERGIES RENOUVELABLES

Par : KHELIFA Abdelkrim

Etude numérique et modélisation d'un capteur solaire hybride PV/T

Soutenu publiquement le : 2011

Devant le jury composé de :

❖ ZEROUAL Mostefa	MCA	U.Batna	Président	❖
❖ BEN MOUSSA Hocine	Pr	U.Batna	Rapporteur	❖
❖ BOUGOUL Saadi	Pr	U.Batna	Examineur	❖
❖ ADOUANE Belkacem	MCA	U.Batna	Examineur	❖
❖ MOUMMI Nouredine	MCA	U.Biskra	Examineur	❖
❖ TOUAFEK Khaled	MRB	U RAER	Invité	❖

2011

UNIVERSITE EL-HADJ LAKHDAR-BATNA



Remerciement

Tout d'abord, merci pour le grand **DIEU** qui m'a donné la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Au cours de ce travail, j'ai été encadré par Monsieur **BEN MOUSSA Hocine** directeur de l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables Ghardaïa, professeur au département de mécanique à l'université de **BATNA**, je tiens à le remercier pour m'avoir accepté d'être le directeur de ce mémoire, et pour ses encouragements, et les conseils précieux tout le long du travail.

Mes sincères remerciements vont également à **Dr TOUAFEK Khialed** (Maître de recherche au l'unité; **URAER**), Je souhaite également le remercier pour son aide précieuse m'ayant permis de mener à bien cette étude dans les meilleures conditions possibles, et surtout l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'attention toute particulière accordé à la lecture et à la correction de ce mémoire.

J'exprime mes sincères remerciements à monsieur **ZEROUAL Mostefa**, le docteur au département de physique à l'université de **BATNA**, d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Je remercie monsieur **BOUGOUL Saadi**, le professeur au département de physique à l'université de **BATNA**, Monsieur **ADOUANE Belkacem**, maître de conférences de l'université de **BATNA** et Monsieur **MOUMMI Noureddine**, maître de conférences de l'université de **BBISKRA** d'avoir accepté d'être examinateurs de ce travail.

Je remercie également tous les chercheurs de l'unité (**URAER**) sans exception pour leurs encouragements efficaces (**GAMA ; BEKHOUCHE ; THAMEUR...**).

Tous mes remerciements et mon estime à tous les enseignants du département de **PHYSIQUE**.

Enfin à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à l'aboutissement de ce travail, en particulier toute ma famille pour son soutien moral durant toute la durée de préparation de ce mémoire.



Sommaire

Liste des symboles

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

Chapitre 1

Généralités sur les énergies renouvelables

1.1- Introduction	3
1.2- Les forme des énergies renouvelables	3
1.3- Descriptions des capteurs photovoltaïques	13
1.3.1- Le panneau photovoltaïque	13
1.3.2- Le système photovoltaïque	15
1.4- Présentation des capteurs solaires thermiques	16
1.4.1- Les différents types des capteurs thermiques	17

Chapitre 2

Généralités sur les transferts thermiques

2.1- Introduction	19
2.2- Transfert par conduction	19
2.3- Transfert par convection	22
2.4- Transfert par rayonnement	28

Chapitre 3

Synthèse bibliographique sur les capteurs hybrides PVT

3.1- Synthèse bibliographique sur les capteurs solaires hybrides PVT	30
3.2- Les capteurs solaires PV/T à air	31
3.3- Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau	43
3.4- Capteurs PV/T de concentration	52

Chapitre 4

Modélisation d'un capteur solaire hybride PVT

4.1- Introduction	55
4.2- Éléments de constructions et principe	56
4.3- Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique	57
4.4- Principe de l'étude thermique d'un PVT	59
4.5- Bilan énergétique du capteur hybride PVT	59
4.6- Performances thermiques des capteurs hybrides	70

Chapitre 5

Interprétation et discussions des résultats

5.1- Introduction	75
5.2- La variation de rayonnement globale	76
5.3- La variation de la température ambiante et la température du ciel	77
5.4- L'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du PVT	77
5.5- La variation des températures de différents éléments du capteur	

SOMMAIRE

PVT	81
5.6- La production d'énergie électrique et thermique d'un PVT	83
5.7- Le rendement électrique et thermique	84
5.8- La variation de la température de sortie du fluide caloporteur ..	85
5.9- La variation de la température de réduite	86
5.10- Le rendement thermique en fonction de la température réduite	86
5.11- Comparaison avec des autres configurations	88

Conclusion générale

Bibliographie

Annexe

LISTE DES SYMBOLES

Liste des symboles

Nous donnons dans cette table la liste des principaux symboles utilisés ainsi que la définition des paramètres qu'ils désignent

A :	Surface [m^2]
C :	Chaleur spécifique [$1/Kg K$]
cel :	Cellule solaire
D :	Diamètre intérieur du tube [m]
F :	Efficacité d'ailette
f :	Fluide
FR :	Facteur d'extraction de la chaleur du collecteur
G :	Eclairement global [W/m^2]
hc-a :	Coefficient d'échange par convection avec l'ambient [$W/m^2 K$]
hcond :	Coefficient d'échange par conduction [$W/m^2 K$]
hconv :	Coefficient d'échange par convection [$W/m^2 K$]
i :	Isolant
L :	Longueur du tube [m]
M :	Masse [Kg]
m :	Débit massique [Kg/s]
N :	Nombre des vitres
n :	Nombre des tubes

LISTE DES SYMBOLES

Nu :	Nombre de Nusselt
Pr :	Nombre de Prandlt
PVT :	Photovoltaïque thermique
p :	Plaque
Qth:	Energie thermique [W]
Qele :	Energie électrique [W]
Re :	Nombre de Reynolds
T :	Température [K]
Ta :	Température ambiante [K]
Ts :	Température de sortie du fluide [K]
Te :	Température d'entrée du fluide [K]
ted :	Tedlar
t :	Tube
U_{p-a} :	Coefficient des pertes
v :	Verre
W :	Distance entre deux tubes [m]
λ :	Conductivité thermique [W/m K]
ε :	Emissivité
$\tau\alpha$:	Transmittivité-absorptivité du rayonnement par le capteur
ρ :	Masse volumique [Kg/m ³]
v :	Vitesse [m/s]
τ :	Transmittivité du verre
μ :	Viscosité dynamique de l'eau [Kg/m.s]

Liste des figures

Figure 1- 1 : Chauffe-eau solaire -----	4
Figure 1- 2 : Centrale à tour -----	5
Figure 1- 3 : Système à réflecteur cylindro-parabolique -----	6
Figure 1- 4 : Système à réflecteur parabolique -----	7
Figure 1- 5 : Les deux types de l'éolienne -----	8
Figure 1- 6 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique -----	10
Figure 1- 7 : Principe de la géothermie -----	11
Figure 1- 8 : Géothermie à haute énergie -----	12
Figure 1- 9 : Géothermie à basse énergie -----	12
Figure 1-10 : Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque -----	13
Figure 1-11 : Schéma de principe d'un panneau PV connecté au réseau -----	15
Figure 1-12 : Exemple de panneaux PV connectés au réseau et montés sur la toiture d'un bâtiment -----	15
Figure 1-13 : Intégration de 900 m ² de modules PV Sarnasol sur la toiture (Inclinée à 20°) d'une école à Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol) -----	16
Figure 1-14 : Vue générale d'un capteur plan -----	17
Figure 2-1 : Schéma de transfert de chaleur par conduction -----	20
Figure 2-2 : Schéma de transfert de chaleur convectif -----	23
Figure 2-3 : Schéma de transfert de chaleur par rayonnement -----	29
Figure 3-1 : Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV -----	32
Figure 3-2 : Schéma du capteur solaire hybride PVT à air -----	32
Figure 3-3 : Les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PVT à air -----	33
Figure 3-4 : Schéma d'intégration de composants solaires à la façade Sud d'un bâtiment -----	35

LISTE DES FIGURES

Figure 3-5 : Capteurs solaires combinés intégrés à la toiture du Brockshill Environment Center -----	36
Figure 3-6 : Banc d'essai du capteur solaire hybride PVT à air -----	37
Figure 3-7 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à air à ailettes -----	39
Figure 3-8 : Quelques exemples de modifications du capteur solaire PV/T hybride à air -----	40
Figure 3-9 : Diagramme schématique de double collecteur d'air du passage (PV/T) avec des ailerons -----	42
Figure 3-10 : Coupe transversale du composant hybride à eau -----	43
Figure 3-11 : Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposées -----	45
Figure 3-12 : Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor -----	46
Figure 3-13 : Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau -----	47
Figure 3-14 : Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau -----	48
Figure 3-15 : Le capteur solaire PV/T hybride à eau -----	48
Figure 3-16 : Premier et second prototypes construits -----	49
Figure 3-17 : Section du capteur solaire hybride à eau étudié -----	50
Figure 3-18 : Capteurs PVT de concentration -----	53
Figure 4-1 : Vu des trois couches de panneau photovoltaïque -----	56
Figure 4-2 : Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur : a) à eau. b) à air. -----	57
Figure 4-3 : Modèle d'un capteur hybride PVT -----	58
Figure 4-4 : Schéma électrique équivalent du capteur hybride -----	58
Figure 4-5 : Coupe du capteur représentant les températures des différents Nœuds -----	59
Figure 4-6 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure -----	61
Figure 4-7 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure -----	62

LISTE DES FIGURES

Figure 4-8 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque -----	63
Figure 4-9 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar -----	63
Figure 4-10(a-b) : Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante -----	64
Figure 4-11 : Ecoulement du fluide dans un tube -----	67
Figure 4-12 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face intérieure -----	68
Figure 4-13 : Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face extérieur -----	68
Figure 5.1 : Variations temporelles du rayonnement global -----	76
Figure 5.2 : Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel -----	77
Figure 5.3.a : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur -----	78
Figure 5.3.b : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur -----	78
Figure 5.3.c : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur -----	79
Figure 5.4.a : Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $W=1$ Cm -----	80
Figure 5.4.b : Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $W=1,5$ Cm -----	80
Figure 5.4.c : Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $W=2$ Cm -----	81
Figure 5-5 : La variation des températures de différents éléments du capteur PVT -----	82
Figure 5-6 : La production de l'énergie électrique par le capteur PVT -----	83
Figure 5-7 : La production de l'énergie électrique par le capteur PVT -----	83

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux	-----21
Tableau 2.2 : Prandtl de quelques gaz	-----26
Tableau 2.3 : Prandtl de quelques liquides	-----26
Tableau 4.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants	-----57

Introduction générale

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

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

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

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

L'objectif de notre travail est d'étudier théoriquement et de modéliser le capteur hybride à travers la détermination des niveaux des températures de ces différentes couches et ainsi d'étudier l'influence de quelques paramètres sur ses performances électriques et thermiques et enfin de faire une comparaison avec d'autres configurations existantes.

Ce mémoire est divisé en cinq chapitres :

➡ Nous avons présenté dans le premier chapitre les différents types des énergies renouvelables, leurs disponibilités et le principe général de fonctionnement de chaque type de ces énergies.

➡ L'explication des différents modes de transfert de chaleur : tel que le transfert par conduction, par convection et par rayonnement, ainsi qu'un aperçu sur les différents types des capteurs solaires, font l'objet du second chapitre.

➡ Le chapitre trois est consacré à une synthèse bibliographique sur les capteurs solaires hybrides concernant les différents modèles, géométries des absorbeurs utilisés, et les applications de ces modèles.

➡ La modélisation numérique du comportement énergétique du capteur hybride est l'objet du quatrième chapitre. En effet nous avons en premier lieu présenté une étude théorique sur les capteurs hybrides : les bilans énergétiques au niveau de chaque couche du dispositif ainsi que l'expression explicite des différents flux intervenant dans les échanges de chaleur.

➡ Enfin nous avons présenté les résultats obtenus dans le cinquième chapitre avec une validation expérimentale des résultats trouvées. Puis une conclusion générale et des perspectives de recherches terminent ce mémoire.

Ces cinq chapitres sont complétés par l'annexe qui rappelle les principales données astronomiques généralement utilisées pour caractériser le rayonnement solaire.

CHAPITRE 01

Expert PDF Evaluation

Chapitre 1

Généralités sur les énergies renouvelables

1-1- Introduction

La consommation de l'énergie mondiale et dans notre pays ne cesse d'augmenter. La grande partie de l'énergie consommée provient des combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon, ...etc.) dont l'utilisation massive peut conduire à l'épuisement de ces réserves et menace réellement l'environnement. Cette menace c'est manifesté principalement à travers la pollution et le réchauffement global de la terre par effet de serre.

Ainsi l'augmentation brutale du prix du pétrole survenue en 1973 a conduit une première fois l'homme à s'intéresser à d'autres sources d'énergies inépuisables dites : ENERGIES RENOUVELABLES

Dans le terme énergie renouvelable, le mot renouvelable signifie que les sources captées pour créer de l'énergie se renouvellent et se reconstituent constamment et en un temps raisonnablement court (c.-à-d. des mois ou des années et non des siècles). Ces sources d'énergies sont l'eau, le vent, le soleil, la biomasse et la chaleur de l'intérieur de la planète (Géothermie).

1-2- Les formes d'énergies renouvelables

1-2-A- L'énergie solaire

Le soleil est une source abondante et écologique d'énergie renouvelable. Aujourd'hui, nous captions l'énergie solaire pour chauffer les maisons et l'eau, et pour produire de l'électricité au moyen de trois différentes méthodes et technologies : l'énergie solaire passive, l'énergie solaire active et l'énergie photovoltaïque.

1-2-A-1- Énergie solaire passive

Le terme « passif » renvoie aux techniques utilisées pour capter l'énergie. Ces techniques misent sur la conception des immeubles et le type de matériaux utilisés pour les construire. La conception solaire passive ne date pas d'hier. Il y a cent ans, des familles peignaient des réservoirs noirs et les plaçaient au soleil pour chauffer

leur eau. Les surfaces noires absorbaient la chaleur qui était transférée du métal des réservoirs à l'eau. Cette méthode est toujours utilisée dans les pays chauds.

Aujourd'hui, la conception solaire passive utilise les éléments fondamentaux d'un immeuble, les murs, la toiture et les fenêtres, pour contrôler la quantité d'énergie solaire absorbée ou perdue.

1-2-A-2- Énergie solaire active

Le système d'énergie solaire active utilise des capteurs solaires pour capter l'énergie du soleil et produire de l'électricité afin d'alimenter des pompes et des ventilateurs qui distribuent de l'eau et de l'air chaud.

Les technologies les plus répandues utilisent de l'air et de l'eau pour chauffer des maisons, des bureaux, des usines et des immeubles d'habitations.

a- Chauffe-eau solaire

C'est une méthode de chauffage de l'eau utilisant des capteurs vitrés ou non vitrés. Le capteur comprend une surface absorbante noire qui absorbe le rayonnement solaire.

L'énergie solaire réchauffe un fluide caloporteur qui circule dans les tubes, sous le capteur.

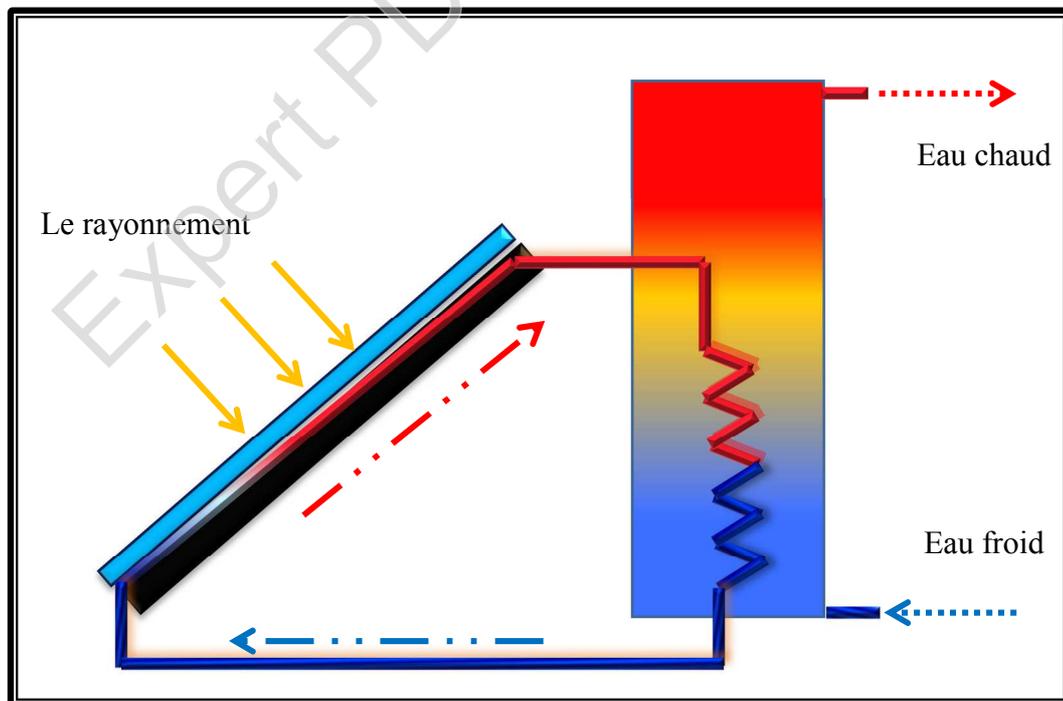


Figure 1- 1 - Chauffe-eau solaire

Dans les capteurs vitrés, l'absorbeur et les tubes sont placés entre un vitrage (verre) et un panneau isolé. Ce type de capteur est utilisé pour chauffer de l'eau lorsqu'on veut obtenir une température de 30 à 70 °C. Par contre, les capteurs non vitrés ne sont pas isolés et servent à chauffer l'eau des piscines, lorsque la température de l'eau doit être inférieure à 30 °C.

b- Centrales électriques solaires

Elles se composent de plusieurs systèmes qui concentrent en un seul endroit le rayonnement solaire. Ces systèmes comprennent les centrales à tour, les systèmes à réflecteurs cylindro-paraboliques et les systèmes à réflecteurs paraboliques.

c- Centrale à tour

Une centrale à tour utilise un certain nombre de grands miroirs plats qui suivent le mouvement du soleil et qui concentrent la lumière sur un grand absorbeur situé au sommet d'une tour. Le système pompe un fluide, soit une huile synthétique à haute température ou du sel fondu, dans l'absorbeur où il est chauffé jusqu'à 550 °C et ensuite utilisé pour produire de l'électricité.

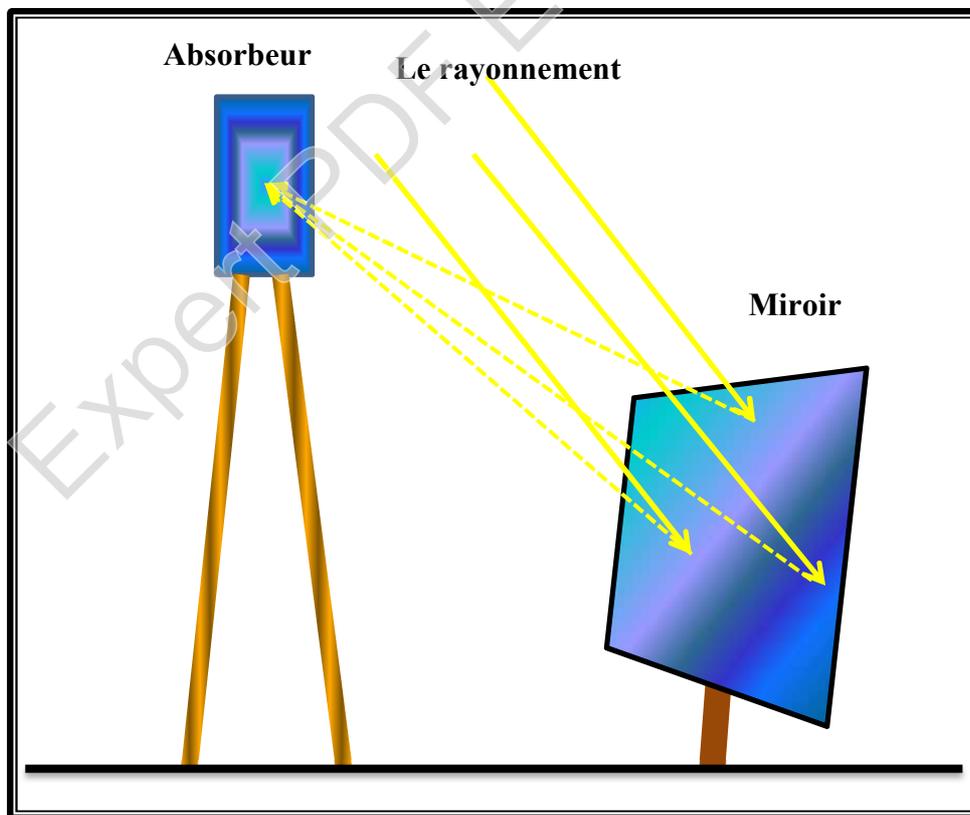


Figure 1- 2 - Centrale à tour

d- Système à réflecteur cylindro-parabolique

Comme son nom l'indique, ce système utilise une série de longs réflecteurs cylindriques en forme de parabole. La parabole concentre la lumière sur un tube récepteur situé le long de la ligne focale du réflecteur. Les températures du récepteur peuvent atteindre 400 °C et peuvent produire de la vapeur afin de produire de l'électricité.

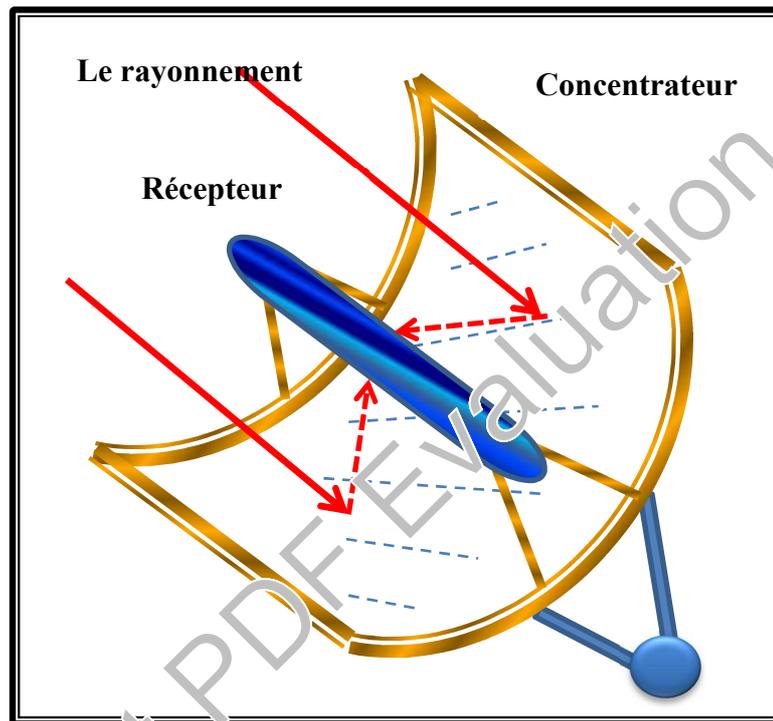


Figure 1-3 - Système à réflecteur cylindro-parabolique

e- Système à réflecteur parabolique

Un système à réflecteur parabolique utilise des miroirs paraboliques pour concentrer le rayonnement solaire sur un récepteur situé au foyer du réflecteur. Le récepteur contient un fluide qui, lorsque les rayons du soleil le frappent, atteint une température de 750 à 1 000 °C. Ce fluide très chaud est ensuite utilisé pour produire de l'électricité dans un petit moteur fixé au récepteur, dans ce système le réflecteur parabolique peut aussi suivre les mouvements du soleil.

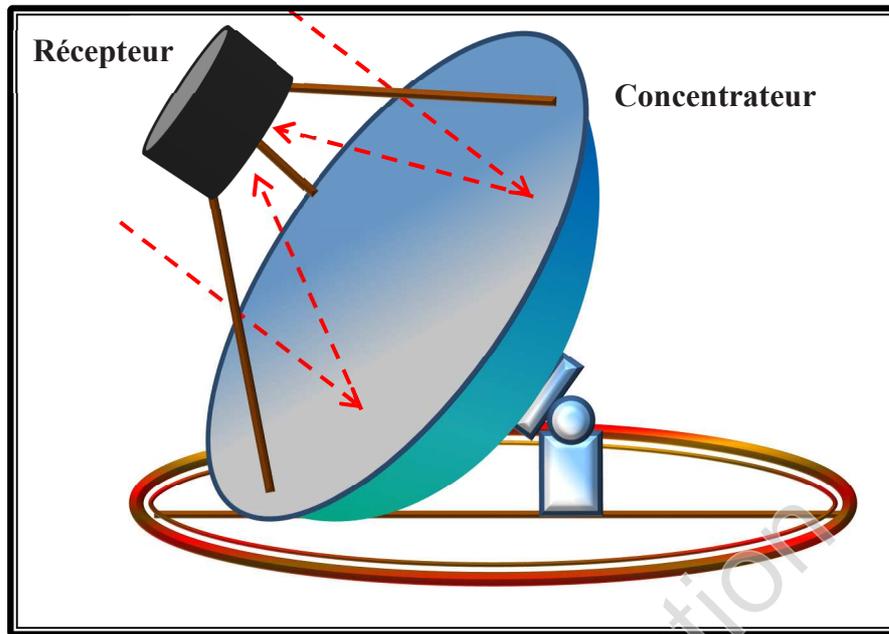


Figure 1- 4 - Système à réflecteur parabolique

1-2-B- L'énergie éolienne

Le vent est une source intermittente d'énergie puisqu'il ne souffle pas toujours à la vitesse requise pour produire de l'électricité.

C'est un principe vieux comme les moulins à vent, le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice, elle fonctionne comme suit :

- Le vent traverse les pales de rotor, les faisant tourner.
- L'arbre du rotor peut être fixé à un multiplicateur, qui peut accroître la vitesse, ou encore il peut être fixé directement dans la génératrice et produire de l'électricité.
- Plus le vent souffle fort, plus on peut capter de l'énergie et plus on peut produire de l'électricité. Si le vent est trop fort, l'éolienne s'arrêtera en se détournant du vent et en appliquant un mécanisme de frein qui empêche les pales de tourner trop rapidement et de s'endommager.

Il existe deux modèles de base d'éoliennes : le modèle à axe horizontal et le modèle à axe vertical. [58]

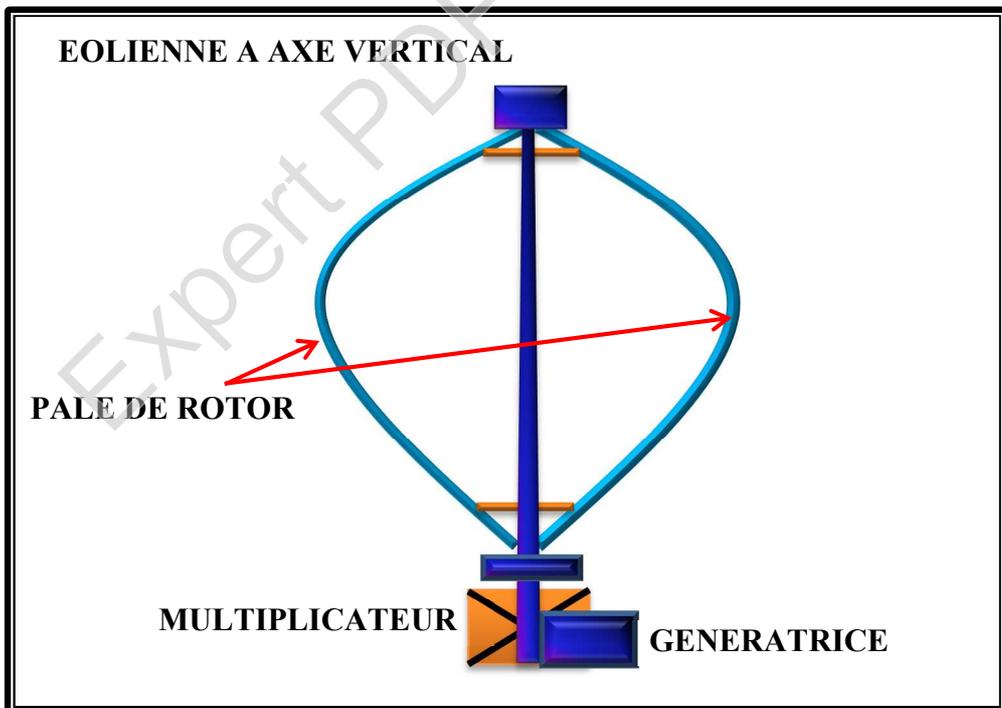
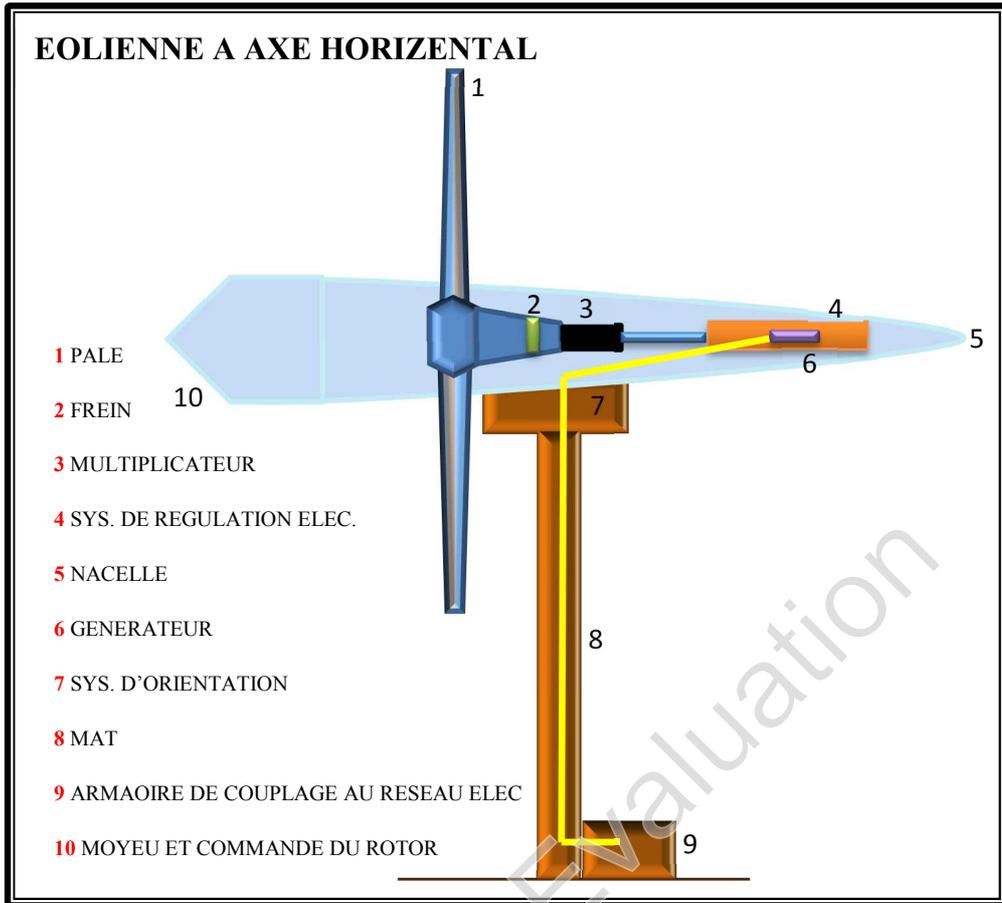


Figure 1- 5 - LES DEUX TYPES DE L'EOLIENNE

1-2-B-1- Éolienne à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontal ressemble davantage à un moulin à vent avec ses deux ou, plus souvent, trois pales de rotor fixées comme une hélice sur le devant et au sommet de la tour. Sur certaines éoliennes de ce type, les pales de rotor peuvent être posées à plat et basculer vers l'avant et vers l'arrière (ou « s'incliner ») pour capter le vent. On les appelle éoliennes à pas variable.

Le multiplicateur, le frein et la génératrice sont logés dans un coffre, ou une nacelle, derrière les pales de rotor, au sommet de la tour. [58]

1-2-B-2- Éolienne à axe vertical

L'éolienne à axe vertical ressemble à un batteur à œufs. Les pales de rotor sont fixées au sommet et près du bas de la tour, et sont bombées au centre. Le multiplicateur et la génératrice sont logés dans une structure de protection, à la base de la tour.

1-2-C- Énergie hydraulique

Les centrales hydroélectriques convertissent le potentiel d'énergie de l'eau en énergie électrique en créant une chute du dénivelé de l'eau.

Certaines centrales hydroélectriques tirent parti d'une chute naturelle du dénivelé d'une rivière.

De nombreuses centrales hydroélectriques utilisent toutefois des barrages pour faire monter les niveaux d'eau en amont de la centrale et utilisent la baisse des niveaux pour produire davantage d'électricité ou pour stocker de l'eau et la libérer pour produire de l'électricité en fonction de la demande.

La quantité d'électricité produite dépend de la distance verticale que l'eau franchit et du débit de l'eau.

- L'eau de la rivière ou du réservoir derrière le barrage passe par une ouverture, habituellement une prise d'eau, et ensuite dans un tuyau appelé conduite forcée.
- L'eau traverse la conduite forcée sous pression jusqu'à son extrémité, où se trouve une turbine.
- La force de l'eau fait tourner les aubes de la turbine, qui font tourner l'arbre à l'intérieur.
- L'arbre de la turbine est relié à un alternateur, qui produit de l'électricité.
- Une fois passée la turbine, l'eau circule dans un conduit, appelé aspirateur, sort de la centrale par un canal, appelé canal de fuite, et retourne à la rivière.

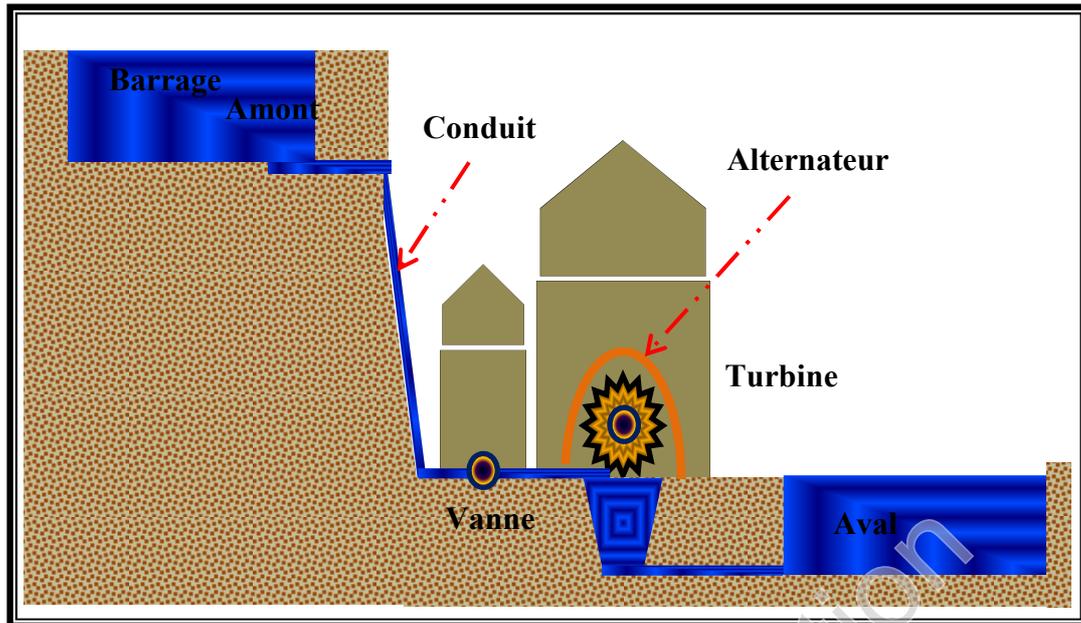


Figure 1- 6 - Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

1-2-D-La biomasse :

La « biomasse » est un terme général qui fait référence aux matières organiques et qui englobe les plantes, les arbres.

Il y a plusieurs façons de transformer la biomasse en chaleur et en électricité, dont la combustion directe, la digestion anaérobie, la pyrolyse et la gazéification.

a- Combustion directe

La façon la plus simple de produire de l'énergie à partir de la biomasse est de la brûler. C'est ce qu'on appelle la combustion directe. Toute matière organique qui est suffisamment sèche peut être brûlée. La chaleur est utilisée pour faire chauffer de l'eau et produire de la vapeur, qui fait tourner une turbine fixée à une génératrice pour produire de l'électricité. Dans certains cas, la chaleur produite sert aussi à chauffer des édifices et de l'eau.

b- Digestion anaérobie

La digestion anaérobie est un processus qui décompose la matière organique, telle que la partie organique des déchets municipaux, dans un réservoir, un conteneur ou un bassin totalement privé d'oxygène. Les déchets comportent des microorganismes qui, lorsqu'ils digèrent la biomasse, comme le fumier, les déchets organiques ou les résidus des lieux d'enfouissement, produisent un gaz combustible. Ce gaz est composé principalement de méthane et de dioxyde de carbone, et est

appelé biogaz. Ce biogaz, qui est un combustible raisonnablement peu polluant, peut être utilisé dans une centrale électrique.

c- La pyrolyse

La pyrolyse fait référence au processus thermo-chimique utilisé pour convertir la biomasse solide en combustible liquide. Au cours du processus, la biomasse est chauffée dans un réservoir privé d'oxygène, afin de produire un gaz riche en hydrocarbures, qui est ensuite rapidement refroidi en un liquide qui ressemble à de l'huile et en un résidu solide, ou produit de carbonisation, habituellement appelé charbon et utilisé pour le brûlage. La pyrolyse a l'avantage de produire des combustibles liquides renouvelables, qui peuvent être entreposés, transportés et brûlés plus facilement que les déchets ligneux solides.

d- La gazéification

La gazéification est une forme de pyrolyse. Elle requiert davantage d'air que la pyrolyse lorsque la biomasse est chauffée. Le gaz qui en résulte, appelé gaz de gazogène, est un mélange de monoxyde de carbone, d'hydrogène et de méthane, ainsi que de dioxyde de carbone et d'azote. Ce gaz est brûlé pour produire de la vapeur ou utilisé dans des turbines à gaz pour produire de l'électricité.

1-2-E- La géothermie

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité. C'est une application suivant la profondeur, à chaque fois que l'on descend de 100 m sous terre, on gagne 2 à 3 °C en moyenne.

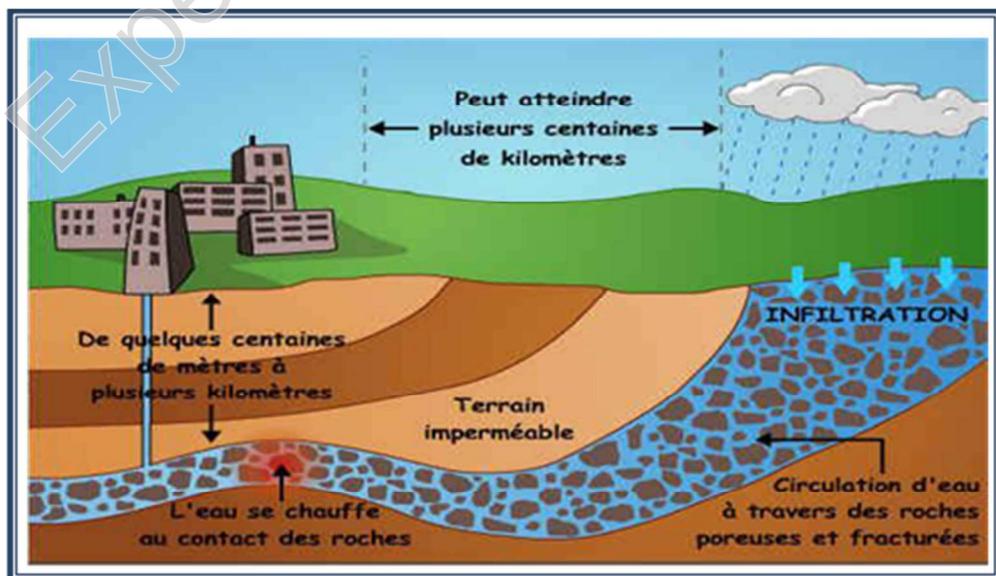


Figure 1- 7 - Principe de la géothermie

On caractérise 3 types d'énergie :

1. La géothermie à haute énergie.
2. La géothermie à basse énergie.
3. La géothermie à très basse énergie.

1-2-E-1- La géothermie à haute énergie : la température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité.

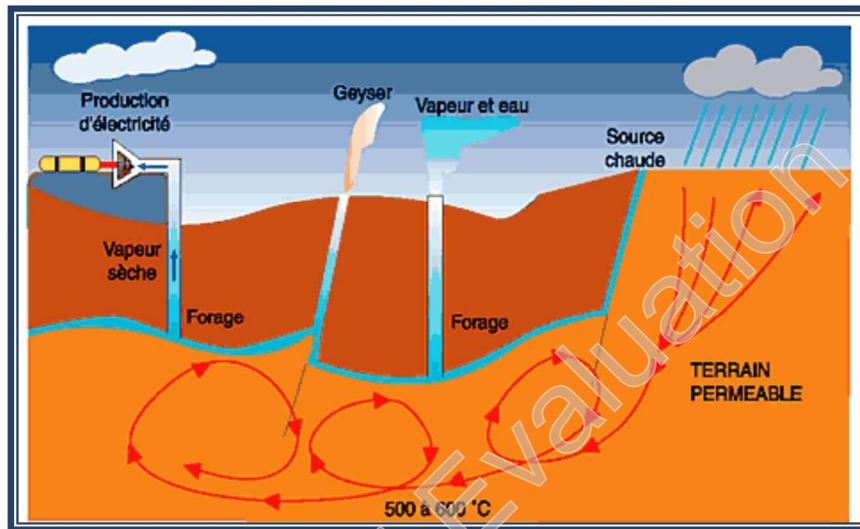


Figure 1- 8 - Géothermie à haute énergie

1-2-E-2- La géothermie à basse énergie : La température de l'eau entre 30 °C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.

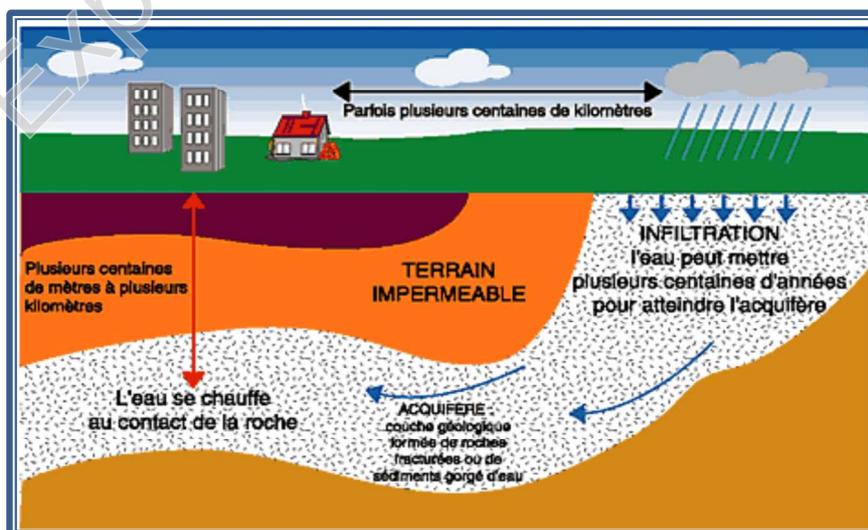


Figure 1- 9 - Géothermie à basse énergie

La géothermie à très basse énergie : la température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

1-3- Description des capteurs photovoltaïques

1-3-1- Le panneau photovoltaïque

Les panneaux solaires sont constitués de l'assemblage en série et en parallèle de plusieurs modules photovoltaïques. Ces modules sont composés de la connexion en série d'un certain nombre de cellules solaires.

La cellule photovoltaïque (ou cellule solaire) est l'élément de base de l'effet photovoltaïque (ou conversion par photopiles) permettant de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire (**figure 1-10**). Ce phénomène implique la production et le transport de charges négatives et positives sous l'effet de la lumière dans un matériau semi-conducteur (qui est la plupart du temps, le silicium). En heurtant la surface de ce matériau, les photons transfèrent leur énergie aux électrons contenus dans la matière dopée négativement et positivement (jonction p-n). Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique continu (CC) I qui est recueilli par des fils métalliques très fins micro-soudés en surface [1].

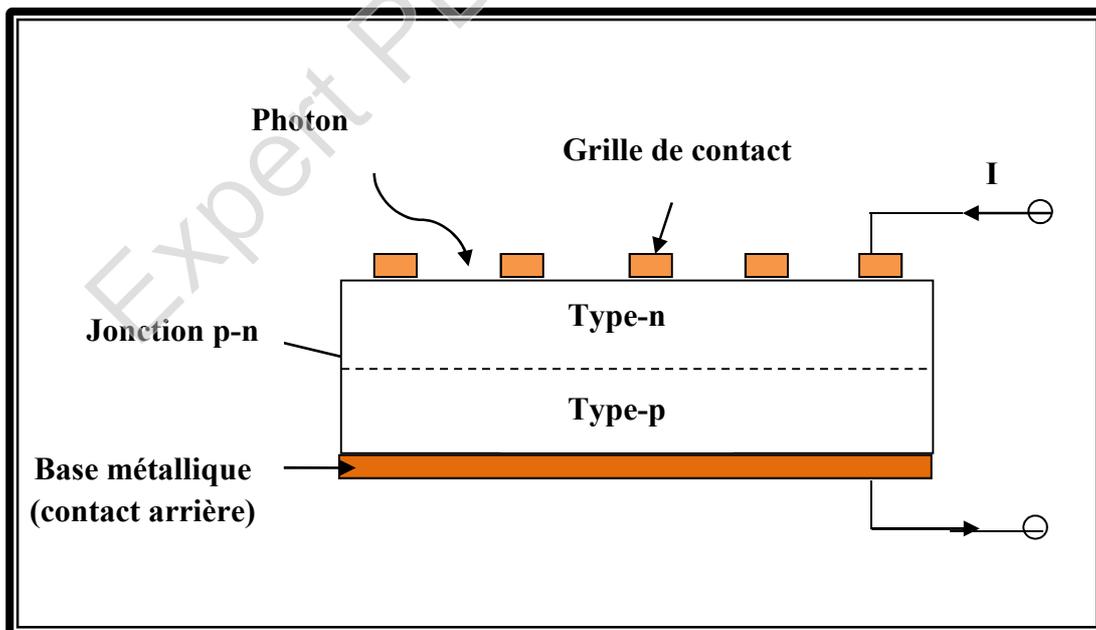


Figure 1-10: Principe de fonctionnement du générateur photovoltaïque

Deux principaux types de cellules au silicium se distinguent : les cellules cristallines (c-Si) et les cellules amorphes (a-Si). Les cellules en silicium cristallin sont les plus commercialisées et comprennent les cellules monocristallines offrant un bon rendement électrique situé entre 10 et 17 % et les cellules poly-cristallines ayant un rendement électrique compris entre 11 et 15 %. Les cellules monocristallines offrent un meilleur rendement électrique mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse. En effet, l'obtention d'un cristal pur nécessite une grande quantité d'énergie. Les cellules poly-cristallines nécessitent un procédé de fabrication consommant moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible malgré leur rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines.

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

Elles sont adaptées aux installations solaires PV/T hybrides à grande superficie car la faiblesse du rendement électrique est compensée par un bon rendement thermique [3].

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

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

1-3-2- Le système photovoltaïque

Ce type de système peut comprendre en dehors du panneau PV, une batterie permettant le stockage de l'énergie électrique produite, un système de régulation de charge permettant la gestion de la batterie, et éventuellement un onduleur permettant la conversion du courant continu en alternatif.

Le système PV peut être connecté directement au réseau électrique par l'intermédiaire d'un onduleur (**Figure 1-11**).

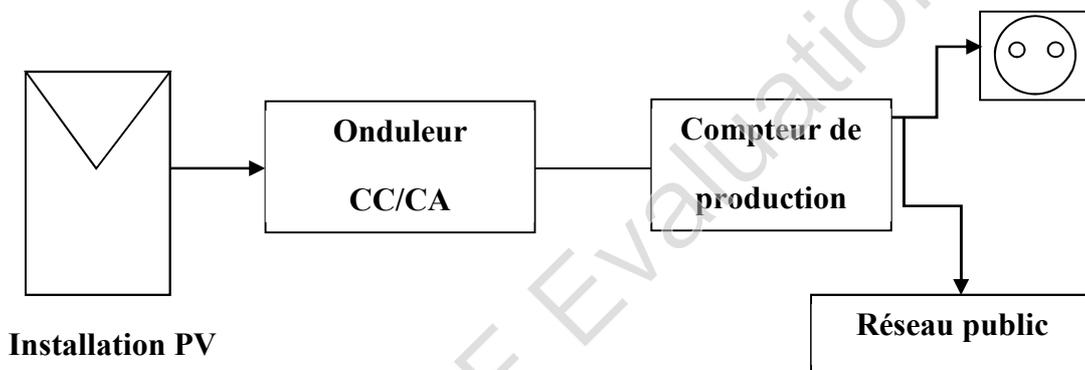


Figure 1 -11: Schéma de principe d'un panneau PV connecté au réseau

La **Figure 1-12** présente un exemple de panneaux PV connectés au réseau et montés en toiture.



Figure 1-12: Exemple de panneaux PV connectés au réseau et montés sur la toiture d'un bâtiment

De plus, la **Figure 1-13** présente un système PV composé de 12 branches de 5 modules PV nommés Sarnasol, et intégré à la toiture de 900 m² d'une école professionnelle de Lugano, au sud de la Suisse. Ces modules PV Sarnasol sont constitués de cellules PV amorphes UNI-SOLAR recouvertes d'une membrane flexible en polyoléfine. Ce système PV fournit une puissance électrique totale de 15.36 kWc, soit une production annuelle de 16423 kWh, soit 1069 kWh / kWc [6].



Figure 1-13: Intégration de 900 m² de modules PV Sarnasol sur la toiture (inclinée à 20°) d'une école à Lugano en Suisse (12 branches de 5 modules PV Sarnasol) [6]

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

Un grand nombre de prototypes de capteurs solaires hybrides sont réalisés par combinaison d'un champ PV à un capteur solaire thermique préexistant. Le paragraphe suivant donne une synthèse des divers types de capteurs solaires thermiques.

1-4- Présentation des capteurs solaires thermiques

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

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

1-4-1- Les différents types des capteurs thermiques

Les capteurs solaires sont caractérisés par leur mouvement (stationnaire, à poursuite simple et à poursuite double) et par leur température opératoire. Les capteurs stationnaires ont une position fixe et ne suivent pas la position du soleil dans le ciel. On en distingue trois types :

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

Puisque on va utiliser dans ce travail un capteur hybride qui contient un capteur solaire plan, donc dans ce qui suit, on va présenter un peu les détails et le principe de fonctionnement d'un capteur solaire plan typique (**figure 1-14**).

Quand l'énergie solaire passe à travers la couverture transparente et entre en contact avec la surface noire de l'absorbeur, une grande partie est absorbée et transférée au fluide circulant dans les tubes vers le ballon de stockage ou vers d'autres utilisations. La partie arrière de l'absorbeur est généralement constituée d'une couche isolante qui réduit les pertes par conduction. Les tubes peuvent être soudés à la plaque absorbante ou ils peuvent faire partie intégrale de la plaque.

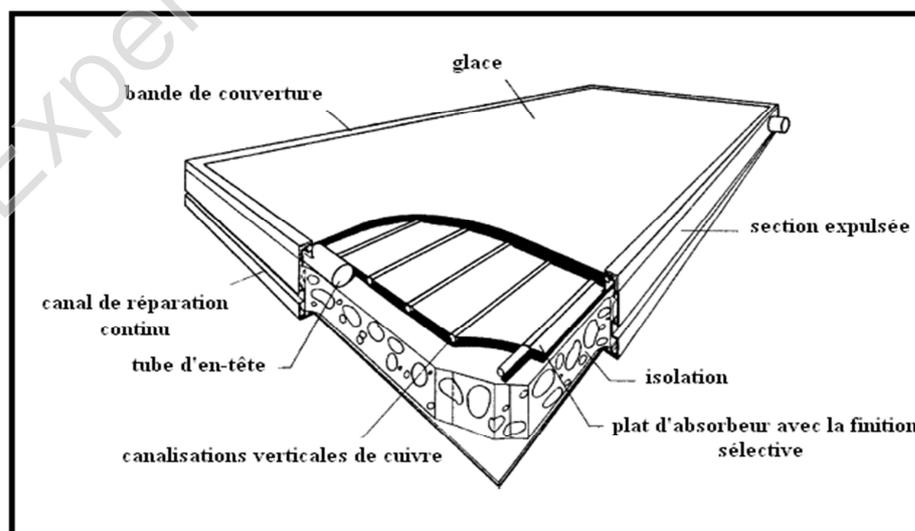


Figure 1-14 : Vue générale d'un capteur plan [7]

La couverture transparente est utilisée pour réduire les pertes par convection de l'absorbeur. L'air étant l'un des meilleurs isolants. On le piège au-dessous de la couverture, sous réserve que la lame d'air n'a pas une épaisseur supérieure à 3 cm pour éviter des phénomènes convectifs.

Les capteurs plans sont généralement fixes et n'ont pas besoin de suivre la position du soleil. Ils doivent être orientés vers l'équateur, vers le Sud dans l'hémisphère Nord et vers le Nord dans l'hémisphère Sud. La position optimale d'inclinaison du capteur est égale à la latitude avec des variations de ± 10 à 15 degrés selon l'application.

Expert PDF Evaluation

CHAPITRE 02

Expert PDF Evaluation

Chapitre 2

Généralités sur les transferts thermiques

2-1- Introduction

Les capteurs solaires reçoivent l'énergie et la convertissent soit en électricité pour les panneaux photovoltaïques ou en chaleur pour les capteurs solaires thermiques ou bien en électricité et en chaleur pour les capteurs hybrides. Non toute cette énergie est convertie en électricité et/ou en chaleur puisque les capteurs ne sont pas 100% efficaces. La majeure partie de cette énergie est perdue à l'environnement. Cette énergie peut être transférée en général sous trois formes, transfert par conduction, par convection et par rayonnement.

2-2- Transfert par conduction

La conduction est le transfert de la chaleur à partir d'une partie d'une substance à une autre partie de la même substance, ou bien d'une substance à l'autre en contact physique avec elle, elle est traduite par le coefficient de conductibilité thermique qui s'exprime en:

- ❖ *Kcal/h/m/deg*
- ❖ *Watt/m/deg*

La transmission de chaleur par ce moyen est d'autant plus faible que le matériau est épais et de faible densité.

Dans le cas d'un capteur solaire, l'énergie est absorbée par la vitre et par les cellules de silicium et la chaleur est conduite à l'arrière et avant du capteur par l'intermédiaire des couches intervenantes. La loi de Fourier pour l'état d'équilibre, des applications unidimensionnelles est comme suit :

$$Q = -\lambda A \frac{dT}{dx} \dots \dots \dots (2 - 1)$$

Où :

Q : Est le flux de chaleur transmis par conduction [W]

λ : Est la conductivité thermique du matériau [$\frac{W}{m K}$]

A : La surface de la section perpendiculaire [m^2]

$\frac{dT}{dx}$ La variation de la température en ce qui concerne la longueur du chemin de transfert de chaleur.

Pour une plaque plane simple d'épaisseur L , l'équation devient :

$$Q = -\lambda A \frac{(T_2 - T_1)}{L} \dots \dots \dots (2 - 2)$$

Et pour une plaque composite composer de deux matériaux:

$$Q = -\lambda A \frac{(T_2 - T_1)}{\frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2}} \dots \dots \dots (2 - 3)$$

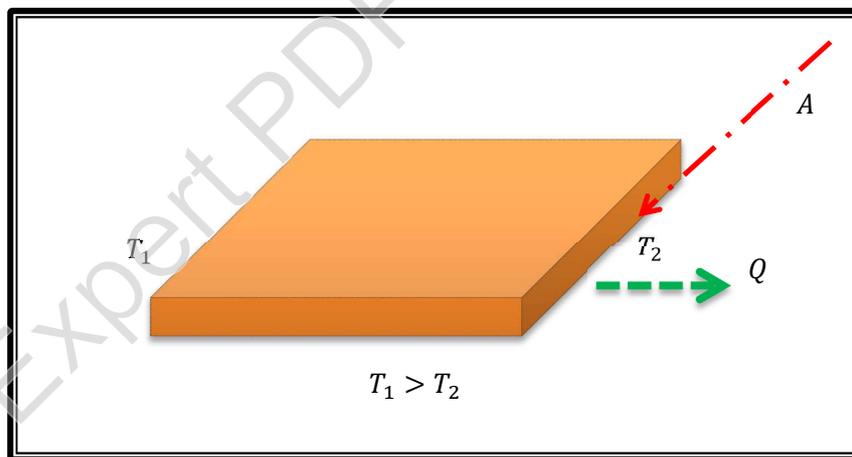


Figure 2-1- Schéma de transfert de chaleur conductif

Le tableau 2.1 contient les conductivités thermiques de différents matériaux et de quelques matériaux isolants :

METAUX ET ALLIAGES (à la température ambiante)			
Aluminium à 99,9 %	228	Zinc	111
Aluminium à 99 %	203	Acier doux (1 % de C)	46
Cuivre à 99,9 %	386	Acier inox (Cr 18 % - Ni 8 %)	16
Etain	61	Alliage (Al 92 % - Mg 8 %)	104
Fer pur	85	Laiton (Cu 70 % - Zn 30 %)	99
Nickel pur	61	Titane	21
Plomb pur	35		
SOLIDES NON METALLIQUES (à la température ambiante)			
Amiante (feuilles)	0,162	Liège	0,046
Béton plein	1,7	Matières plastiques phénoplastes	0,046
Briques de terre cuite pleines	1,16	Matières plastiques polyester	0,209
Plaque de fibrociment	0,74	Matières plastiques polyvinyles	0,162
Verre courant	0,70	Porcelaine	0,928
Verre pyrex	1,16	Laine de verre	0,046
Electrographite	116		
LIQUIDES normale)	GAZ (à 0°C et sous la pression normale)		
Eau à 20°C	0,59	Air	0,024
Eau à 100°C	0,67	Azote	0,024
Quelques matériaux isolants			
Laine de verre			0.036
Polystyrène expansé			0.040
Laine de roche			0.040
Laine (vêtement)			0.040

Tableau 2.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux

2-3- Transfert par convection

La convection est un mode de transport d'énergie par l'action combinée de la conduction, de l'accumulation de l'énergie et du mouvement du milieu. La convection est le mécanisme le plus important de transfert d'énergie entre une surface solide et un liquide ou un gaz. Le transfert d'énergie par convection d'une surface dont la température est supérieure à celle du fluide qui l'entoure s'effectue en plusieurs étapes. D'abord la chaleur s'écoule par conduction de la surface aux molécules du fluide adjacentes. L'énergie ainsi transmise sert à augmenter la température et l'énergie interne de ces molécules du fluide. Ensuite les molécules vont se mélanger avec d'autres molécules situées dans une région à basse température et transférer une partie de leur énergie. Dans ce cas l'écoulement transporte le fluide et l'énergie. L'énergie est, à présent, emmagasinée dans les molécules du fluide et elle est transportée sous l'effet de leur mouvement.

La transmission de chaleur par convection est désignée, selon le mode d'écoulement du fluide, par convection libre et convection forcée. Lorsqu'il se produit au sein du fluide des courants dus simplement aux différences de températures, on dit que la convection est naturelle ou libre. Par contre si le mouvement du fluide est provoqué par une action externe, telle une pompe ou un ventilateur, le processus est appelé convection forcée.

Le transfert de chaleur par convection est décrit en utilisant des corrélations entre certains paramètres sans dimensions. De tels paramètres sont les nombres de Nusselt, de Reynolds et de Prandtl. Ces paramètres sont employés afin de déterminer la valeur de h pour chaque cas :

$$Q = h A (T_s - T_f) \dots \dots \dots (2 - 4)$$

La loi de Newton du refroidissement est alors employée afin de calculer le transfert de chaleur par convection.

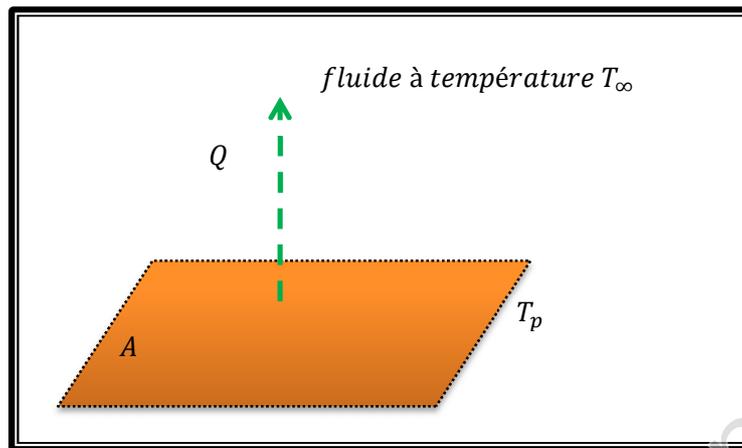


Figure 2-2- Schéma de transfert de chaleur convectif

Selon la nature des mécanismes engendrant des fluides, on distingue trois types de transfert par convection :

2-3-1- Convection libre ou naturelle :

Lorsqu'un fluide se trouve en contact avec un corps chaud, sa température augmente et sa masse volumique diminue, et il se déplace (il monte) par rapport au corps chaud. Cet écoulement de fluide le long de ce corps chaud entraîne un phénomène de convection que l'on appelle naturelle ou libre. Si le fluide est plus chaud que le corps, l'écoulement se fera vers le bas mais il y aura toujours de la convection.

2-3-2- Convection forcée :

Le mouvement du fluide est provoqué par une intervention mécanique indépendante de toute hétérogénéité dans la répartition des températures au sein du fluide.

2-3-3- Convection mixte :

Dans ce cas, les deux mécanismes sont superposés.

2-3-3-a- Estimation du coefficient d'échange convectif :

Dans le cas du transfert thermique par convection, le coefficient d'échange convectif dépend de plusieurs paramètres tels que la géométrie de la paroi, les caractéristiques thermo-physiques du fluide et la nature de l'écoulement, il peut être déterminé avec l'aide du coefficient de **Nusselt** qui représente le rapport du courant thermique du à la convection et à la conduction thermique à travers la couche limite.

2-3-3-b- Les nombres adimensionnels :

Nous allons définir ci-après les nombres sans dimension rencontrés en transfert thermique par convection, donnant dans chaque cas, une interprétation physique de ces nombres.

❖ Nombre de Nusselt

La quantité de chaleur échangée par convection est équivalente au flux transmis par conduction à travers une couche du fluide d'épaisseur dx :

$$Q_{p-f} = -\lambda A \frac{dT}{dx} = h A (T_p - T_f)$$

D'où :

$$\frac{h L}{\lambda} = \frac{-\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0}}{\frac{T_p - T_f}{L}}$$

L : La longueur caractéristique.

On peut écrire :

$$dT = d(T - T_p)$$

$$\frac{h L}{\lambda} = \left. \frac{d \left[\frac{T_p - T}{T_p - T_f} \right]}{d \left(\frac{x}{L} \right)} \right|_{x=0}$$

La combinaison $\frac{h L}{\lambda}$ est appelée le nombre de Nusselt.

$$Nu = \frac{hL}{\lambda} \dots \dots \dots (2 - 5)$$

Ou :

h : Coefficient d'échange par convection $\left[\frac{W}{m^2K}\right]$

λ : Conductivité thermique du fluide $\left[\frac{W}{mK}\right]$

L : La longueur caractéristique $[m]$

La signification physique du nombre de Nusselt est le rapport de la quantité de la chaleur échangée par convection à la quantité de chaleur échangée par conduction.

❖ **Nombre de Prandtl :**

Le nombre de Prandtl compare la rapidité des phénomènes thermiques et des phénomènes hydrodynamiques dans un fluide.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{\lambda} = \frac{\mu}{\frac{\lambda}{C_p}} = \frac{\frac{\mu}{\rho}}{\frac{\lambda}{\rho C_p}} = \frac{\nu}{\alpha} \dots \dots \dots (2 - 6)$$

Avec :

ρ : Masse volumique $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

C_p : Chaleur spécifique $\left[\frac{J}{kgK}\right]$

μ : Viscosité dynamique $\left[\frac{kg}{ms}\right]$

λ : Conductivité thermique $\left[\frac{W}{mK}\right]$

ν : Viscosité cinématique $\left[\frac{m^2}{s}\right]$

Dans le cas des gaz, Pr est sensiblement constant avec la pression et la température et ne varie qu'avec les changements thermiques de $C_p(T)$.

Quelques exemples du nombre de Prandtl à 100°C pour des gaz courants :

Gaz	Pr
H ₂	0.69
Air	0.69
Ar	0.66
CO ₂	0.75
CO	0.72
He	0.71
N ₂	0.70
O ₂	0.70
H ₂ O (vapeur)	1.06

Tableau 2.2 : Prandtl de quelques gaz

Dans le cas des liquides, le nombre de Prandtl est beaucoup plus variable :

Liquide	T (°C)	Pr
Eau	0	13.6
	20	7.03
	100	1.75
Alcool éthylique	0	21.8
	30	13.9
	60	12.1
Glycol	20	203
	100	25
Glycérine	0	100'000
	30	5'200

Tableau 2.3 : Prandtl de quelques liquides

Pour les métaux liquides, au contraire, Pr est très petit, de l'ordre de 0.01.

❖ **Nombre de Grasshoff :**

C'est une dimension pour la convection libre, Ce nombre est défini comme le rapport entre la force de gravité et de la force d'inertie.

$$Gr = \frac{\beta g L^3 \Delta T}{\nu^2} \dots \dots \dots (2 - 7)$$

Avec :

β : Coefficient de dilatation thermique dans l'espace $\left[\frac{1}{K}\right]$

g : Gravitation $\left[\frac{9.81 m}{s^2}\right]$

ΔT : L'écart de température $[K]$

❖ **Nombre de Reynolds :**

Ce nombre représente le rapport des forces d'inertie aux forces de viscosité.

$$Re = \frac{V L}{\nu} = \rho \frac{V L}{\mu} \dots \dots \dots (2 - 8)$$

Avec :

V : La vitesse d'écoulement du fluide $\left[\frac{m}{s}\right]$

Ce nombre joue un rôle fondamental dans la caractérisation de l'écoulement :

- Si $Re < 2400$ on est en régime laminaire.
- Pour des vitesses plus élevées, $Re \gg 2400$, le régime est turbulent.

❖ **Nombre de Rayleigh :**

Il caractérise la convection naturelle selon le mode d'échange (à température de parois constante ou flux thermique constante).

$$Ra = Gr Pr \dots \dots \dots (2 - 9)$$

2-3-3-c- Evaluation du coefficient d'échange par convection :

La détermination du coefficient d'échange diffère selon la nature de convection.

☞ **Convection libre :**

Pour ce type de convection, le nombre de Nusselt est donné en fonction des nombres adimensionnels, Grasshoff et Prandtl par la relation suivante :

$$Nu = K (Gr Pr)^n \dots \dots \dots (2 - 10)$$

K et n : Sont des constantes.

☞ **Convection forcée :**

Dans ce mode de convection le nombre de Nusselt est donné en fonction de deux nombres adimensionnels, le nombre de Reynolds et le nombre de Prandtl par la relation suivante :

$$Nu = a Re^n Pr^m \dots \dots \dots (2 - 11)$$

a, n et m : Sont des constantes qui peuvent être déterminées en fonction du régime de l'écoulement (laminaire ou turbulent).

2-4- Transfert par rayonnement

Tout corps émet un rayonnement thermique qui dépend de sa température et se traduit par son refroidissement.

Si on prend le rayonnement entre un corps et le milieu environnant nous avons la relation :

$$Q = \epsilon_p \sigma A (T_p^4 - T_f^4) \dots \dots \dots (2 - 12)$$

Avec:

Q : Énergie de chaleur transmis par rayonnement

ε : Facteur d'émissivité du corps

T : Température du corps en Kelvin

σ : Constante de Stephan

La valeur de ε vaut 1 pour un corps dit noir.

La plupart des gaz monoatomiques ou poly-atomiques symétriques (**H₂, N₂, O₂, ...**) n'absorbent et n'émettent aucun rayonnement thermique. Par contre les gaz poly-atomiques non symétriques émettent un tel rayonnement.

Un corps étant rarement totalement isolé, il recevra également le rayonnement émit par le gaz qui l'environne ou par d'autres corps lui faisant face.

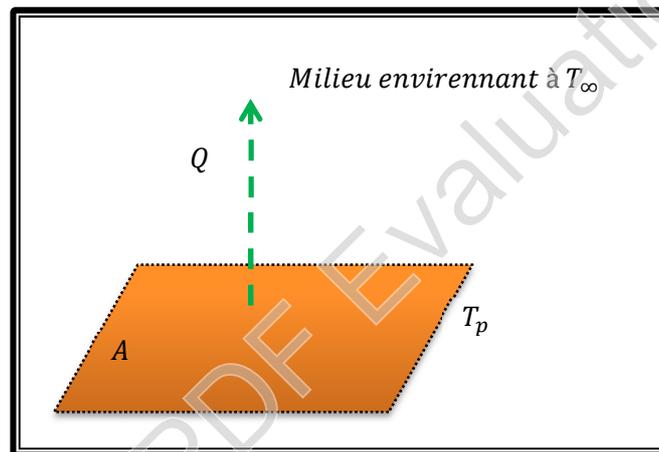


Figure 2-3- Schéma de transfert de chaleur par rayonnement

Facteurs d'émissivité des matériaux courants

Matériau	Emissivité [ε]
Aluminium poli	0,02
Aluminium oxydé	0,20
Noir de carbone	0,95
Zinc (galvanisé)	0,23
Brique rouge	0,93
Eau	0,67
Glace	0,98
Bois	0,91
Sol	0,38

CHAPITRE 03

Expert PDF Evaluation

Chapitre 3

Synthèse bibliographique sur les capteurs solaires hybrides PVT

3-1- Synthèse bibliographique sur les capteurs solaires hybrides PVT

Nous présenterons dans ce chapitre une synthèse sur les différentes conceptions et les résultats bibliographiques sur les capteurs solaires hybrides (PVT). De ce fait, notons que la recherche sur les capteurs solaires a débuté dans les années 70 et a été intensifiée dans les années 80. En 2005, Zondag [9] propose un état de l'art sur les capteurs solaires PV/T hybrides en se basant sur le rapport du projet européen PV-Catapult [10]. Parmi les premières études recensées par Zondag [9], certaines mettent l'accent sur l'évolution de la configuration géométrique des composants et d'autres sur les méthodes de modélisation.

Ainsi, Wolf [11] en 1976, effectue l'analyse d'un capteur solaire thermique comportant des modules PV à base de silicium et couplé à un système de stockage de chaleur.

Par la suite, l'étude réalisée par Kern et Russel en 1978 donne les principes de base des capteurs solaires employant de l'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Hendrie, en 1982 [12] développe un modèle théorique de système PV/T hybride en se basant sur des corrélations liées à des capteurs solaires standards. En 1981, Raghuraman [13] présente des méthodes numériques permettant la prévision des performances des capteurs solaires plans PV/T à eau ou à air. Plus tard, en 1985, Cox et Raghuraman [14] développent des logiciels de simulation permettant l'étude des performances des systèmes PV/T hybrides à air, et mettent l'accent sur l'influence des propriétés optiques du vitrage sur les rendements thermique et électrique de ces composants solaires. En 1986, Lalovic et al [15] proposent un nouveau type de cellules amorphes a-Si transparentes comme solution économique pour la construction de modules PV.

Diverses études expérimentales et théoriques ont été réalisées ensuite, en vue du développement des systèmes PV/T hybrides [16].

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

D'autres recherches ont pour but l'optimisation des performances des composants solaires existants en améliorant les conditions de fonctionnement (inclinaison, orientation du composant...) ou en proposant des configurations géométriques innovantes. Ainsi, elles se basent sur la modification des dimensions ou des propriétés des matériaux de construction (isolant thermique, absorbeur, cellules PV...) ou des fluides caloporteurs (air, eau glycolée...). Ces améliorations visent à accroître la quantité d'énergie solaire absorbée et les transferts thermiques entre le fluide caloporteur et l'absorbeur ou à réduire voire éliminer les pertes thermiques extérieures du capteur solaire hybride.

3-2- Les capteurs solaires PV/T à air

Plusieurs instituts et centres de recherches dans le monde ont étudié les capteurs hybrides. Les capteurs hybrides utilisant de l'air ont été évalués expérimentalement, analytiquement et économiquement.

Sandberg et Moshfegh [17][18] proposent l'étude théorique et expérimentale des phénomènes thermiques et aérauliques au sein d'une lame d'air (**Figure 3-1**) permettant la ventilation naturelle en sous-face d'une façade photovoltaïque et d'une toiture comportant des panneaux PV.

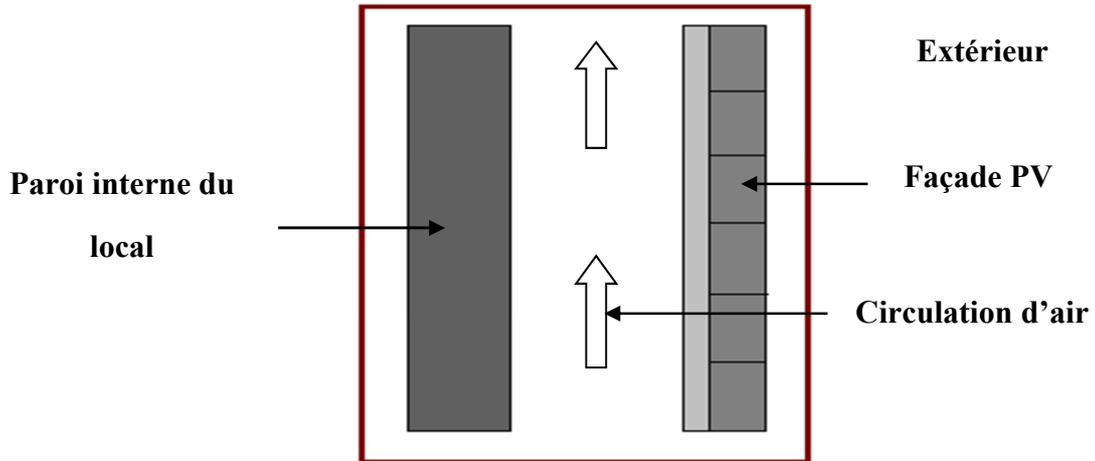


Figure 3-1 : Coupe de la lame d'air en sous-face des panneaux PV

Les études paramétriques menées par ces auteurs [17] ont montré que les dimensions et la position des modules PV le long de la lame, ont une forte influence sur le comportement thermique et aérodynamique du système.

En 1999, Garg et Adhikari [19] proposent un programme de modélisation d'un capteur solaire PV/T hybride à air permettant d'en prédire les productivités thermiques et électriques.

Le rendement des panneaux PV est calculé à partir d'une fonction linéaire décroissante.

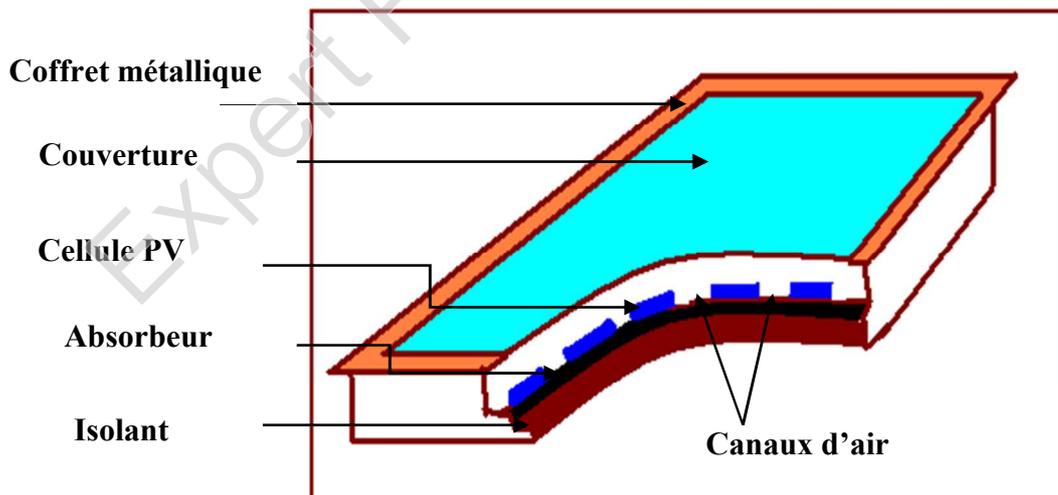


Figure 3-2 : schéma du capteur solaire hybride PVT à air

Ce capteur solaire est composé d'une couverture transparente, d'un absorbeur peint en noir et d'un support arrière bien isolé (Figure 3-2). Les cellules PV sont

collées sur l'absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive choisie pour ses bonnes propriétés de conduction thermique et d'isolation électrique.

Hegazy [20] compare en 2000, les performances thermiques et électriques de quatre capteurs solaires PV/T hybrides à air qui sont différenciés par le mode de refroidissement (mécanique) des panneaux PV, à savoir au-dessus (prototype I), en dessous (prototype II), de part et d'autre (prototype III) de l'absorbeur, et par double circulation d'air (prototype IV) (Figure 3-3).

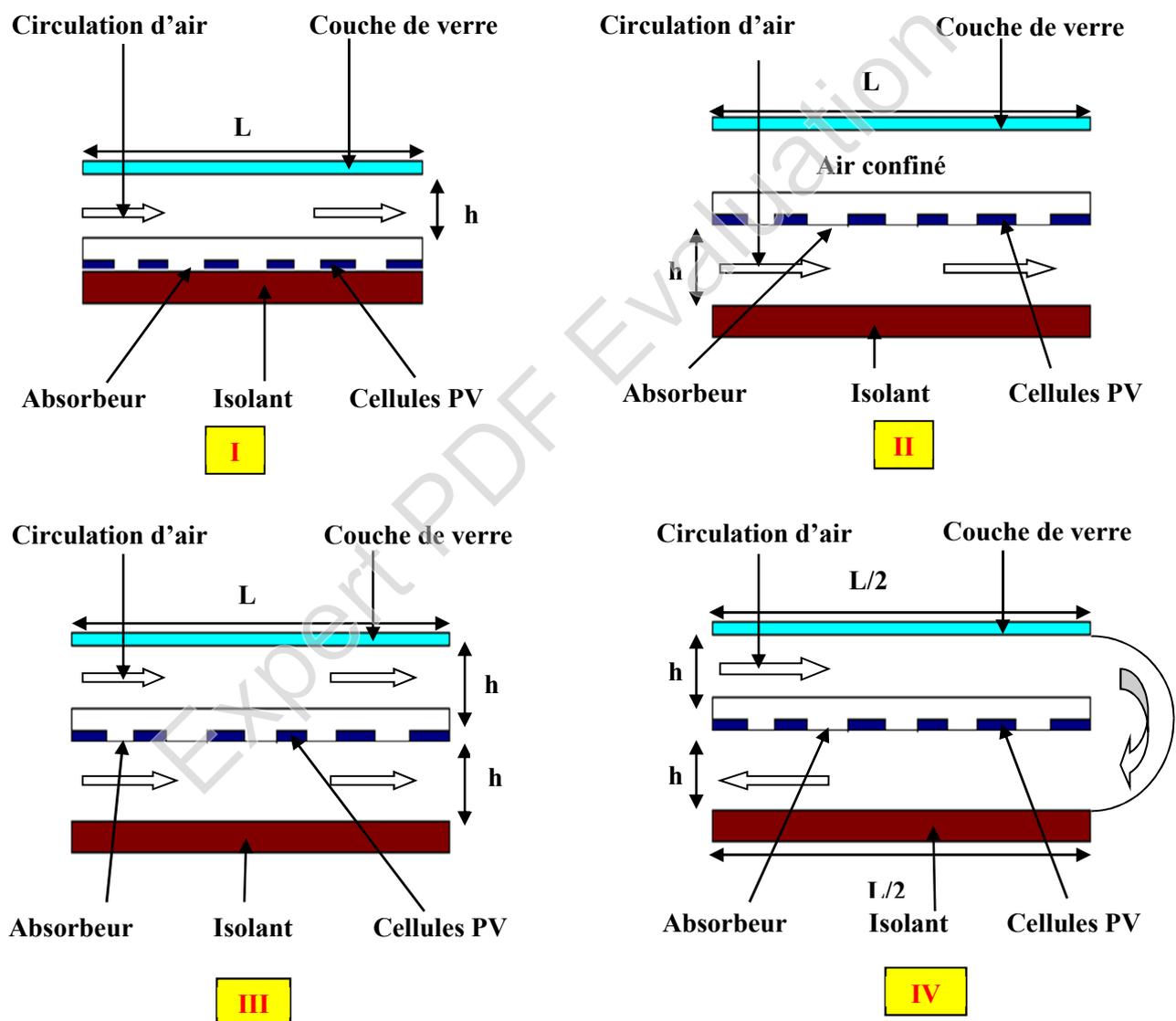


Figure 3-3 : les prototypes I, II, III, IV de capteur solaire PVT à air

Chacun de ces capteurs est vitré et a une longueur de 9 m et une largeur de 1 m. L'épaisseur de la lame d'air a été choisie en fonction d'un critère d'optimisation proposé par Hegazy [21][22] pour divers débits massiques, à savoir:

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

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

Hegazy [20] souligne que les performances d'un capteur solaire PV/T hybride à air dépendent de la température maximale d'air en sortie, des rendements thermiques et électriques, et de l'énergie électrique nette disponible après soustraction de l'énergie nécessaire au fonctionnement du ventilateur et des autres appareils alimentés. La simulation réalisée pour une journée ensoleillée a montré que l'accroissement du débit massique de ventilation améliore comme attendu, le rendement thermique. Le prototype I (**Figure 3-3**) a le plus faible rendement global alors que le prototype III semble donner les meilleures performances pour un fort ensoleillement et peut être aisément assemblé en usine. Les résultats obtenus ont montré de plus, que pour de faibles débits massiques de ventilation, l'utilisation d'un absorbeur sélectif est inappropriée pour ce type de capteur solaire car elle réduit la production d'énergie électrique.

Puis, en 2003, Mei et al [23] présentent le modèle dynamique d'un capteur solaire PV/T à air intégré à la façade d'un bâtiment. Cette étude s'inscrit dans le prolongement d'un projet européen précédent [24] visant l'intégration des systèmes photovoltaïques au bâti (ventilation naturelle sur les deux faces de panneaux PV intégrés à la façade et à la toiture de la bibliothèque publique Mataro (Espagne) en 1997 par la société Teulades Multi-Funcional (TFM)). La façade sud du bâtiment considéré par Mei et al [23] comporte de haut en bas, des capteurs solaires à air, des panneaux PV connectés en série et séparés d'un double vitrage intérieur par une lame d'air de 14 cm, et une paroi en briques. Les modules PV sont composés de cellules

poly-cristallines encapsulées entre deux couches de verre. Les autres façades sont composées de béton cellulaire et de bardages métalliques. L'air est aspiré à la base de la lame d'air située à l'arrière des panneaux PV (**Figure 15**).

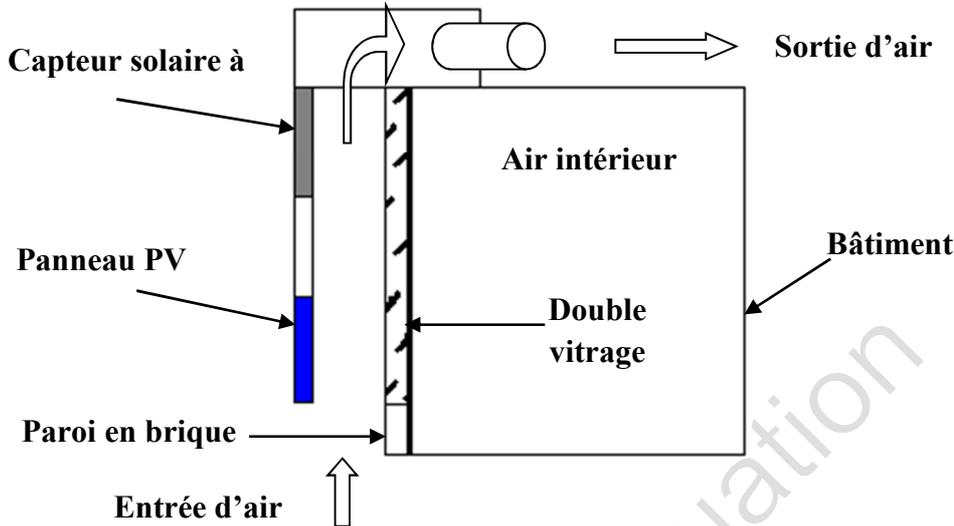


Figure 3-4: Schéma d'intégration de composants solaires à la façade Sud d'un bâtiment [13]

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

Durant la même période, Cartmell et al [25] réalisent une étude similaire sur le Centre Environnemental Brockshill (BHEC) situé au sud de Leicester en Grande-Bretagne en vue de le rendre autonome du point de vue énergétique. Pour cela, ce bâtiment a été équipé d'installations utilisant des énergies renouvelables dont un capteur solaire PV ventilé, un capteur solaire à air et un capteur solaire à eau. Le capteur solaire PV monté sur la toiture du bâtiment inclinée à 35°, est combiné au capteur solaire à air (**Figure 3-5**). Le panneau PV est composé de 20 modules d'une surface totale de 37 m². Le capteur solaire à air de 12.5 m² de surface comporte une

lame d'air isolée et un absorbeur noir muni d'ailettes afin d'accroître les transferts thermiques par convection entre l'absorbeur et l'air. L'air circule mécaniquement tout d'abord à l'intérieur du capteur solaire PV entre un isolant arrière et le panneau PV, puis dans le capteur solaire à air avant d'être injecté dans le local.

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

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



Figure 3-5: Capteurs solaires combinés intégrés à la toiture du Brockhill Environment Center

La différence entre cette analyse et celle effectuée par Mei et al [23] réside dans le fait que dans l'étude de Cartmell et al [25], les interactions entre les capteurs solaires et le bâtiment sont négligeables compte tenu de l'épaisse couche d'isolant les séparant.

Plus tard, en 2005, Tiwari et al [26] présentent l'étude théorique et expérimentale en régime permanent d'un capteur solaire PV/T à air ventilé naturellement ou mécaniquement.

Ce capteur solaire est constitué de deux modules PV de 0.61 m² de surface chacun, connectés en série et montés sur une couche isolante non-corrosive de Tedlar. Le module PV est composé de cellules photovoltaïques collées entre elles par l'intermédiaire d'une couche d'EVA et protégées par une couche de verre. Ce composant a été intégré à un banc d'essais en acier inclinable et monté à New Delhi, en Inde (**Figure 3-6**). Des ventilateurs disposés à l'entrée de la lame d'air située entre le Tedlar et une couche isolante en bois permettent la ventilation forcée des modules PV en face arrière. L'énergie électrique produite est stockée dans une batterie électrique. Cette analyse a montré que la récupération complémentaire de l'énergie thermique produite permet une amélioration du rendement global du système PV/T à air d'environ 18 %.



Figure 3-6 : banc d'essai du capteur solaire hybride PVT à air [26]

En 2007, Tiwari et Sodha [27] proposent l'étude paramétrique comparative de quatre types de capteurs solaires à air proches du système présenté précédemment. Ces systèmes se différencient par la présence ou non d'un vitrage et d'un support en Tedlar. Les modèles thermiques réalisés ont été validés expérimentalement sur le banc d'essais monté à New Delhi. Les résultats obtenus ont montré que le composant à air vitré sans Tedlar est le plus performant et présente l'accroissement de rendement global (thermique et électrique) le plus élevé. Ce système vitré peut être utilisé pour diverses applications telles que le chauffage des locaux et l'éclairage.

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

Plus tard, en novembre 2007, Joshi et Tiwari [28] présentent l'étude des rendements énergétique et exergétique [29] du capteur solaire hybride PV/T à air sans vitrage et comportant une couche de Tedlar. Les résultats validés expérimentalement indiquent que le rendement énergétique du capteur solaire varie de 55 à 65 %. Le rendement électrique de ce capteur solaire est compris entre 14 % et 15 %.

En 2006, Vokas et al [30] ont mené l'étude théorique d'un capteur solaire PV/T hybride à air en mettant l'accent sur ses performances thermiques. Le capteur solaire consiste en un capteur solaire thermique sur lequel est collé un panneau PV. Le modèle réalisé est basé sur celui d'un capteur solaire plan et sur les travaux de Duffie et Beckman [31]. Le rendement thermique de ce capteur solaire PV/T hybride à air (de 1.32 m² de surface) a été comparé à ceux d'un capteur solaire thermique à air standard (de 1.32 m² de surface) et à ceux d'un capteur solaire thermique à air à absorbeur sélectif (de 2 m²). Dans le cas où la température d'entrée d'air dans le capteur solaire est égale à la température de l'air ambiant, les résultats obtenus montrent que le capteur solaire PV/T hybride à air a un rendement thermique inférieur de 9 % à celui du capteur solaire thermique standard (dont le rendement est de 70 %). Le capteur solaire à absorbeur sélectif a le rendement thermique le plus élevé (75 % environ). Cependant, l'avantage du capteur solaire hybride est qu'il peut produire outre une quantité importante d'énergie thermique, de l'énergie électrique sur une surface équivalente à celle du capteur solaire standard (soit 1.32 m²) et sur une surface inférieure à celle du capteur solaire à absorbeur sélectif (2 m²).

De même, Vokas et al montrent que la part des besoins en chauffage couverte par une surface de 30 m² de ce système PV/T hybride à air est de 47.79 % en moyenne, à Athènes. Le capteur solaire standard peut couvrir 54.26 % des besoins en chauffage dans la même ville.

Cependant, la différence entre ces valeurs n'étant que d'environ 6.65 %, les performances du capteur solaire hybride peuvent être considérées satisfaisantes.

Enfin, des autres études paramétriques montrent que la localisation géographique la surface de captation ont une forte influence sur la productivité du composant hybride.

En 2007, Othman et al [32] mènent l'étude théorique et expérimentale des productivités thermiques et électriques d'un capteur solaire PV/T hybride à air à double circulation d'air. Le composant est constitué de deux lames dans lesquelles l'air circule successivement. La première lame d'une hauteur de 16.5 cm est comprise entre une couche de verre en face avant et les modules PV. La seconde lame d'air dont l'épaisseur est comprise entre 30 et 120 cm, se situe en sous-face des modules PV. La face arrière des modules est munie d'ailettes verticales n'étant pas en contact avec la plaque arrière du capteur solaire. Ces ailettes permettent d'accroître les transferts thermiques convectifs entre l'air et les modules PV (Figure 3-7). La surface totale couverte par les cellules PV en silicium monocristallin est de 0.38 m².

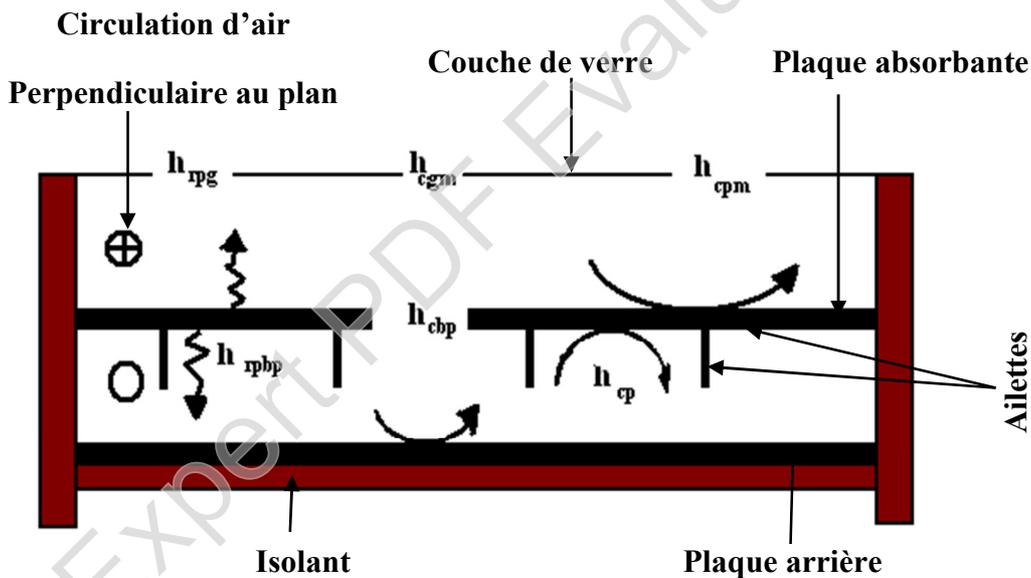


Figure 3-7: Coupe du capteur solaire PV/T hybride à air à ailettes [32]

Othman et al [32] développent un modèle thermique unidirectionnel en régime permanent de ce composant hybride. La confrontation des données de la simulation réalisée par la suite avec les résultats d'une étude expérimentale effectuée in situ a permis de noter que l'emploi des ailettes permet d'améliorer à la fois le rendement thermique et les performances électriques du composant hybride.

En 2007, Trip Anagnostopoulos [33] réalise à l'Université de Patras, l'étude de capteurs solaires PV/T hybrides dont le fluide caloporteur est soit de l'air soit de l'eau, et pouvant être intégrés au bâti. L'objectif de ces travaux était de réduire la température de fonctionnement des modules PV, d'accroître la production d'air préchauffé et de réduire les pertes thermiques à travers l'isolant en sous-face du composant. Pour cela, la configuration d'un capteur solaire PV/T à air a été modifiée à moindre coût. Des études paramétriques menées sur un système PV/T à air ont montré qu'une faible épaisseur de lame d'air améliore les transferts thermiques mais réduit le débit massique de ventilation de la lame, d'où une réduction du rendement thermique du système. Pour pallier ce problème en optimisant les transferts de chaleur convectifs et radiatifs, la solution proposée est d'accroître la surface d'échange entre l'air et les modules PV. Pour cela, des configurations intégrant des plaques nervurées ou planes, des tubes soudés à l'absorbeur ou des ailettes au sein de la lame d'air ont été envisagées (**Figure 3-8**).

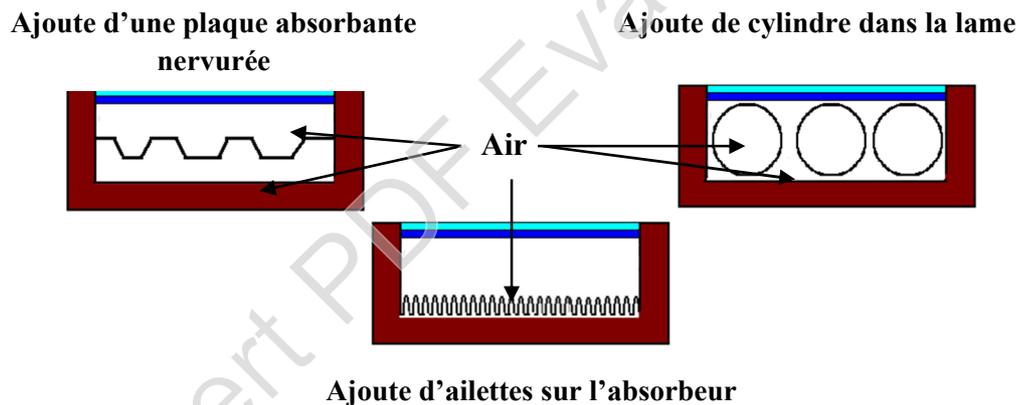


Figure 3-8: Quelques exemples de modifications du capteur solaire PV/T hybride à air [33]

Ainsi, divers projets de recherche ont été menés sur l'intégration des capteurs solaires PV au bâti et sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air. Certains ont abouti à une mise sur le marché du composant. Un recensement des dispositifs ayant été étudiés et commercialisés [10] est présenté en 2005. Parmi ces composants dont le mode de ventilation varie, ont été recensés, par exemple, les systèmes PV intégrés à la façade du bâtiment Scheidegger (ventilation naturelle en sous-face des modules PV) par la société Atlantis Energy, en 1993.

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

En ce qui concerne les capteurs solaires PV/T hybrides à air recensés, le nombre de dispositif est très réduit. Cependant, Zondag et al[10] notent que le taux de commercialisation de ces capteurs solaires est très élevé par rapport aux autres types de systèmes plus complexes du point de vue technologique. Ainsi, citons le cas de l'entreprise Grammer Solar ayant commercialisé un capteur solaire PV/T hybride à air suite à divers tests. Cette société a réalisé, en outre un composant hybride à air pouvant être intégré à des habitations isolées.

De même, la compagnie Conserval Engineering construit un capteur solaire PV/T à air composé de panneaux PV collés à la surface de panneaux perforés nommés PV Solarwall [34] dans le but d'accroître la production électrique des modules PV en les ventilant.

Diverses configurations de ce composant à absorbeur perforé ont été testées in situ [34].

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

En 2003, l'OPAC (Office Public d'Aménagement et de Construction) de Paris est le premier bailleur social ayant décidé de moderniser ses installations de chauffage, permettant ainsi la réduction de 5 % de la consommation d'énergie de ses immeubles chauffés collectivement. Dans ce sens, pour les 637 logements du groupe Plantes Jean Moulin dans le 14^{ème} arrondissement de Paris, 1020 m² de panneaux solaires ont été mis en place et permettent la couverture de 40 % des besoins en eau chaude sanitaire. [35]

En 2008 une Simulation d'un système Photovoltaïque-Thermique hybride de chauffage à air (de PVT) pour régénérer le gel déshydratant dans une salle de climatisation est étudiée par Y. Sukamongkol et al, Il conclue que le modèle développé de simulation peut prévoir l'exécution d'un système thermique photovoltaïque hybride de chauffage à air pour le déshydratant de régénérer dans une salle de climatisation. Le PVT de chauffage à air peut être employé pour fournir l'air chaud, qui est environ 50°C , pour se mélanger à ceux de l'unité de condensation du dispositif de climatisation pour régénérer le déshydratant saturé. En outre, l'efficacité de PVT est haute jusqu'à 66% tandis que l'énergie électrique produite de 6.52 MJ peut être employée pour alimenter le dispositif électrique dans le système. [36]

Les résultats trouvés dans les travaux précités ont été très encourageants et ils ont trouvé des rendements thermiques de 70% avec refroidissement par du liquide et 60% pour un refroidissement par air. Les publications récentes sur les capteurs PV/T présentent des systèmes basés sur le stockage de chaleur latente qui pourra être utilisée dans les immeubles et pour produire de l'eau chaude, ont été développés par K.Touafek et al (2009), étude thermique d'un capteur PVT à air recouvert destiné au chauffage d'habitation[37], un Modèle mathématique de capteur thermique photovoltaïque d'air de double passage avec des ailerons par Ebrahim M et al (2009).[38] et la figure suivante (la figure 3-9) représente le Diagramme schématique de double capteur d'air du passage (PV/T) avec des ailerons.

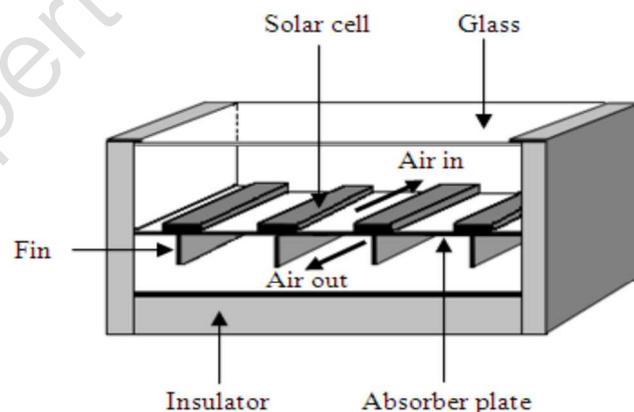


Figure 3-9 : Diagramme schématique de double collecteur d'air du passage (PV/T) avec des ailerons

Ebrahim M. Ali Alfegi et autres ont étudié l'effet des débits sur l'exécution du passage simple à ailettes, réchauffeurs solaires thermiques photovoltaïques d'air de double conduit (2009) [39].

Ce domaine étant vaste, la liste de composants que nous avons présentée est réduite mais, elle permet de définir les principales caractéristiques des composants solaires PV/T à air et PV intégrés rencontrés dans la littérature.

Dans le cas des capteurs solaires PV/T hybrides à eau, la même démarche a été appliquée.

3-3- Les capteurs solaires hybrides PV/T à eau

En 1997, Fujisawa et Tani [40] ont conçu et construit un capteur solaire hybride PV/T à eau sur une cité universitaire à Tokyo, au Japon.

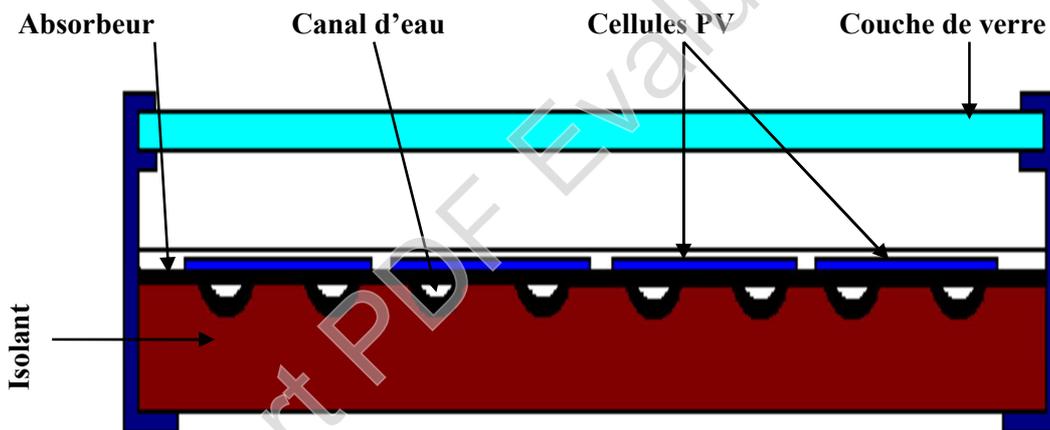


Figure 3-10: Coupe transversale du composant hybride à eau

Ils étudient ainsi un composant solaire hybride composé d'un capteur solaire vitré à liquide caloporteur et à absorbeur plan en aluminium non-sélectif, et de modules PV en silicium monocristallin (rendement électrique de 13 %) (Figure 3-10). Ce capteur solaire a une longueur de 1.3 m et une largeur de 0.5 m. Cette analyse a consisté en l'évaluation des performances énergétiques du composant étudié. Ainsi, une étude expérimentale in situ a été menée sur ce capteur solaire vitré et sur un capteur solaire similaire mais sans vitrage en vue d'estimer et de comparer leurs performances énergétiques annuelles. Les résultats obtenus ont été confrontés à ceux d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire thermique. Il est noté que le capteur

solaire hybride vitré produit autant d'énergie que le capteur solaire thermique. Le capteur solaire hybride non vitré produit le moins d'énergie thermique mais offre la plus grande quantité d'énergie électrique. Le capteur solaire PV a une surface de 0.48 m² et le capteur solaire thermique plan a une surface de 0.61 m². Quant aux capteurs solaires hybrides, ils ont une surface de panneaux PV de 0.48 m² et une surface d'absorbeur de 0.61 m². Il est montré qu'en ce qui concerne le gain total d'énergie (thermique et électrique), le système le plus performant est le capteur solaire hybride vitré qui a une production totale de 615 kWh/an, suivi du capteur solaire thermique plan (575 kWh/an), du capteur solaire hybride non vitré (480 kWh/an) et enfin du capteur solaire PV (72.6 kWh/an).

Cependant, la production d'énergie électrique du capteur solaire hybride non vitré est supérieure de 8 % à celle du capteur solaire PV. En effet, l'absence de vitrage permet la réduction des pertes thermiques par réflexion et une baisse du niveau de température de fonctionnement des modules PV [41]

De plus, la ventilation des modules PV en face arrière au niveau du composant PV/T hybride non vitré permet une réduction de la température de fonctionnement des modules PV par rapport au capteur solaire PV isolé.

Quant au capteur solaire PV/T hybride vitré, il produit presque autant d'énergies thermique et électrique que le capteur solaire PV et le capteur solaire thermique plan réunis.

En 2001, Trip Anagnostopoulos [16] effectue l'étude d'un capteur solaire hybride faisant appel à deux types de fluides caloporteurs disposés de manière superposée. Trois configurations ont été conçues et analysées expérimentalement afin d'évaluer le comportement de chacune des formes de production thermique (à air ou à eau).

Le système le plus performant schématisé sur la **Figure 3-11** comporte un absorbeur soudé à des tubes en cuivre situé en face avant du composant, une plaque métallique plane et des ailettes disposées sur la paroi inférieure de la lame d'air.

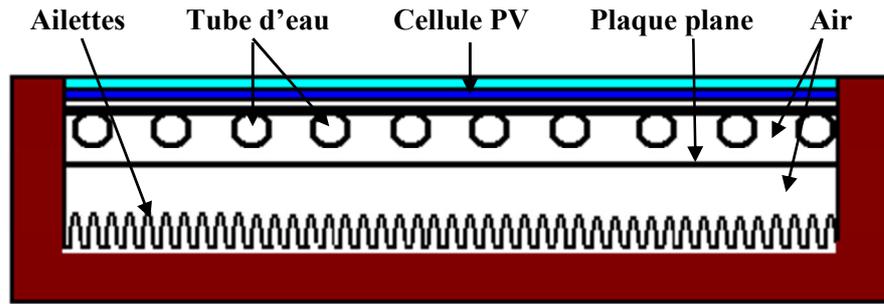


Figure 3-11: Capteur solaire PV/T hybride à deux fluides et à fonctions superposées [16]

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

En 2002, un capteur solaire PV/T hybride vitré est étudié par Sandnes et Rekstad [42].

Ce système est composé de cellules PV en silicium monocristallin collées sur un absorbeur en plastique noir polyphénilenoxy de par l'intermédiaire de 0.5 mm d'adhésif à base de silicium. Cet absorbeur est muni de canaux de circulation d'eau en sous-face (**Figure 3-12**).

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

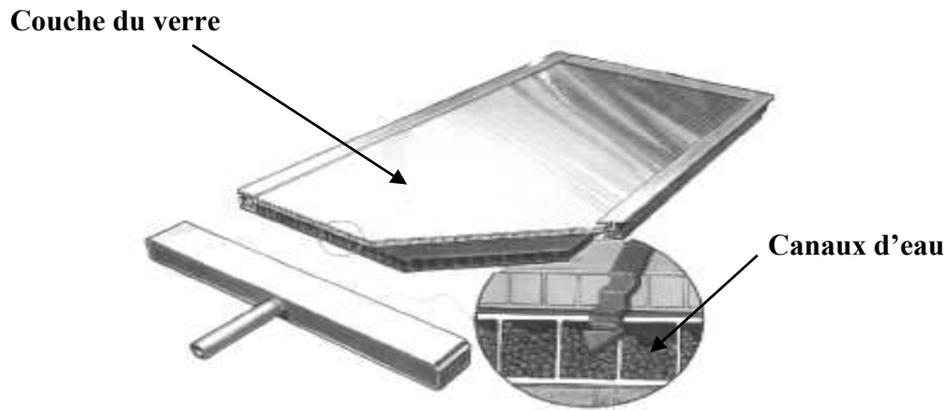


Figure 3-12: Schéma du capteur solaire PV/T hybride à eau SolarNor [42]

Les résultats de la simulation pour la journée du 3 novembre 2007 ont montré que ce capteur solaire hybride vitré a une production électrique journalière de 339.3 Wh. De plus, en ajoutant une couche de verre supplémentaire en face avant du composant afin de réduire les pertes thermiques, la production électrique journalière se réduit à 296.2 Wh.

En 2003, un capteur solaire PV/T hybride à eau est étudié en régime dynamique par Chow [43] qui en réalise un modèle adapté aux simulations thermiques en régime transitoire. Il s'appuie pour cela, sur les travaux de Bergene et Lovvik [44] qui présentent en 1995, la modélisation d'une configuration similaire de capteur solaire PV/T hybride à eau. Ce modèle thermique se base sur la méthode des volumes finis et permet le calcul des performances horaires, des gains thermiques et électriques, des rendements et du comportement thermique des diverses couches de ce capteur solaire. Le composant est constitué d'une couche de verre séparée d'un panneau PV par une lame d'air confinée (**Figure 3-13**). Le panneau PV est fixé à un absorbeur par l'intermédiaire d'une couche adhésive composée d'EVA (éthylène acétate de vinyl) et de Tedlar. Cet absorbeur se présente sous forme d'ailette soudée à des tubes de circulation d'eau parallèles, régulièrement espacés et connectés aux deux extrémités par des tubes de jonction. Cette disposition permet d'uniformiser le débit d'eau dans chacun des tubes. Les côtés et le fond du capteur solaire sont isolés.

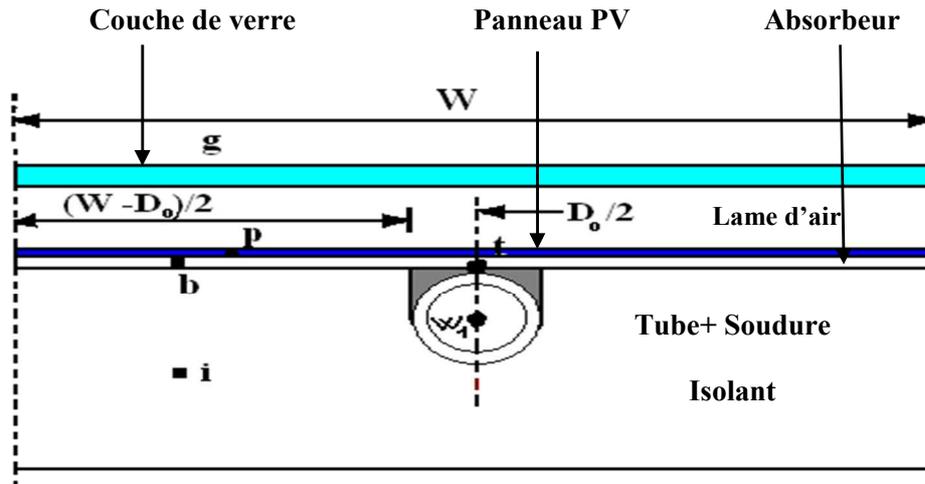


Figure 3-13: Coupe du capteur solaire PV/T hybride à eau [43]

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

En 2006, en vue d'améliorer les transferts de chaleur entre les panneaux PV et l'absorbeur d'un capteur solaire hybride, Ji et al proposent l'analyse d'une combinaison de six prototypes de capteurs solaires PV/T à absorbeur en aluminium séparé d'un isolant en mousse de polyuréthane par des canaux d'eau disposés en sous-face. Entre les panneaux PV et une couverture de verre se trouve une lame d'air de 25 mm (**Figure 3-14**). Ces capteurs solaires étaient disposés en trois rangées en parallèle de deux capteurs solaires en série. Ces prototypes intégrés à un bâtiment ont chacun une surface de 1.173 m² et sont couplés à un ballon de stockage de 420 litres de volume. Chaque panneau PV est composé de 72 cellules PV en silicium polycristallin.

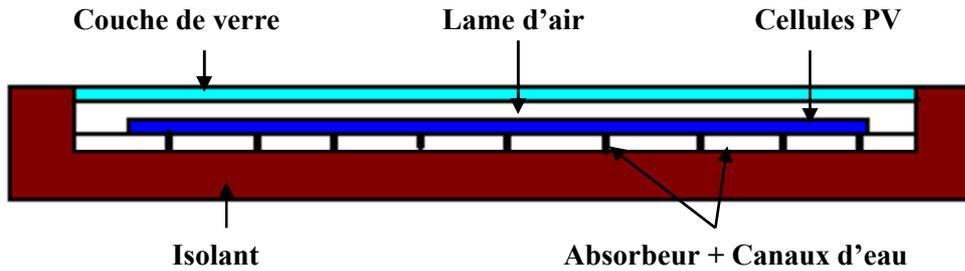


Figure 3-14: Coupe transversale du capteur solaire PV/T hybride à eau [42]

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

En 2007, Fraisse et al [41] étudient un système combinant un capteur solaire hybride à eau et un plancher solaire dans une phase d'intégration à un bâtiment situé à Macôn. Le système est composé de cellules mono et poly-cristallines (**Figure 3-15**).



Figure 3-15: Le capteur solaire PV/T hybride à eau [2]

Ils démontrent qu'en présence d'un vitrage le rendement électrique annuel du système hybride combiné est de 6.8 %, ce qui est inférieur de 28 % au rendement d'un capteur solaire PV non intégré (9.4 %). Ils expliquent cette baisse de rendement électrique par un accroissement de la température de fonctionnement des panneaux PV (pouvant être supérieure à 100 °C) dû à la couverture de verre. Par contre, en absence de vitrage le rendement électrique est de 10 %, ce qui est supérieur de 6 % à celui du capteur solaire PV non intégré.

La forte augmentation de la température des modules PV en été, empêche l'utilisation de l'EVA comme adhésif des panneaux PV dans un composant vitré. De plus, Fraisse et al [41] notent que dans ce type de configuration, l'utilisation de cellules amorphes est la plus adaptée car elles sont moins sensibles aux variations de températures. Cependant, les rendements électriques obtenus sont faibles étant donné le bas rendement électrique des cellules PV amorphes (à savoir, 4 à 7 %) et les pertes thermiques liées au vitrage.

Récemment, en 2007, Chow et al [45] présentent la modélisation et l'étude comparative des performances d'un capteur solaire PV/T hybride à eau, d'un capteur solaire PV et d'un capteur solaire à eau. Deux prototypes de capteurs solaires hybrides ont été construits, le premier ayant été modélisé en 2006 [46]



Figure 3-16: Premier et second prototypes construits [45]

Le second composant, plus performant a été modélisé plus finement [45]. C'est un capteur solaire vitré composé d'un panneau PV en silicium cristallin collé à

un absorbeur métallique (**Figure 3-16**). Des tubes de circulation d'eau sont soudés à l'arrière de cet absorbeur. Le système est couplé à un ballon de stockage horizontal. Les résultats de la simulation montrent que le rendement thermique annuel moyen en eau de ce capteur solaire PV/T hybride à eau est de 38.1 % et celui du capteur solaire à eau, de 43.2 %. De plus, la comparaison du capteur solaire hybride avec un capteur solaire PV montre que le refroidissement avec de l'eau comme fluide caloporteur permet de réduire la température fonctionnement des modules PV. Dans ce sens, la production d'énergie électrique annuelle du capteur solaire hybride est supérieure de 2.2 % à celle du capteur solaire PV.

Chow et al [47] ont poursuivi cette étude des capteurs solaires hybrides PV/T à eau à travers l'intégration d'un système à la façade d'un bâtiment et l'étude expérimentale de ses performances thermiques et électriques. Le rendement thermique a été estimé à 38.9 % à basse température et le rendement électrique à 8.56 %.

En 2007, Kalogirou et Trip Anagnostopoulos [48] poursuivent une étude précédente menée sur les capteurs solaires PV/T hybrides à air [33] en analysant cette fois, le comportement des capteurs solaires PV/T hybrides à eau comportant des panneaux PV à base de cellules en silicium poly-cristallin ou des cellules amorphes, sur trois sites. Ces composants ont été intégrés à des bâtiments industriels et ont chacun une surface totale de 300 m².

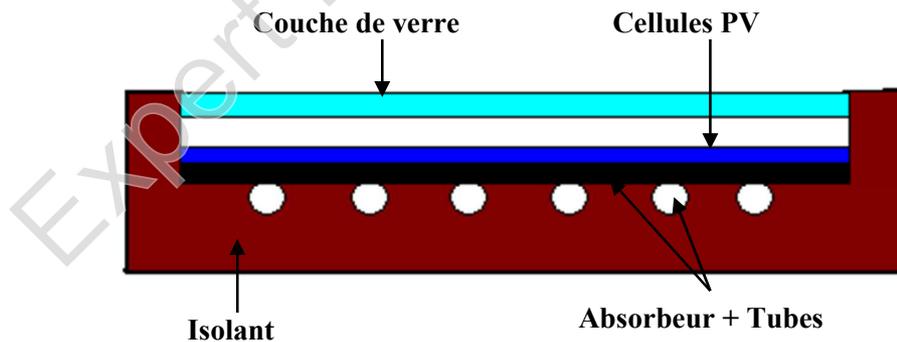


Figure 3-17: Section du capteur solaire hybride à eau étudié [48]

Le capteur solaire hybride a été isolé en face arrière par une couche de 5 cm de polyuréthane (**Figure 3-17**). Les résultats des simulations réalisées à partir du logiciel TRNSYS montrent que la production électrique d'un capteur solaire PV est supérieure de 25 % à celle du composant hybride. Mais, le système hybride permet de

couvrir une grande partie des besoins en énergie thermique des bâtiments considérés. L'évaluation de l'aspect économique de ces systèmes a montré qu'ils sont avantageux en particulier pour les sites bien ensoleillés. Le constat a été fait que les systèmes hybrides à eau constitués de modules PV sans protection thermique en face avant, ont d'importantes pertes thermiques entraînant ainsi un faible niveau de température de fonctionnement du système. Une couverture de verre peut ainsi être ajoutée en face avant pour y remédier, bien que les absorptions et réflexions supplémentaires inhérentes du rayonnement solaire entraînent une baisse du rendement électrique.

La recherche sur les capteurs solaires hybrides à liquide caloporteur est en constante évolution, ainsi la liste des systèmes proposés précédemment n'est pas exhaustive. Au niveau du marché, la recherche bibliographique effectuée en particulier dans le rapport de synthèse EU-Project PV - Catapult sur les composants hybrides [10] nous a permis de constater que peu de capteurs solaires de type liquide ont été commercialisés, jusqu'à présent.

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

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

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

En juillet 2004, dans le cadre du projet de Recherche Intégré PRI6.2 [2] et d'un soutien ADEME, un prototype de capteur solaire PV/T à eau a été développé en partenariat avec Clipsol, le LOCIE et le CETHIL (**Figure 3-15**).

En 2008 K. Touafek et al ont étudiés la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride. Ils ont établi par simulation numérique le comportement thermique de ce capteur PVT, ainsi que la cartographie de température pour cinq configurations : La première configuration représente le capteur photovoltaïque isolé thermiquement et non recouvert. La deuxième configuration était le capteur photovoltaïque isolé thermiquement, et sur lequel une vitre supplémentaire a été déposée. La troisième configuration était l'installation d'un échangeur de chaleur, constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentín en tubes de cuivre, au-dessous du module photovoltaïque. Ils supposent l'état stationnaire, c'est-à-dire que le fluide s'écoule à l'intérieur de la tubulure et qu'il n'y a pas de circulation pendant la durée de la simulation. Tandis que dans la quatrième configuration, ils ont ajouté une vitre supplémentaire au-dessus du capteur. Et enfin ils ont déposé une seconde vitre au-dessus du capteur hybride, représentant ainsi la cinquième configuration. Les résultats de la simulation numérique sur le comportement thermique du capteur solaire PVT y sont présentés et discutés [49].

3-4- Capteurs PVT de concentration

Le capteur PVT à concentration veut dire la concentration du rayonnement solaire sur un capteur hybride PVT.

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

Le système de Trip Anagnostopoulos et al (2002) (un système de chauffage à air) est peut-être l'incarnation le plus simple d'un concentrateur de PVT. Comme

mentionné, ceci a utilisé un réflecteur plat pour diriger le rayonnement solaire supplémentaire sur un capteur PVT. Cependant, la concentration du rayonnement solaire peut également être réalisée avec les objectifs paraboliques composés les réflecteurs des concentrateurs (CPC), linéaires ou circulaires de Fresnel ou avec des plaques paraboliques. Un arrangement typique d'un capteur PVT de CPC est montré sur le la **figure 3-18**.

Comme mentionné, la concentration par les réflecteurs linéaires de Fresnel est également possible. Rosell et al (2005) ont démontré un système basé sur cette méthode qui a eu un rapport de concentration de 11. Ils pouvaient obtenir une efficacité thermique maximum approximativement de 60% de leur système sans la charge électrique. D'ailleurs, ils ont identifié le fait qu'une des résistances thermiques principales dans leur capteur PVT était celle entre la cellule PV et le plat d'amortisseur sur lesquels il a été collé.

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

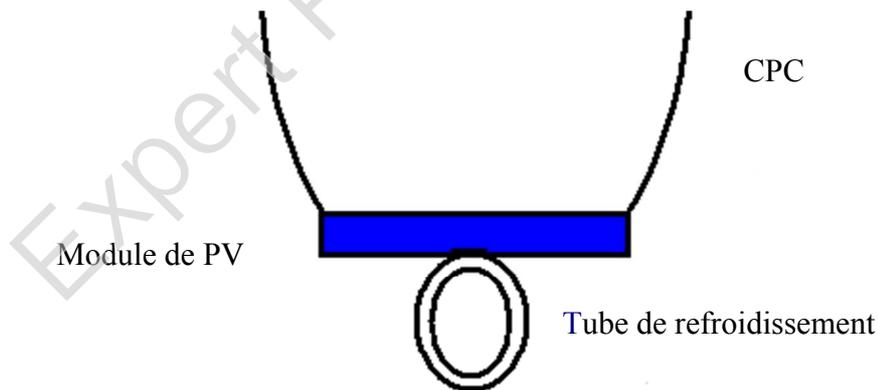


Figure 3-18 : Capteurs PVT de concentration

Coventry a noté que le système ait eu une efficacité thermique inférieure que ceux rapportés dans d'autres études, les pertes de chaleur du système de GERÇURES où beaucoup inférieur, en raison de son plus petit secteur de chauffage. Coventry a

également noté que les imperfections dans la forme de concentrateur ont eu comme conséquence l'illumination non-uniforme affectant de ce fait l'exécution électrique.

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

Expert PDF Evaluation

CHAPITRE 04

Expert PDF Evaluation

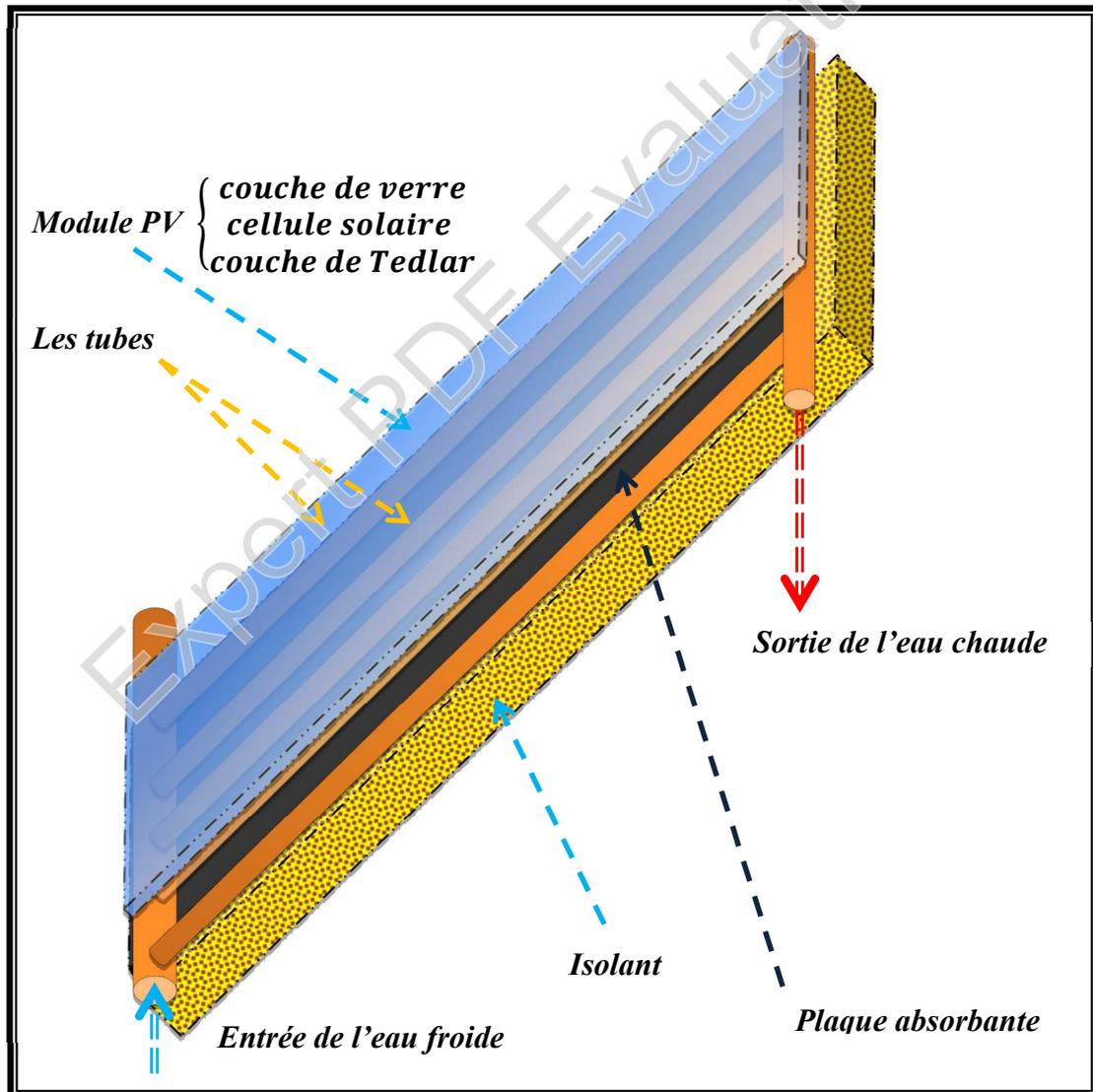
Chapitre 4

Modélisation du capteur solaire hybride PVT

4-1- Introduction

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

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



Conception du capteur PVT étudié dans ce travail

4-2- Éléments de constructions et principe

Les éléments essentiels sont:

- ❖ Le vitrage
- ❖ Le panneau photovoltaïque
- ❖ La plaque absorbante
- ❖ Le fluide caloporteur
- ❖ L'isolant

A- Le panneau photovoltaïque

Le rôle du panneau photovoltaïque est de transformer le rayonnement solaire en énergie électrique, il se compose de trois couches : la première c'est une couche de verre qui est la face exposée au rayonnement incident, la deuxième couche qui contenant les cellules photovoltaïques et la troisième couche protectrice qui est le tedlar. la **Figure 4-1**-suivante présente ces trois couches de PV

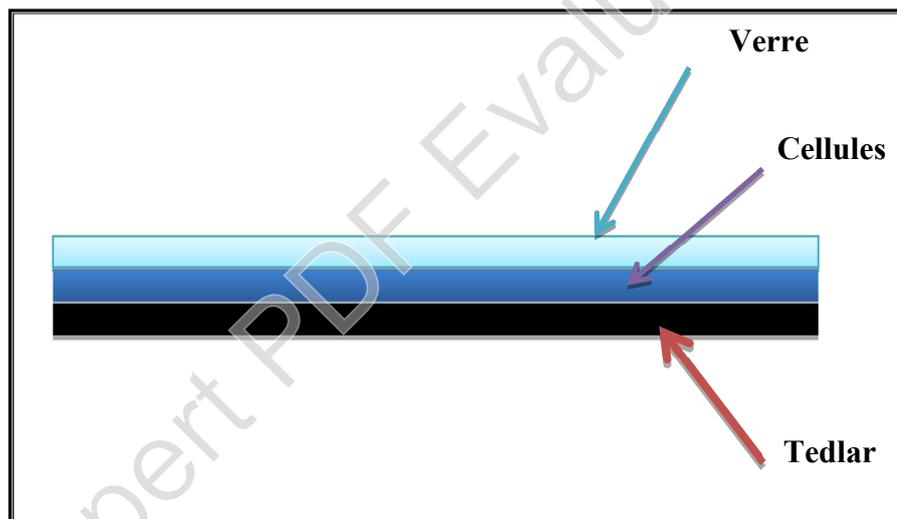


Figure 4-1-Vu des trois couches de panneau photovoltaïque

B- Fluide caloporteur

Pour évacuer la chaleur emmagasinée par la surface absorbante, on utilise un fluide caloporteur soit l'eau, soit l'air.

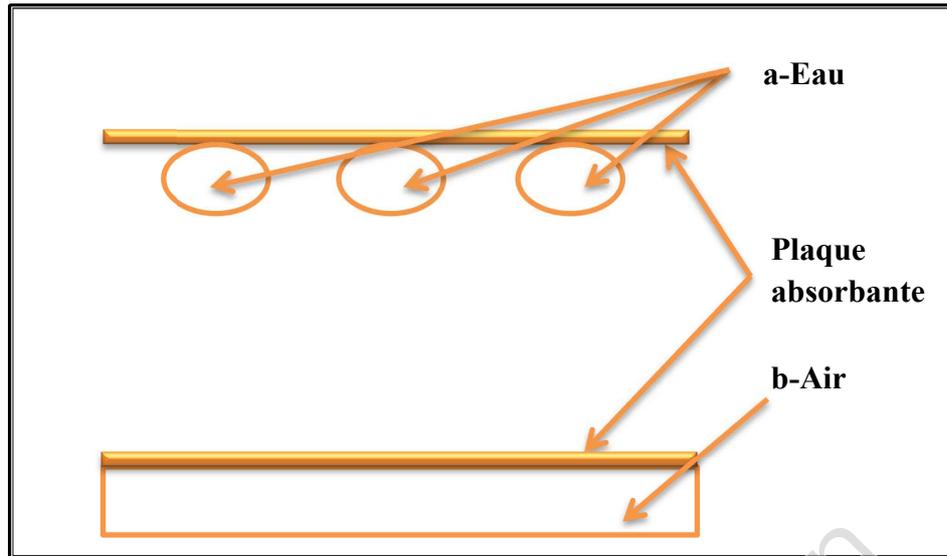


Figure 4-2. Schéma d'un capteur avec son système d'évacuation de la chaleur : a) à eau. b) à air.

C- Isolant :

Pour minimiser les pertes calorifiques du système, il faut isoler ses parois par une ou plusieurs couches d'isolant, le tableau suivant regroupe les principales propriétés thermiques, de quelques matériaux isolants.

Matériau	λ (W/m.k)	ρ (kg/m ³)	Cp (j/kg.k)	$a = (\lambda / \rho \cdot Cp)$ (m ² /s)
Polystyrène expansé	0.040	20	1500	13.3
Laine (vêtement)	0.040	450	1880	0.47

Tableau 4.1 : Propriétés thermiques de quelques matériaux isolants

4-3- Modèle thermique d'un capteur hybride photovoltaïque thermique :

Les modèles théoriques servent à calculer (prédire) la production thermique des capteurs hybrides, ces modèles se basent sur la distribution du flux de la chaleur dans les différentes couches du capteur hybride [58].

On considère le capteur hybride de la figure suivante constitué du capteur photovoltaïque logé dans une enceinte métallique qui englobe l'isolation thermique

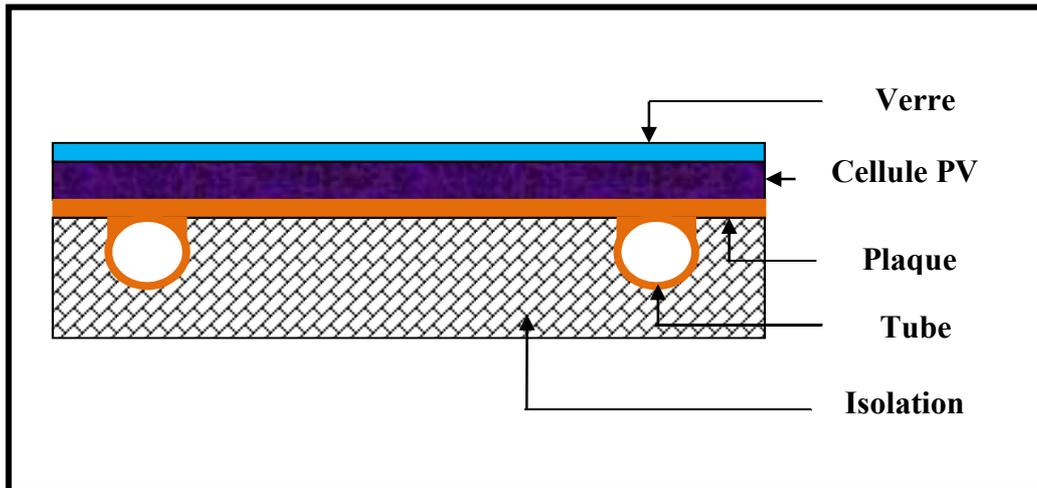


Figure 4-3 : Modèle d'un capteur hybride PVT

La Figure 4-4- montre le schéma électrique équivalent du capteur hybride où figurent les énergies absorbées ou produites par le capteur

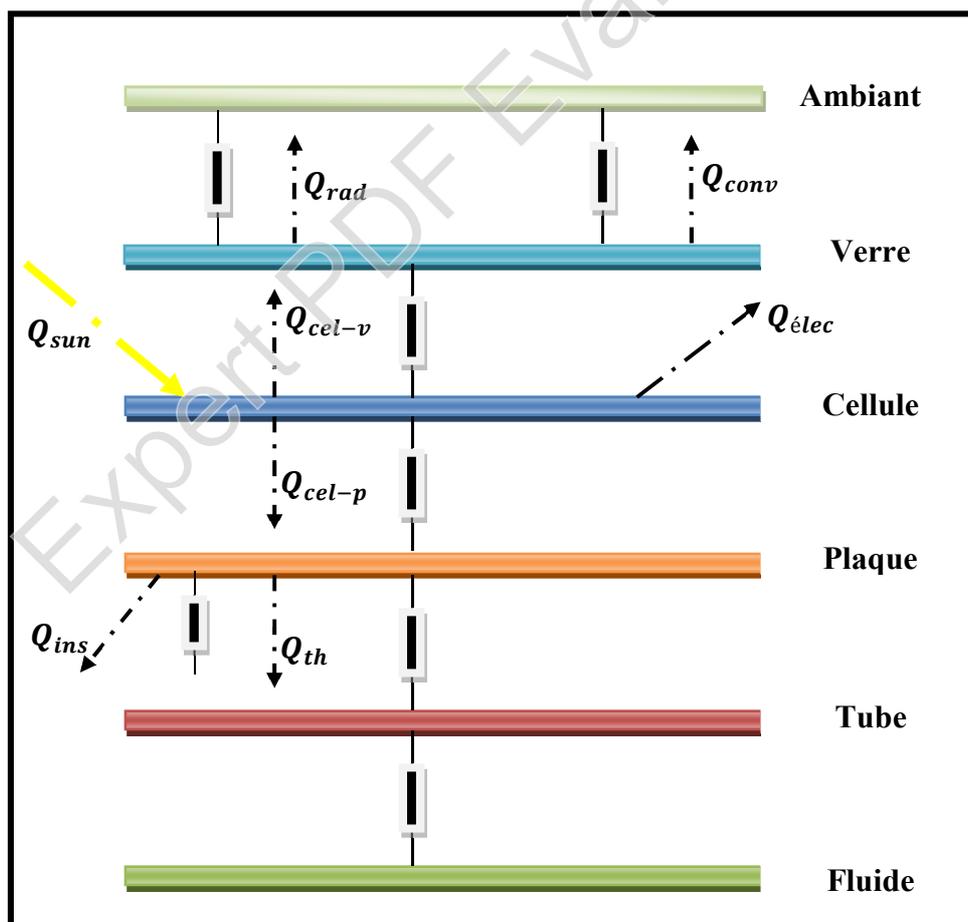


Figure 4-4-Schéma électrique équivalent du capteur hybride

4-4- Principe de l'étude thermique d'un PVT

Le but de l'étude, est de prévoir les températures dans chaque couche du capteur PVT, Pour cela on utilise le principe de conservation de l'énergie pour chaque élément du système qui peut donc être présenté par une équation de bilan d'énergie suivante :

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

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

Le bilan au nœud i donne :

$$M_i C_i \frac{dT_i}{dt} = \sum_i Q_i - \sum_s Q_i \dots \dots \dots (4 - 1)$$

M_i : Masse du nœud i

C_i : La chaleur spécifique du nœud i

dt : Pas de temps.

4-5- Bilan énergétique du capteur hybride PVT

Le capteur étudié est un modèle de 9 nœuds. Les différents nœuds du ce capteur solaire sont indiqués sur la figure suivante :

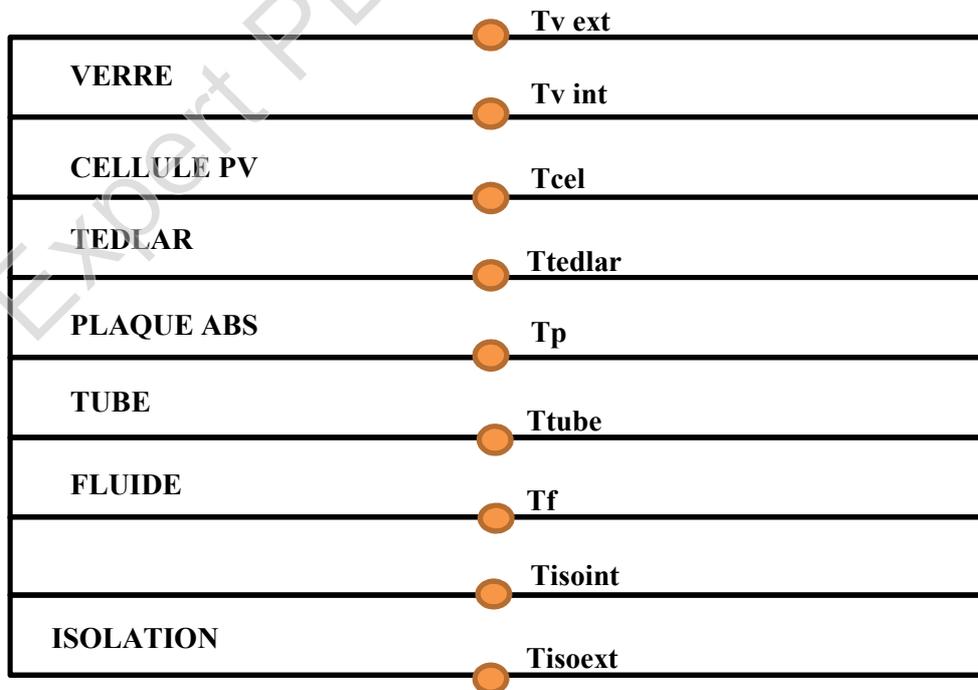


Figure 4-5-Coupe du capteur représentant les températures des différents nœuds

L'énergie thermique fournie par le rayonnement solaire est donnée comme suit [58] :

$$Q_{sun} = A_{verre} G \tau_{verre} \alpha_{cel} \dots \dots \dots (4 - 2)$$

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

G : Rayonnement directe totale absorbée par la cellule solaire (W/m^2)

τ_{verre} : Transmittivité du verre

α_{cel} : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire

Puisque le verre est opaque par rapport aux rayonnements émis par les cellules, la surface du verre devient une surface émettrice, les pertes thermiques par rayonnement sont exprimées comme suit:

$$Q_{rad\ v-a} = \sigma \varepsilon_v A_{verre} (T_v^4 - T_{ciel}^4) \dots \dots \dots (4 - 3)$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en ($W/ m^2 K^4$)

ε_v : Émissivité du verre

A_v : Surface du verre en (m^2)

$$T_{ciel} = 0.0552 (T_a)^{1.5} \dots \dots \dots (4 - 4)$$

Nous avons exprimé les pertes thermiques par convection par l'équation de transfert de chaleur entre le verre du capteur hybride et le milieu extérieur comme suit:

$$Q_{conv\ v-a} = h_{c,a} A_v (T_v - T_a) \dots \dots \dots (4 - 5)$$

Avec :

T_v : Température du verre du capteur hybride (K)

T_a : Température ambiante (K)

$h_{c,a}$: Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m^2K), il est donné par l'expression suivante [58] :

$$h_{c,a} = 2.8 + 3.0 V_{vent} \dots \dots \dots (4 - 6)$$

➤ Pour la face extérieure du verre :

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face extérieur est comme suit :

$$M_v c_v \frac{dT_{v \text{ ext}}}{dt} = Q_{sun} - Q_{rad \text{ v-ciel}} - Q_{conv \text{ v-a}} - Q_{cond \text{ v}} \dots \dots \dots (4 - 7)$$

$$M_v c_v \frac{dT_{v \text{ ext}}}{dt} = A_v G - \sigma \epsilon_v A_v (T_{v \text{ ext}}^4 - T_{ciel}^4) - h_{c,a} A_v (T_{v \text{ ext}} - T_a) - h_{cond \text{ v}} A_v (T_{v \text{ ext}} - T_{v \text{ int}})$$

$$h_{cond \text{ v}} = \frac{\lambda_v}{\delta_v} \dots \dots \dots (4 - 8)$$

λ_v : La conductivité thermique du verre

δ_v : L'épaisseur de verre

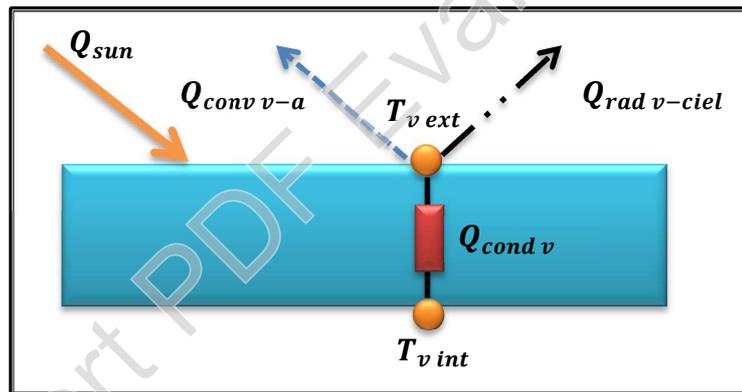


Figure 4-6- Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face extérieure

➤ Pour la face intérieure du verre :

L'équation de l'énergie au niveau du verre ; face intérieur est comme suit :

$$M_v c_v \frac{dT_{v \text{ int}}}{dt} = Q_{sun} + Q_{cond \text{ v}} - Q_{cond \text{ v-cel}} \dots \dots \dots (4 - 9)$$

$$M_v c_v \frac{dT_{v \text{ int}}}{dt} = A_v G \tau_{verre} + h_{cond \text{ v}} A_v (T_{v \text{ ext}} - T_{v \text{ int}}) - h_{cond \text{ v-cel}} A_v (T_{v \text{ int}} - T_{cel})$$

$$h_{cond\ v-cel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \dots \dots \dots (4 - 10)$$

λ_{cel} : La conductivité thermique du verre

δ_{cel} : L'épaisseur de verre

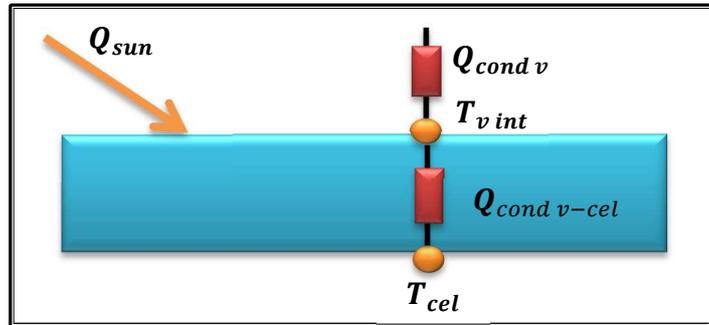


Figure 4-7-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la vitre ; face intérieure

➤ Pour la cellule solaire :

L'équation de l'énergie au niveau de la cellule photovoltaïque est comme suit :

$$M_{cel}c_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = A_v G \tau_{verre} \alpha_{cel} + Q_{cond\ v-cel} - Q_{cond\ cel-ted} - Q_{ele} \dots \dots \dots (4 - 11)$$

$$M_{cel}c_{cel} \frac{dT_{cel}}{dt} = A_v G \tau_{verre} \alpha_{cel} + h_{cond\ v-cel} A_v (T_{v\ int} - T_{cel}) - h_{cond\ cel-ted} A_{cel} (T_{cel} - T_{ted}) - Q_{ele}$$

$$h_{cond\ cel} = \frac{\lambda_{cel}}{\delta_{cel}} \dots \dots \dots (4 - 12)$$

$$h_{cond\ cel-ted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \dots \dots \dots (4 - 13)$$

$$Q_{ele} = \frac{Q_{sun}}{\alpha_{cel}} \eta_{ref} \exp(\beta(T_{cel} - T_{ref})) \dots \dots \dots (4 - 14)$$

η_{ref} : Est le rendement de référence est mesuré pour une température de référence T_{ref} prise égale à 25°C.

β ; Le coefficient de température qui représente la relation entre le rendement de la cellule solaire et la température (environ 0.004 pour une cellule solaire au silicium) [58].

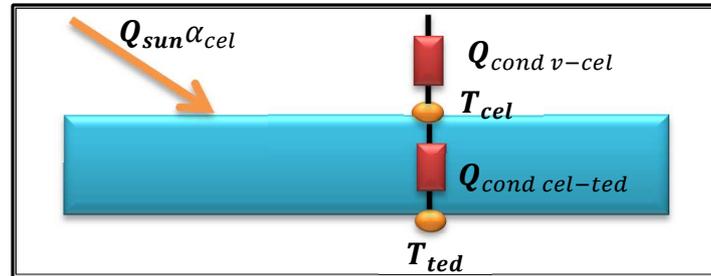


Figure 4-8-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la cellule photovoltaïque

➤ Pour la couche de Tedlar :

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de Tedlar est donnée comme suit :

$$M_{ted}c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = Q_{cond\ cel-ted} - Q_{cond\ ted-p} \dots \dots \dots (4 - 15)$$

$$M_{ted}c_{ted} \frac{dT_{ted}}{dt} = h_{cond\ ted} A_{ted} (T_{cel} - T_{ted}) - h_{cond\ ted-p} A_{ted} (T_{ted} - T_p)$$

$$h_{cond\ ted} = \frac{\lambda_{ted}}{\delta_{ted}} \dots \dots \dots (4 - 16)$$

$$h_{cond\ ted-p} = 2 \frac{\lambda_p}{\delta_p} \dots \dots \dots (4 - 17)$$

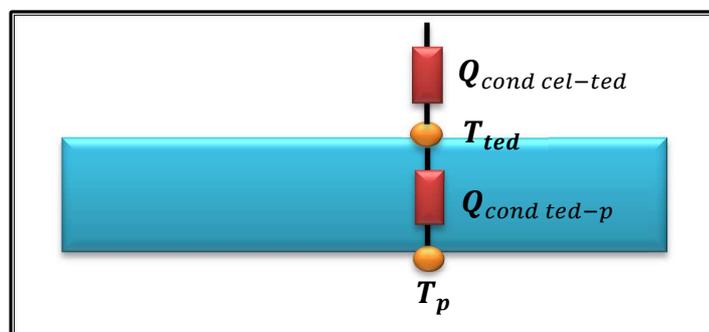


Figure 4-9-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de la couche de Tedlar

➤ Au niveau de la plaque absorbante

La figure 4.10-a permet d'observer que chaque élément du tube reçoit un apport d'énergie par chacun de ses côtés.

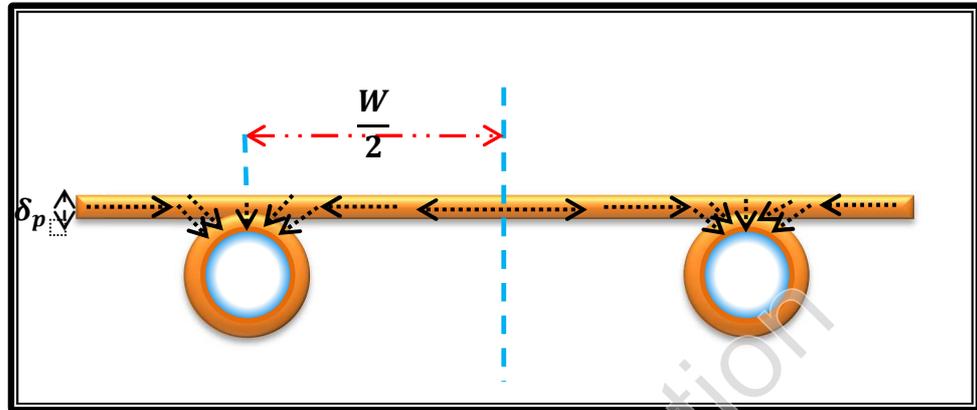


Figure 4-10-a-Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante

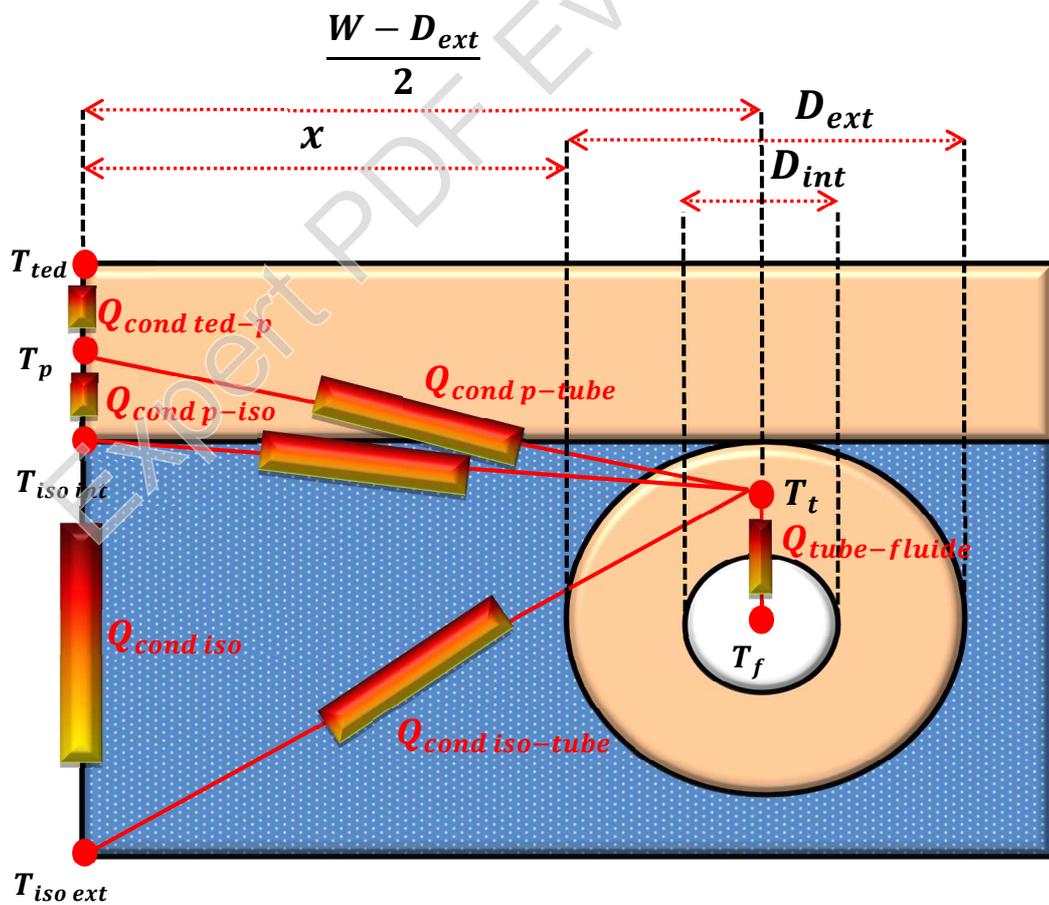


Figure 4-10-b-Bilan énergétique au niveau de la plaque absorbante

L'équation de l'énergie au niveau de la couche de la plaque absorbante est donnée comme suit :

$$M_p c_p \frac{dT_p}{dt} = Q_{cond\ ted-p} - Q_{cond\ p-tube} - Q_{cond\ p-iso} \dots \dots \dots (4 - 18)$$

$$M_p c_p \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{cond\ ted-p} (T_{ted} - T_p) - A_{p-tube} h_{cond\ p-tube} (T_p - T_t) - A_{p-iso} h_{cond\ p-iso} (T_p - T_{iso\ int}) \dots \dots \dots (4 - 19)$$

La surface de contact entre le tube et la plaque absorbante c'est est :

$$A_{p-tube} = A_p \left(\frac{W - D_{ext}}{W} \right) \dots \dots \dots (4 - 20)$$

La surface de contact entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est :

$$A_{p-iso} = A_p \left[1 - \left(\frac{W - D_{ext}}{W} \right) \right] \dots \dots \dots (4 - 21)$$

$$h_{cond\ p-tube} = \frac{1}{2 \left(\frac{\delta_p}{\lambda_p} + \frac{\left(\frac{D_{ext} - D_{int}}{2} \right)}{\lambda_p} \right)} \dots \dots \dots (4 - 22)$$

Le coefficient de transfert de chaleur par conduction entre la plaque absorbante et l'isolant, face intérieure est :

$$h_{cond\ p-iso} = 2 \frac{\lambda_p}{\delta_p} \dots \dots \dots (4 - 23)$$

➤ **Au niveau du tube :**

L'équation de l'énergie au niveau du tube est donnée comme suit :

$$M_t c_t \frac{dT_t}{dt} = Q_{cond\ p-tube} - Q_{conv\ tube-fluide} - Q_{cond\ tube-iso} \dots \dots \dots (4 - 24)$$

$$M_t c_t \frac{dT_t}{dt} = A_{p-tube} h_{cond p-tube} (T_p - T_t) - A_{fluide} h_{conv tube-fluide} (T_t - T_f) - A_{iso-tube} h_{cond tube-iso} (T_t - T_{iso ext}) \dots \dots \dots (4 - 25)$$

Nous avons considéré que la surface de contact entre le tube et l'isolant est :

$$A_{iso-tube} = \frac{D_{ext}}{2} \pi L \dots \dots \dots (4 - 26)$$

$$A_{fluide} = \left(\frac{D_{int}}{2} \right)^2 \pi \dots \dots \dots (4 - 27)$$

Le : $h_{conv t-f}$ est le coefficient de transfert de chaleur de convection entre le fluide et le mur de tube.

Pour l'écoulement de l'eau dans le tube :

$$Nu = \frac{h_{conv t-f} D_h}{\lambda_f} \dots \dots \dots (4 - 28)$$

$$D_h = \frac{4 A_{fluide}}{p}$$

p : est le périmètre du tube

➤ **Pour le fluide caloporteur :**

La distribution de la température dans le sens d'écoulement du fluide, si on considère que le fluide a une température d'entrée T_e et une température de sortie T_s , et les diamètres extérieur et intérieur du tube sont respectivement D_{ext} et D_{int} , pour un segment de l'eau dans le tuyau de communication (**figure 4.11**) :

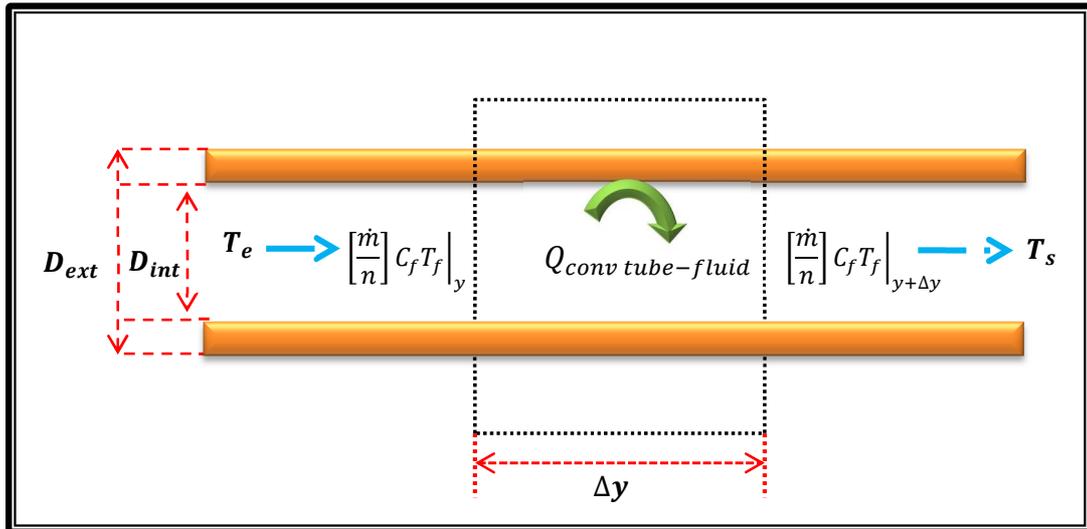


Figure 4-11- Ecoulement du fluide dans un tube

L'équation de l'énergie pour le fluide caloporteur est donnée comme suit :

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = Q_{conv tube-fluide} + Q_{th} \dots \dots \dots (4 - 29)$$

$$M_f c_f \frac{dT_f}{dt} = A_{fluide} h_{conv tube-fluide} (T_t - T_f) + n W F' [S - U_{pa} (T_f - T_a)] \dots \dots \dots (4 - 30)$$

$$S = \left(\tau_{verre} \alpha_{cel} - \left(\frac{\eta_{ref} A_{cel}}{A_{capteur}} \right) \right) G$$

➤ Pour la couche d'isolant

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face intérieure est donnée par :

$$M_{iso} c_{iso} \frac{dT_{iso int}}{dt} = Q_{cond p-iso} - Q_{cond iso} \dots \dots \dots (4 - 31)$$

$$\begin{aligned} M_{iso} c_{iso} \frac{dT_{iso int}}{dt} &= A_{p-iso} h_{cond p-iso} (T_p - T_{iso int}) \\ &- h_{cond iso} A_{iso} (T_{iso int} - T_{iso ext}) \dots \dots \dots (4 - 32) \end{aligned}$$

$$h_{cond iso} = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}}$$

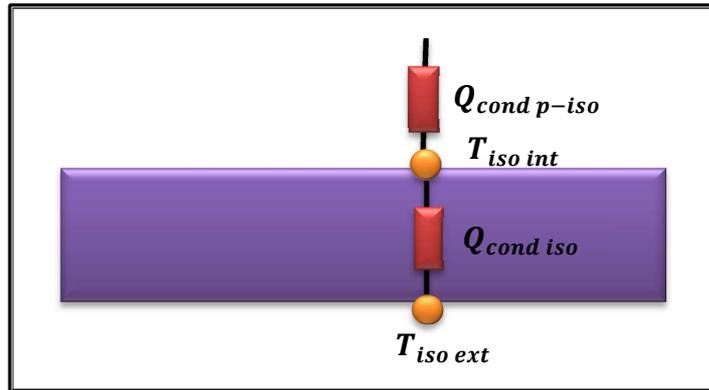


Figure 4-12-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face intérieure

L'équation de l'énergie au niveau de l'isolant ; face extérieure est donnée par :

$$\begin{aligned}
 M_{iso}c_{iso} \frac{dT_{iso ext}}{dt} &= Q_{cond tube-iso} + Q_{cond iso} \\
 &- Q_{cond iso-a} \dots \dots \dots (4 - 33)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 M_{iso}c_{iso} \frac{dT_{iso ext}}{dt} &= A_{iso-tube} h_{cond tube-iso} (T_t - T_{iso ext}) \\
 &+ h_{cond iso} A_{iso} (T_{iso int} - T_{iso ext}) \\
 &- h_{conv iso-a} A_{iso} (T_{iso ext} - T_a) \dots \dots \dots (4 - 34)
 \end{aligned}$$

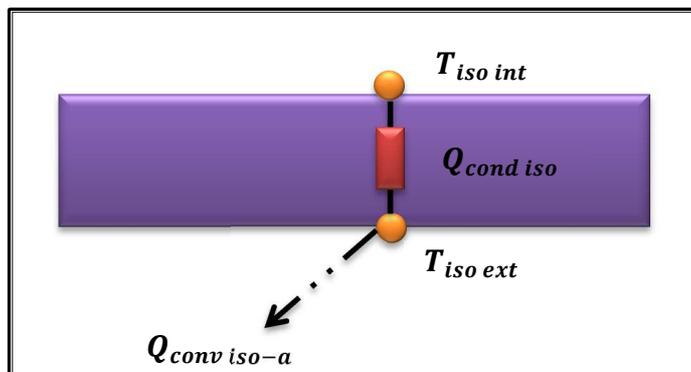


Figure 4-13-Schéma représentant l'échange thermique au niveau de l'isolant ; face extérieure

Le gain utile de la chaleur peut être calculé comme suit [49]:

$$Q_{util} = A_{capteur} F_R \left((\tau\alpha)_{PV} G - U_{p-a} (T_e - T_a) \right) \dots \dots \dots (4 - 35)$$

Dans cette équation le gain utile de la chaleur Q_{util} est représenté en fonction du surface de capteur $A_{capteur}$, du facteur d'extraction de la chaleur F_R , du produit de Transmittivité-absorptivité des cellules photovoltaïques $(\tau\alpha)_{PV}$, du rayonnement solaire G , du coefficient de perte de chaleur de capteur U_{p-a} qu'on va expliquer par la suite, et de la différence du température entre le température de refroidissement T_e et la température ambiante T_a .

Le facteur d'extraction de la chaleur F_R c'est la proportion du gain réel de l'énergie utile du collecteur au maximum du gain utile possible si la surface du collecteur entière était à la température d'entrée du fluide, il peut être calculé comme suit :

$$F_R = \frac{\dot{m}c_f}{A_{capteur} U_{p-a}} \left(1 - \exp \left(\frac{-A_{capteur} U_{p-a} F'}{\dot{m}c_f} \right) \right) \dots \dots \dots (4 - 36)$$

L'efficacité corrigée d'ailette F' peut être calculée comme suit:

$$F' = \frac{\frac{1}{U_{p-a}}}{\frac{1}{W(U_{p-a}(D_{ext} + (W - D_{ext})F))} + \frac{1}{C_b} + \frac{1}{\pi D_h h_{conv p-f}}} \dots \dots \dots (4 - 37)$$

Avec :

$$F = \frac{\tanh \left(m \frac{(W - D_{ext})}{2} \right)}{m \frac{(W - D_{ext})}{2}} \dots \dots \dots (4 - 38)$$

Cette équation détermine l'efficacité du secteur à ailette entre les tubes adjacents en tenant compte de l'influence du lancement de tube W et du diamètre extérieur de tube D_{ext} .

Le coefficient global de perte de chaleur U_{p-a} du capteur représente la somme des pertes vers l'avant du capteur et extérieur du bord, dans cette équation on l'a

supposé que le coefficient de perte vers l'avant U_{top} , pourrait être calculé en utilisant l'équation empirique de Klein comme donné par **Duffie et Beckman (2006)** :

$$U_{top} = \frac{1}{\left\{ \frac{N}{\frac{c}{T_{pm}} \left(\frac{T_{pm} - T_a}{N - f} \right)^e + h_{conv\ v-a}} \right\} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 - T_a^2)}{1 + \frac{2N + f - 1 + 0.133\varepsilon_p}{(\varepsilon_p + 0.00591 N h_{conv\ v-a}) + \frac{\varepsilon_v}{N}} - N} \dots \dots \dots (4 - 39)$$

$$c = (520 - 0.000051\beta^2) \dots \dots \dots (4 - 40)$$

$$f = (1 + 0.089h_{conv\ v-a} - 0.1166 h_{conv\ v-a}\varepsilon_p)(1 + 0.07866 N) \dots \dots \dots (4 - 41)$$

$$e = 0.430 \left(1 - \frac{100}{T_{pm}} \right) \dots \dots \dots (4 - 42)$$

β Est l'inclinaison du capteur, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, N est le nombre de couvertures ou de couches de verre, ε_v l'emittance de la couverture ou de du verre, ε_p l'emittance du plaque et $h_{conv\ v-a}$ est le transfert thermique de convection dû au vent.

$$U_b = \frac{\lambda_{iso}}{\delta_{iso}} \dots \dots \dots (4 - 43)$$

4-6- Performances thermiques des capteurs hybrides

Les paramètres nécessaires pour la détermination des performances thermiques du capteur hybride sont la température d'entrée et de sortie, la température ambiante et le volume de fluide qui coule à travers le capteur, ainsi que l'irradiation solaire et la vitesse du vent.

Comme pour les capteurs solaires thermiques, le rendement thermique d'un capteur hybride est exprimé en fonction de la température réduite T^* telle que [58]:

$$T^* = \frac{T_e - T_a}{G} \dots \dots \dots (4 - 44)$$

Pour calculer l'énergie utile fournie par le capteur hybride on va utiliser la même équation pour le cas d'un capteur thermique plan une modification simple car en fait une partie du rayonnement absorbé est convertie en énergie électrique, l'énergie utile est donc :

$$q_{util} = A F_R (\tau \alpha^* G - U_L (T_e - T_a)) \dots \dots \dots (4 - 45)$$

Telle que α^* est le facteur d'absorptivité [58] exprimé par :

$$\alpha^* = \alpha - \eta_{PV}$$

Le facteur d'absorptivité α d'un capteur solaire thermique est plus grand que celui d'un capteur hybride à cause de la présence d'une couche sélective sur l'absorbeur du capteur solaire thermique. Une telle couche n'est pas présente à la surface du capteur hybride.

Le rendement thermique du capteur hybride est déterminé expérimentalement par la formule suivante :

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m} C_{eau} (T_s - T_e)}{A G} \dots \dots \dots (4 - 46)$$

4-7- Résolution numérique du système

Le problème consiste à déterminer, en fonction des paramètres externes et des paramètres internes:

- Les températures au niveau de chaque couche du composant du capteur

➤ L'efficacité globale thermique et électrique du capteur

La résolution du système est effectuée par la méthode de **RK4**

4-7-1- Méthode de Range-Kutta :

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

Considérons le problème suivant :

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

La méthode RK4 est donnée par l'équation :

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

Où

$$k_1 = f(t_n, T_n)$$

$$k_2 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{h}{2}k_1\right)$$

$$k_3 = f\left(t_n + \frac{h}{2}, T_n + \frac{h}{2}k_2\right)$$

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

L'idée est que la valeur suivante (T_{n+1}) est approchée par la somme de la valeur actuelle (T_n) et du produit de la taille de l'intervalle (h) par la pente estimée.

Nous supposons connues, les températures des différents nœuds à l'instant initial, et avec l'algorithme de calcul (**organigramme**),

Nous obtenons un système d'équations, dont la résolution permet de calculer nos inconnues.

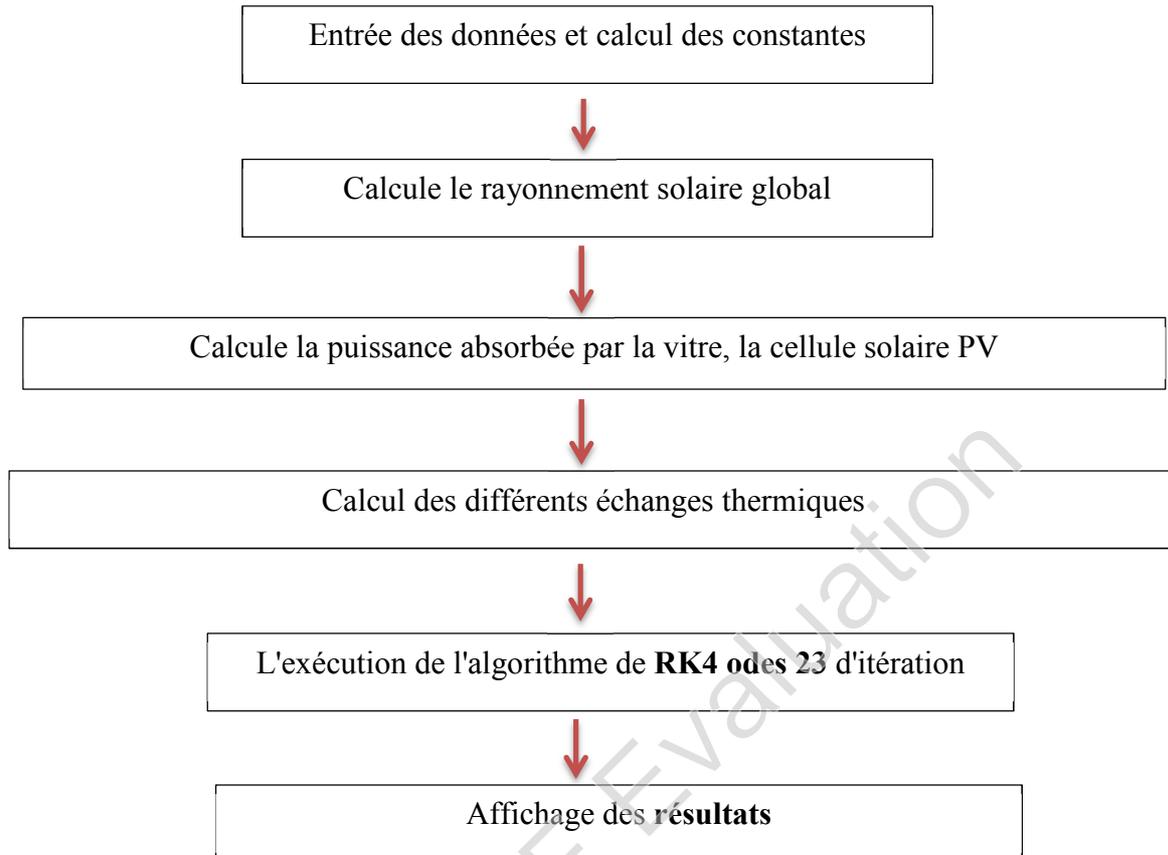
4-7-2- Traitement informatique

Les diverses étapes de résolution sont les suivantes:

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

Toutes ces étapes sont représentées dans l'organigramme qui suit. Le programme principal a été développé en **MATLAB 6**.

4-7-3- Organigramme :



CHAPITRE 05

Expert PDF Evaluation

Chapitre 5

Interprétation et discussions des résultats

5.1. Introduction

Dans les chapitres précédents, on a étudié le capteur solaire hybride, en plus, on a élaboré un code de calcul en langage **MATLAB**. Dans ce chapitre, on va exposer les résultats calculés issus de la simulation. Ces résultats concernent essentiellement la variation des différentes températures au cours du temps dans les différentes couches du capteur, l'irradiation global, la température ambiante, la production d'énergie thermique et enfin le rendement électrique et thermique du capteur.

Les résultats sont présentés sous forme de graphes, en tenant compte de la considération suivante:

- Les calculs sont effectués à partir d'un instant initial " t_0 " pour chaque composant du capteur, à une température initiale et avec un pas de temps égal à une heure.

5.2. La variation du rayonnement global

Le rayonnement global, étant le paramètre le plus influant sur le fonctionnement du système, il est donné pour la ville de Ghardaïa situé au Sud Algérien pour la date 04/06/2008, ces données météorologiques sont :

- altitude : 450 m
- Sa situation géographique (32° de latitude Nord, 4°81' de longitude Ouest)
- albédo : 0.2

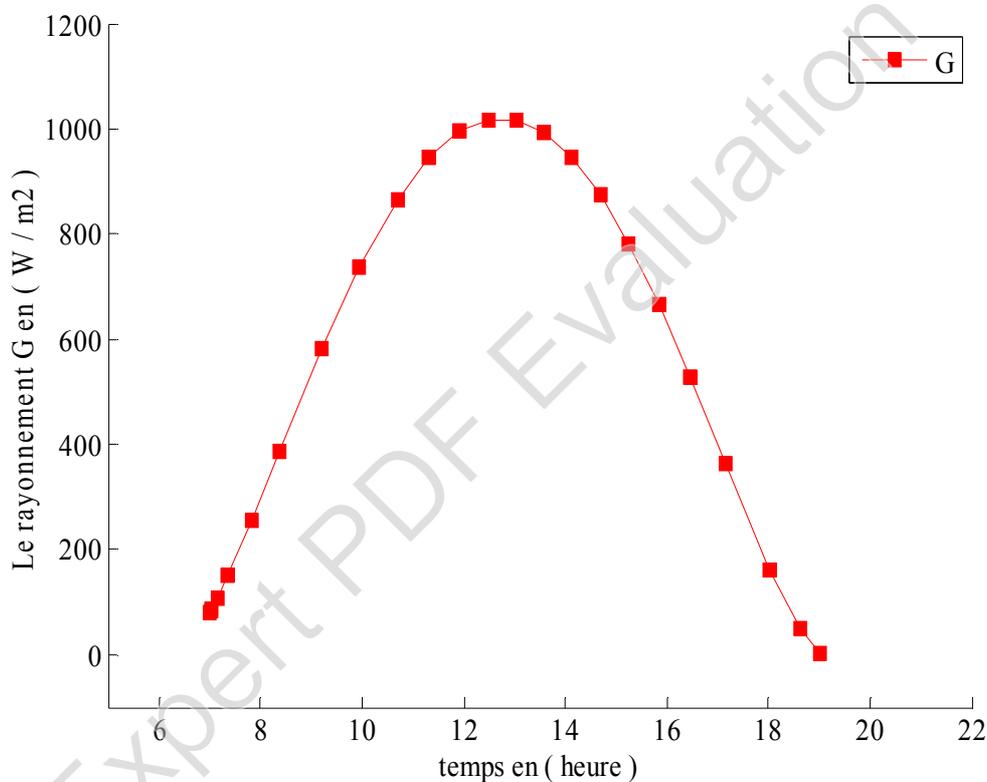


Figure 5.1 : Variations temporelles du rayonnement global

La **figure 5.1** montre l'évolution temporelle du rayonnement solaire global (**G**), reçue par mètre carré de surface, on peut remarquer que la puissance atteint son maximum entre 12^h00 et 13^h00.

5.3. La variation de la température ambiante et la température du ciel

La **figure 5.2** présente la variation de la température ambiante et de la température du ciel en fonction du temps. La température du ciel varie en fonction de la température ambiante, et qui ont la même allure (figure 5.2). Ceci peut être expliqué par le comportement de T_{ciel} par rapport à T_a :

Dans la relation « 4-4 » la température du ciel (T_{ciel}) dépend de la température ambiante (T_a). Elles atteignent leurs valeurs maximales entre 14^h00 et 17^h00.

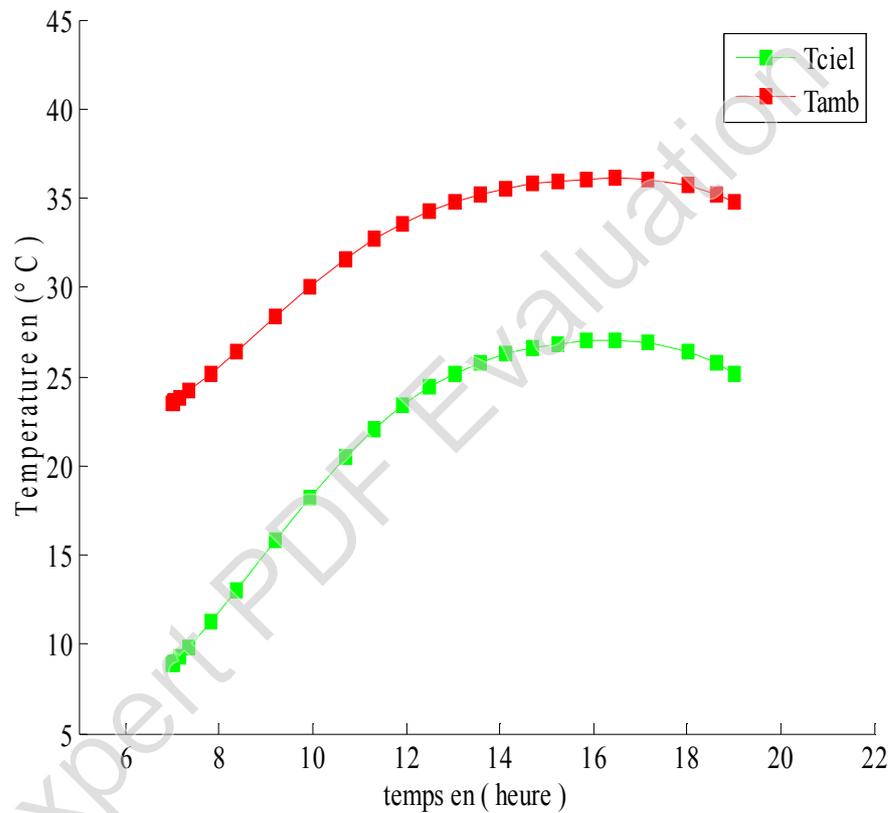


Figure 5.2 : Variations temporelles de la température ambiante et la température de ciel

5.4. Étude de l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du capteur

Avant d'étudier la distribution des différentes températures dans chaque couche du capteur PVT, on va étudier l'effet des paramètres externes et internes sur le fonctionnement du capteur hybride PVT.

5.4.1- Effet de la vitesse du vent

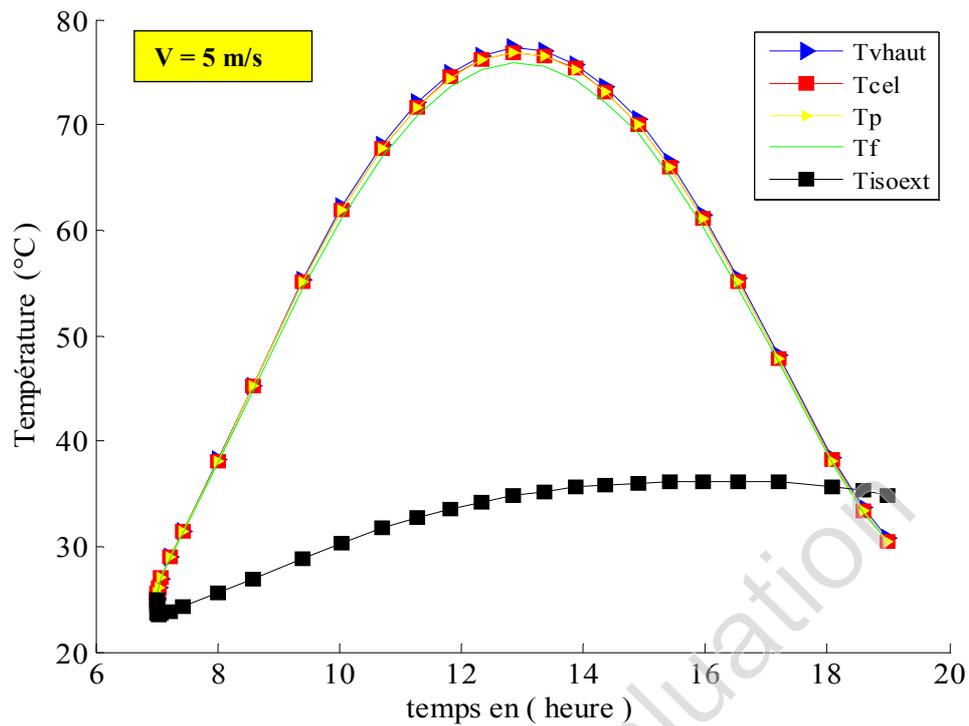


Figure 5.3.a : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur pour V=5m/s

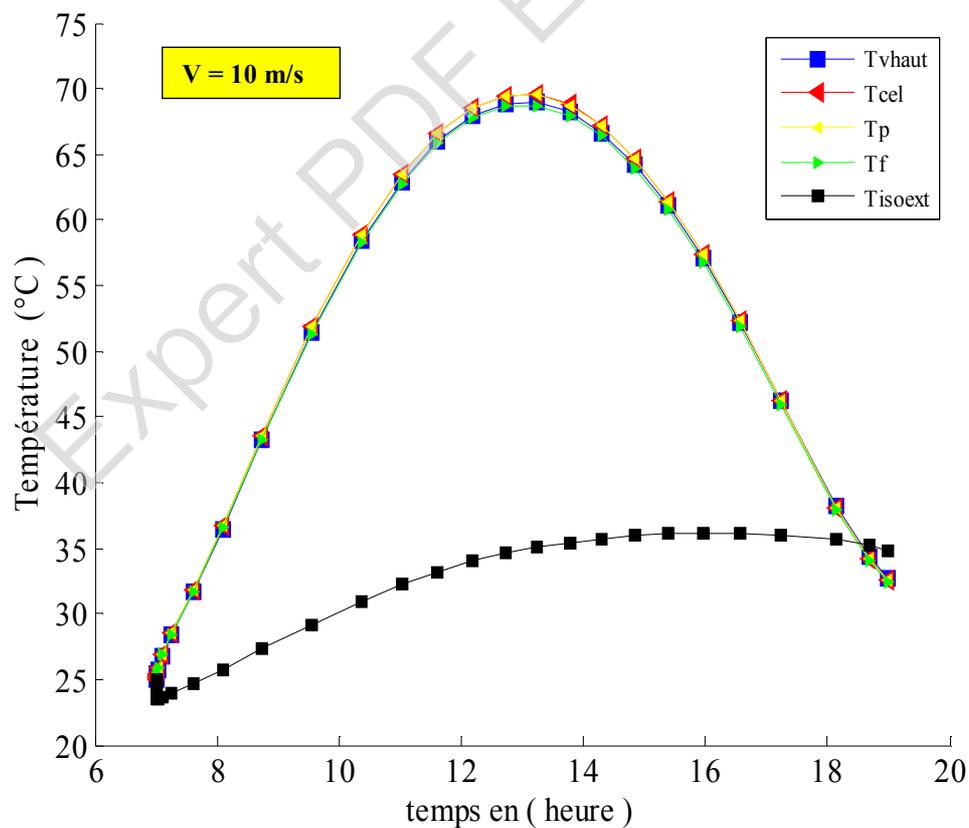


Figure 5.3.b : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur pour V=10m/s

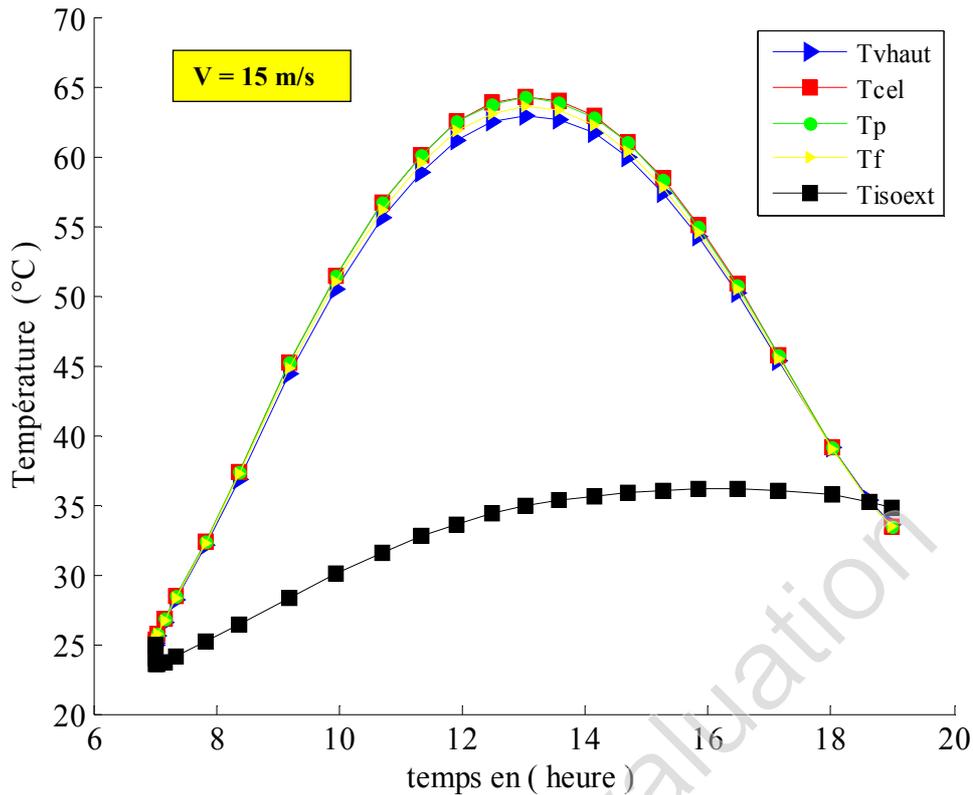


Figure 5.3.c : Influence de la vitesse du vent sur les températures des couches du capteur pour $V=15$ m/s

On observe dans les figures 5.3, (a, b, c) l'influence de la vitesse du vent sur la température des différentes couches du capteur PVT, où l'écart de la température varie graduellement. Par contre, on constate une faible influence du vent sur les températures des autres constituantes du capteur (isolant).

On remarque que quand la vitesse du vent augmente légèrement, les températures de chaque couche diminuent parce qu'elles sont liées à la vitesse du vent par le coefficient d'échange par convection ($h_{ca} = 2,8 + 3,0 V_v$).

5.4.2- Effet de la distance entre les tubes (x) sur les températures des couches du capteur

Pour voir l'effet de la distance entre deux tubes successifs sur les performances du capteur solaire hybride PVT, nous avons donné plusieurs valeurs à cette distance (x). Les figures suivantes représentent, pour les trois cas étudiées de (x), l'évolution de la température de sortie du fluide caloporteur T_s et les autres températures pour chaque composant du capteur solaire hybride.

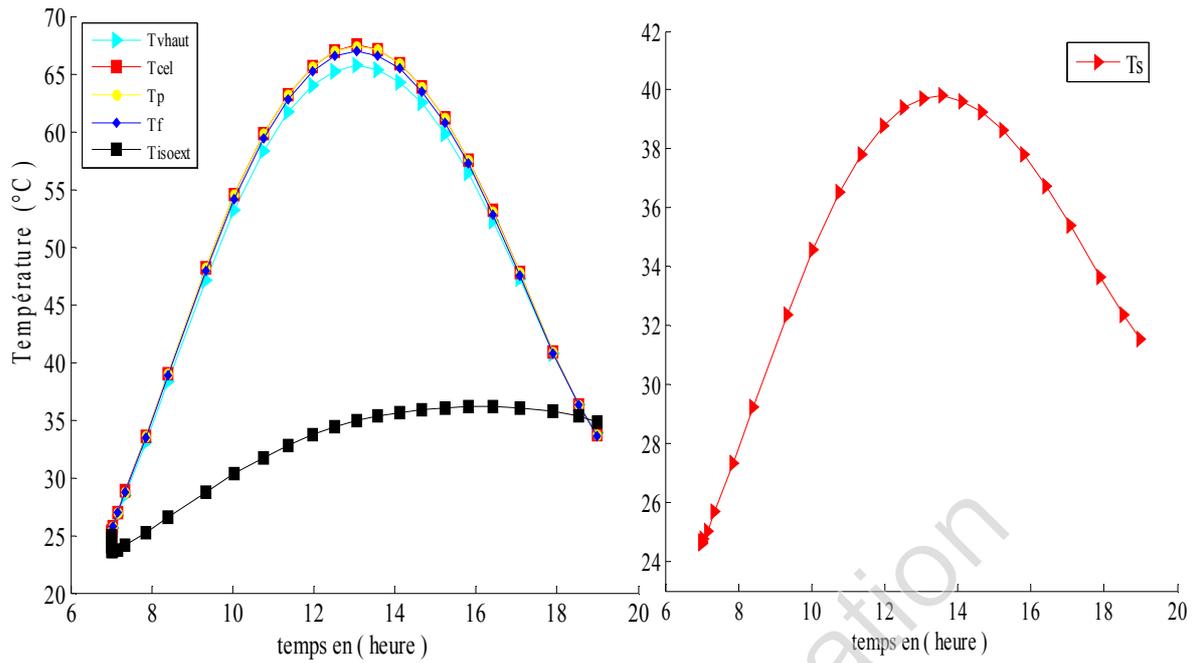


Figure 5.4.a- Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $x=1$ Cm

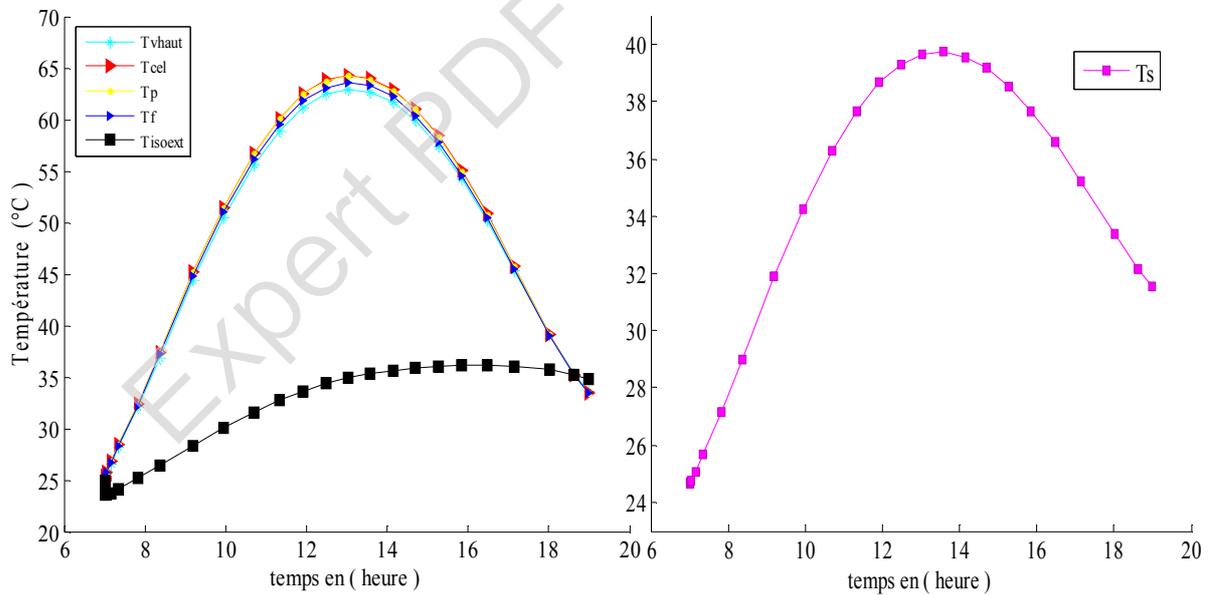


Figure 5.4.b- Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $x=1,5$ Cm

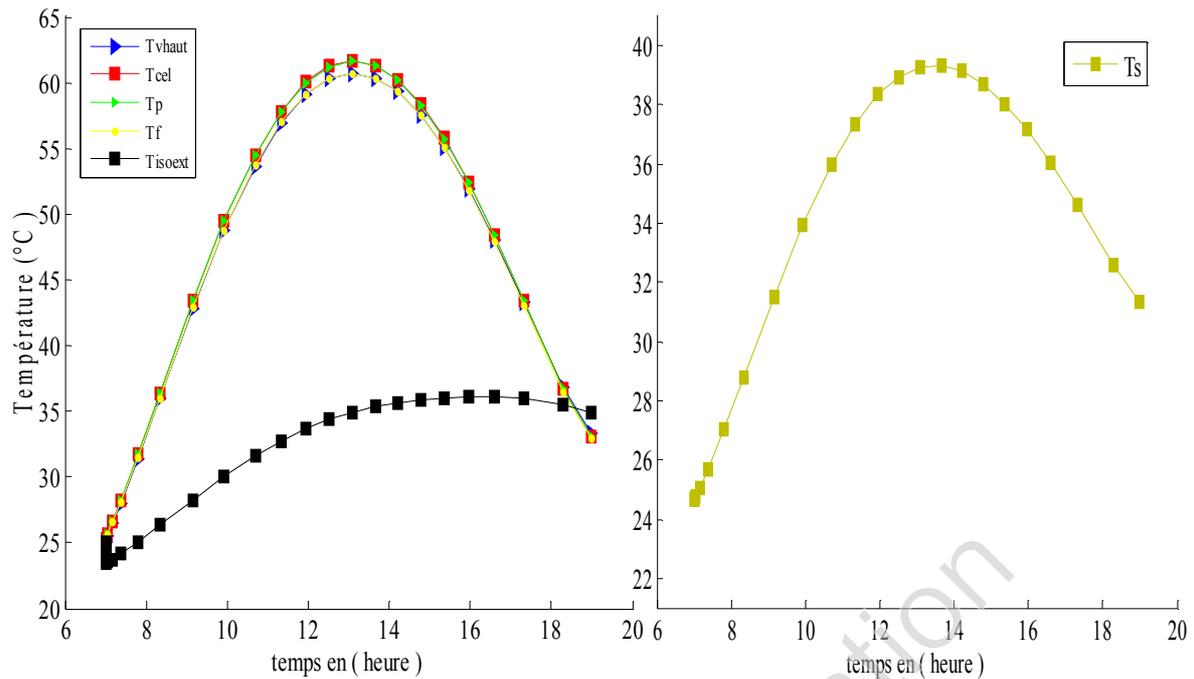


Figure 5.4.c-Variation de la température de sortie et les températures de chaque couche d'un PVT pour $x=2$ Cm

Sur les **figures 5.4. (a, b, c)** on peut voir que la température de sortie du fluide atteint la valeur maximale ($40\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour le cas ou $x = 1$ Cm et les températures des différentes couches varient entre $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ et $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, par contre dans les deux autres cas de x , les valeurs de ces températures sont plus grandes pour les couches du capteur et faible pour la température T_s ($39\text{ }^{\circ}\text{C}$),

On remarque aussi que quand la distance entre deux tubes augmente légèrement, les températures de chaque couche diminuent parce qu'elles sont liées à la température d'entrée du fluide caloporteur avec le coefficient d'échange par convection entre le tube et le fluide.

5-5- La variation des températures des différents éléments du capteur PVT

Nous avons déterminé la variation de la température au niveau de chaque couche qui constitue notre capteur solaire hybride photovoltaïque thermique pour une température d'entrée de fluide (eau) donnée T_e .

L'observation de la **figure 5-5** permet de remarquer que l'allure des courbes de la variation temporelle de la température dans chaque composant du capteur est la même. En outre, il est aisé de constater que les températures les plus élevées sont

celles de la vitre, la cellule PV, la plaque absorbante et de l'isolant interne alors que la plus basse est celle de l'isolant externe.

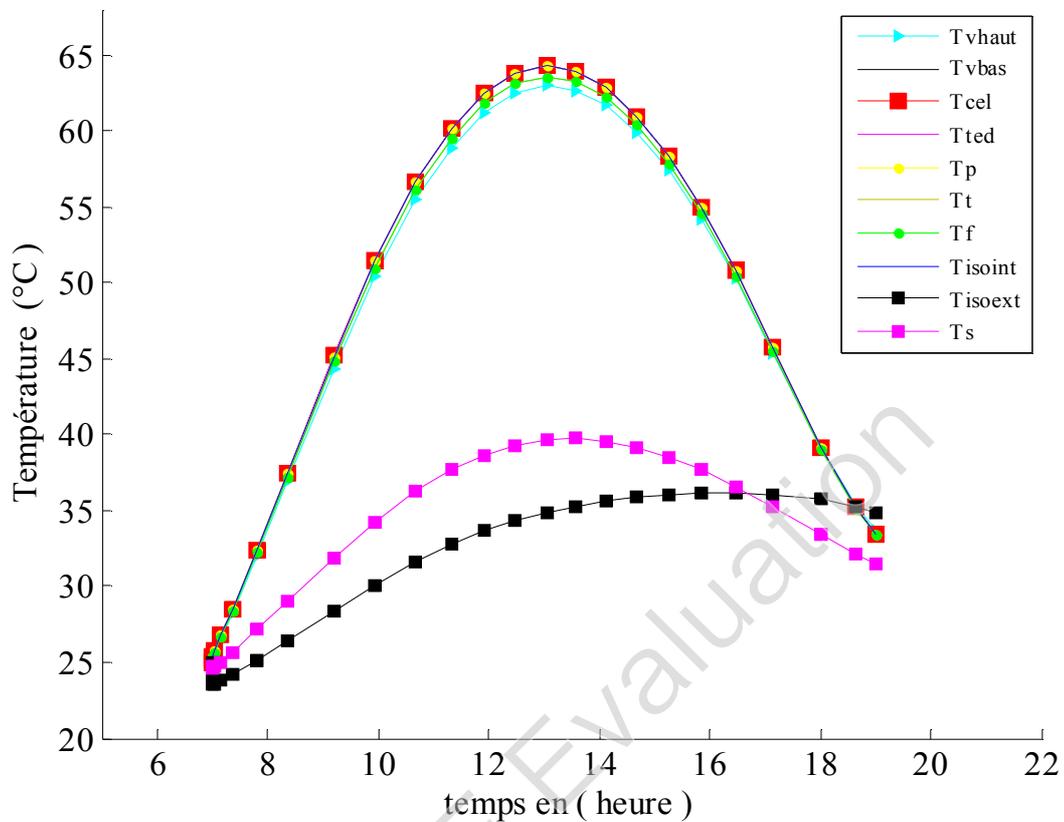


Figure 5-5 : La variation des températures des différents éléments du capteur hybride PVT

L'élévation des températures du vitrage intérieur et extérieur est due à l'absorption par la vitre du rayonnement solaire incident et de la chaleur cédée par la surface de la cellule photovoltaïque par rayonnement. La température de la face intérieure est légèrement supérieure à celle de la face extérieure, ceci s'explique par la quantité importante du flux reçu par la face intérieure tandis que la face extérieure est soumise à l'action du vent.

La température du fluide caloporteur atteint une valeur maximale de 64 °C, résultant de la puissance absorbée par la plaque qui est importante. Par ailleurs l'isolant étant placé au-dessous de l'absorbant avec une conductivité thermique élevée, d'où la température de la face intérieure de l'isolant est importante.

La température de sortie du fluide atteint sa valeur maximale jusqu'à 40 °C entre 12^h et 14^h.

5.6- la production d'énergie électrique et thermique d'un capteur PVT

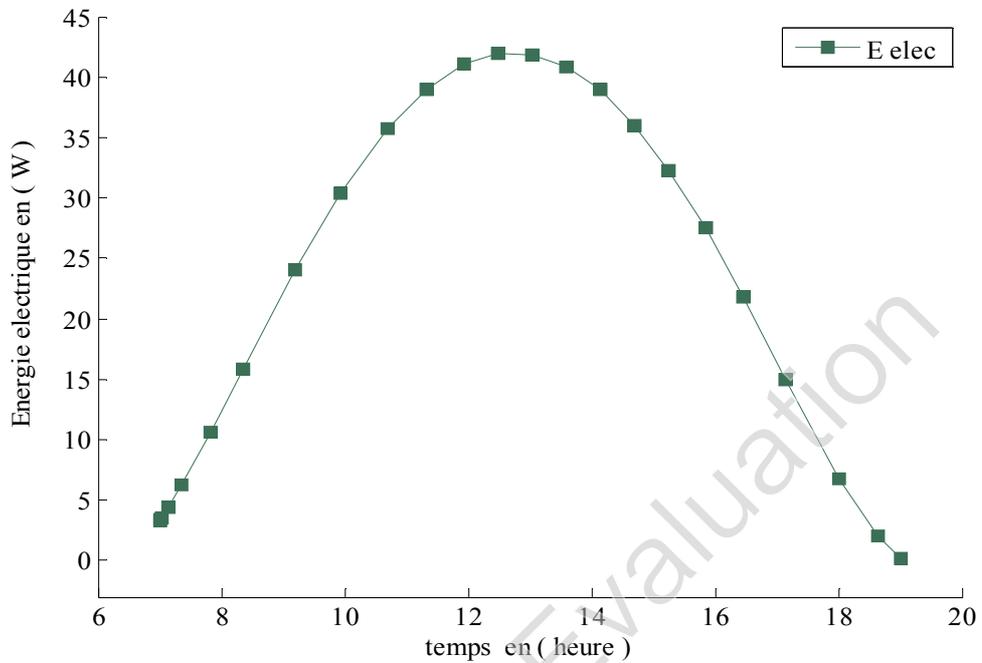


Figure 5-6 : Production de l'énergie électrique par le capteur PVT

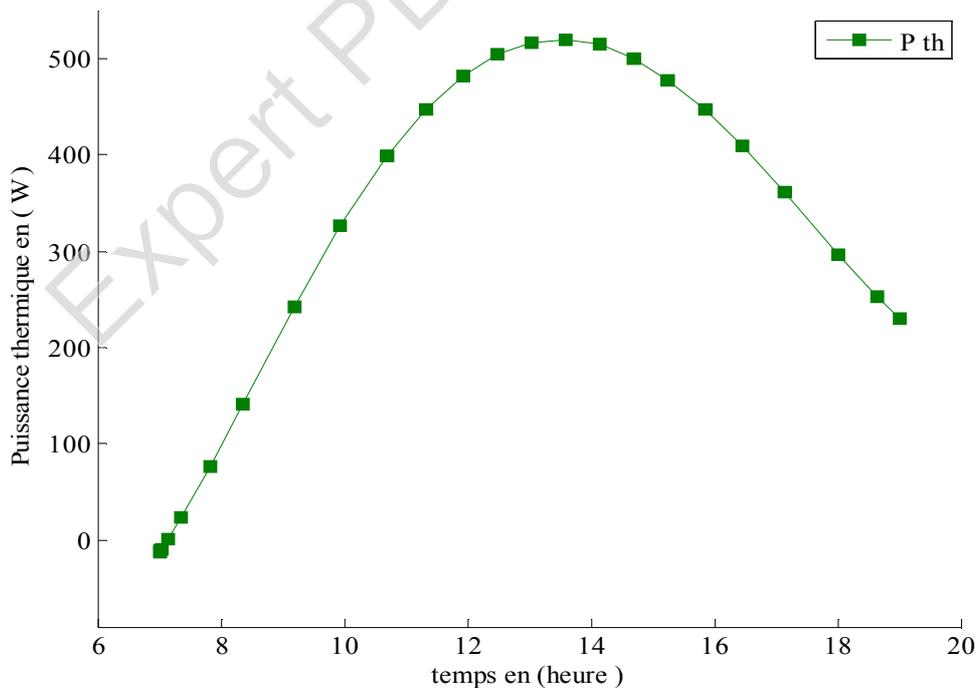


Figure 5-7 : Variation de la puissance thermique d'un capteur PVT

Les figures 5.6 et 5.7 présente la variation de l'énergie électrique et de la puissance thermique utile fournie par le capteur solaire hybride PVT en fonction du temps, on observe que ces énergie montent à partir d'une valeur presque nulle a $t = 6^h$ de façon presque parabolique jusqu'à ses valeurs maximales entre 12^h , 14^h . On remarque l'influence de l'élévation du rayonnement solaire G sur les performances du capteur hybride : le rendement électrique et thermique, comme montré les figures suivantes :

5.7- Le rendement électrique et thermique

La variation temporelle du rendement électrique et thermique (figure 5.8, figure 5.9) sont similaires à celle de l'irradiation globale. Dans le premier temps une augmentation du rendement jusqu'à une valeur maximale à 13^h puis une décroissance jusqu'à la fin de la journée. Le rendement électrique du capteur hybride PVT est de l'ordre de 10%, alors que le rendement thermique atteindre une valeur de 51%.

Ces résultats sont en bon accord avec les résultats expérimentaux de K. TOUAFEK et al. [26].

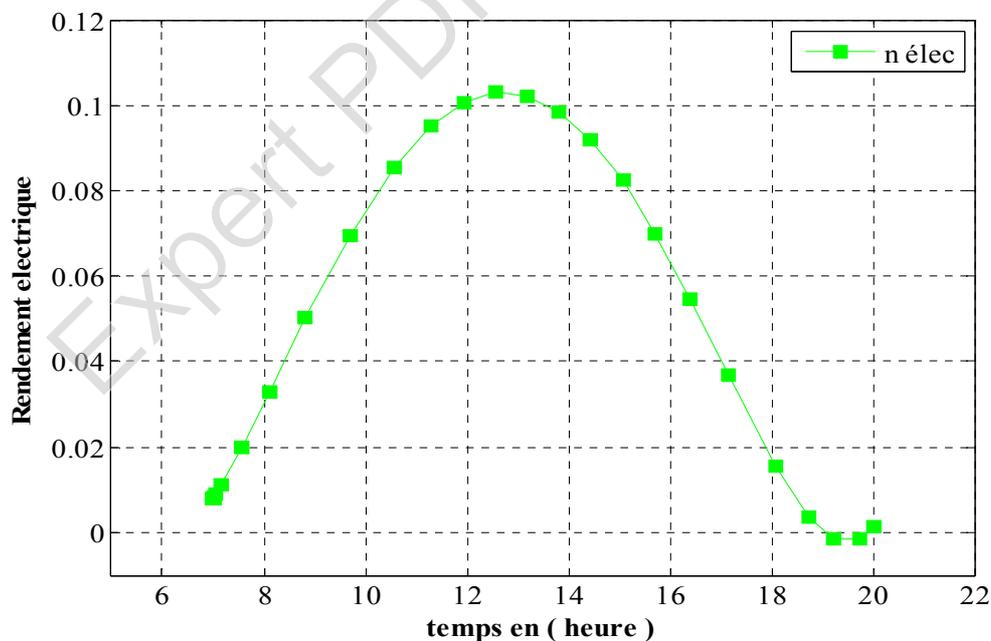


Figure 5-8 : Le rendement électrique du capteur PVT

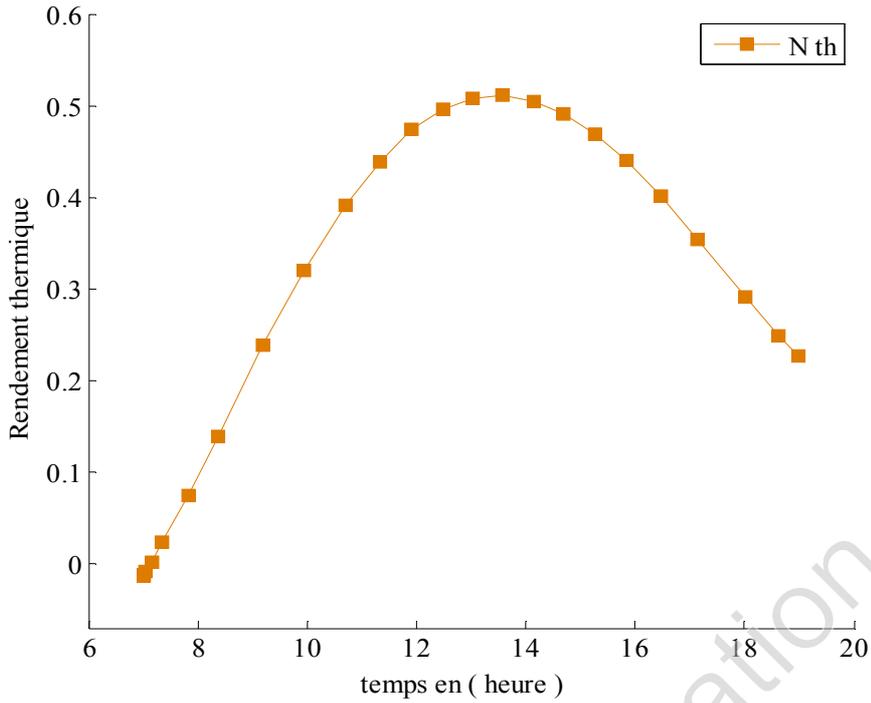


Figure 5-9 : Le rendement thermique du capteur PVT

5.8- La variation de la température de sortie du fluide caloporteur

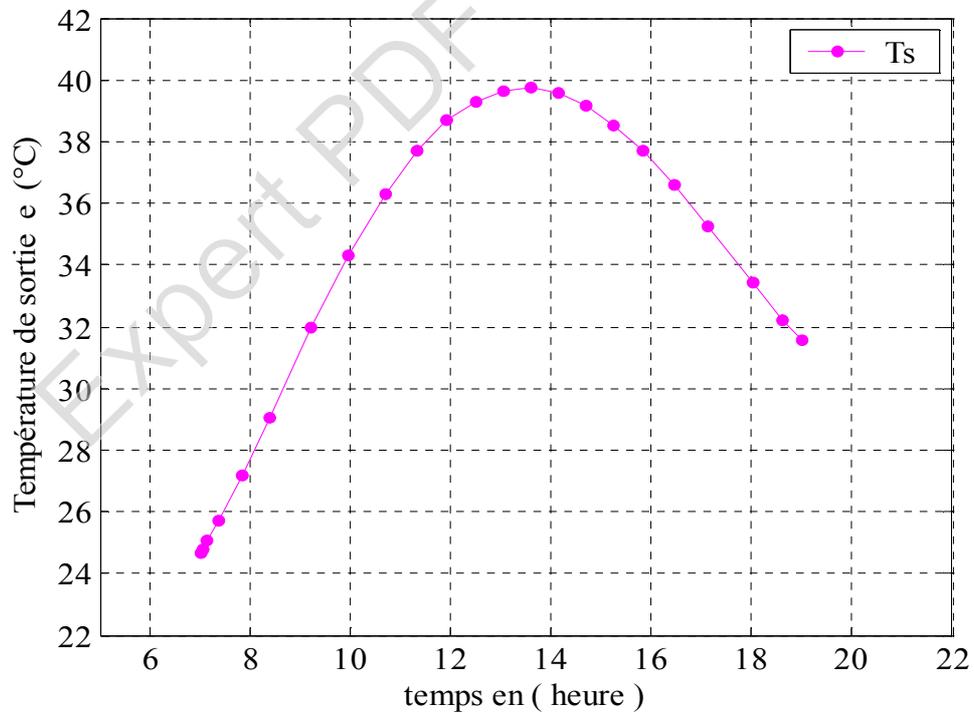


Figure5.10- La variation de la température de sortie du fluide caloporteur

D'après la figure précédente, on voit clairement que :

La température de sortie du fluide caloporteur (T_s) augment avec le temps jusqu'à atteindre une valeur maximale égale à 40°C , puis elle diminue jusqu'à la fin de la journée.

5.9- La variation de la température réduite

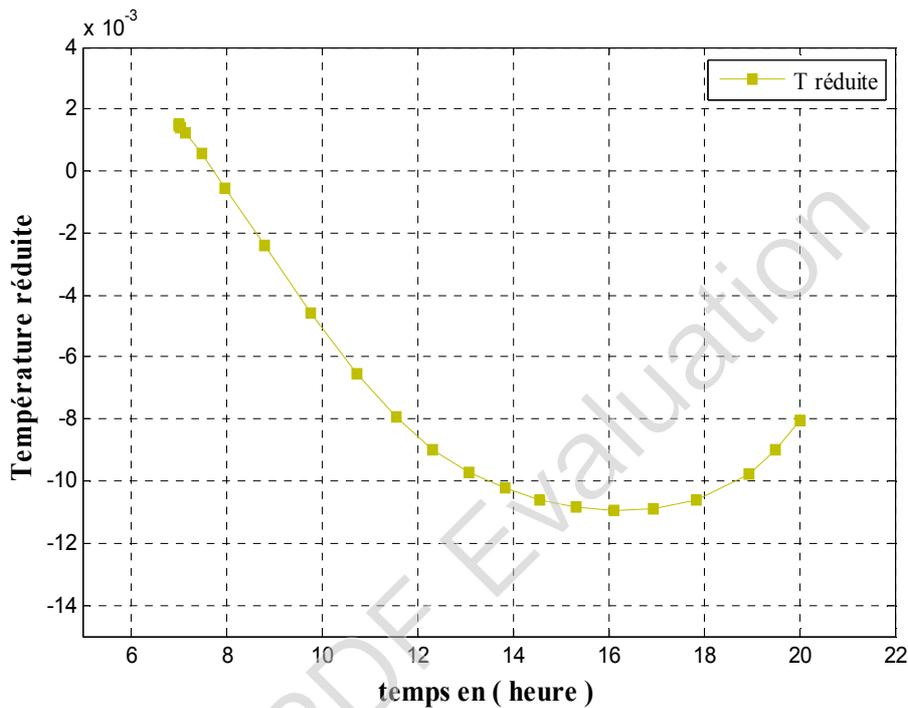


Figure 5.11- La variation de la température réduite

5.10- Le rendement thermique en fonction de la température réduite

Dans la suite, on va tracer la courbe du rendement thermique en fonction de la température réduite :

$$T_{red} = \frac{T_e - T_a}{G}$$

Avec :

$(T_e - T_a)/G$ est en $\text{K.m}^2/\text{W}$.

Comme montre la figure suivante, Le rendement thermique du capteur hybride varie linéairement avec la température réduite $(T_{in}-T_{out})/G$ et sa valeur est satisfaisante en le comparant aux rendements moyens des capteurs thermiques classiques

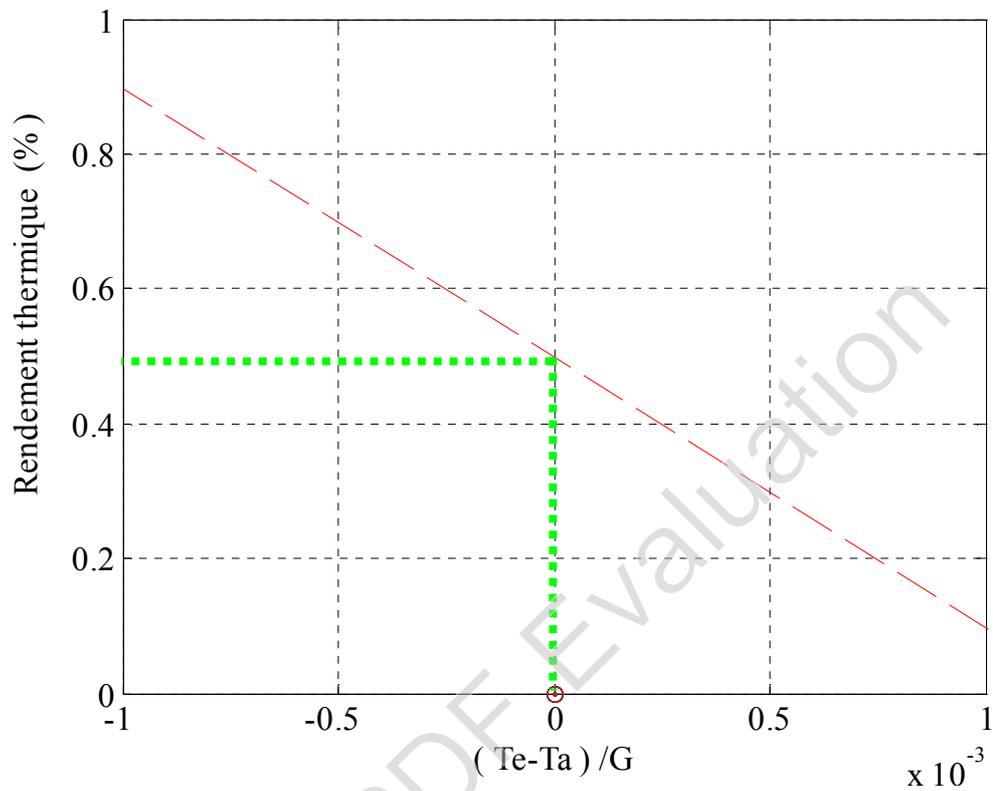


Figure 5.12- La variation du rendement thermique en fonction de la température réduite

5.12-Comparaison avec des autres configurations

Il existe différentes configurations de capteurs solaires hybrides dans la littérature, dans ce paragraphe on va faire une comparaison entre les résultats de notre configuration de capteur PVT qu'on a étudié dans ce mémoire où l'absorbeur utilisé est en tube et feuille en acier galvanisé avec celle de la référence [61], où l'auteur a étudié expérimentalement un capteur hybride PVT avec un absorbeur en plaque et tube en forme de serpentin en cuivre.

La **figure 5.13** montre la distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert de vitre supplémentaire, la température au niveau de la cellule du capteur hybride maximum atteinte est de 47°C (rappelons qu'elle était de 66°C sans échangeur de chaleur) et elle est de 43°C pour le capteur photovoltaïque témoin, on voit donc que l'intégration de l'échangeur de chaleur au niveau du capteur a fait diminuer la température du capteur hybride en arrachant de la chaleur pour chauffer le fluide.

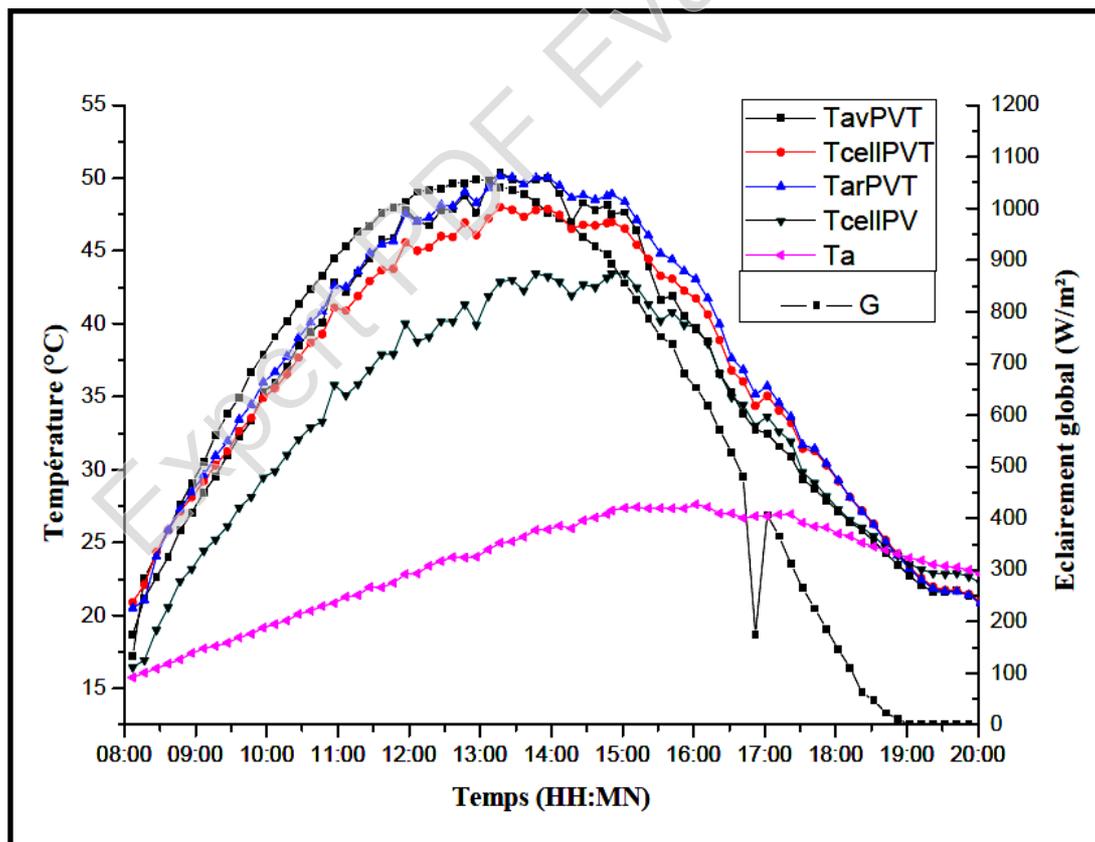


Figure 5.13 : Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert [61]

Concernant les températures de sortie du fluide caloporteur :

D'après les figures suivantes (**Figures 5.14-5.15-5.16**), nous remarquons que dans le cas de l'échangeur en serpentin la température de sortie du fluide atteint les 40 °C pour une température d'entrée fixée à 20 °C ce qui montre le gain en énergie thermique réalisé.

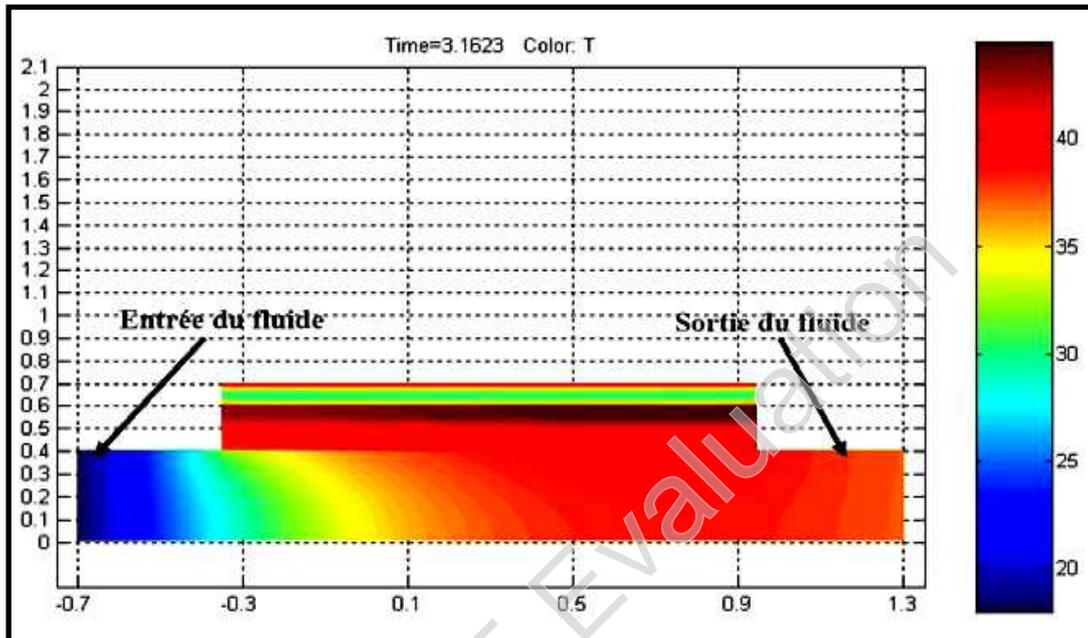


Figure 5.14 : Distribution de la température dans le capteur hybride en serpentin [49]

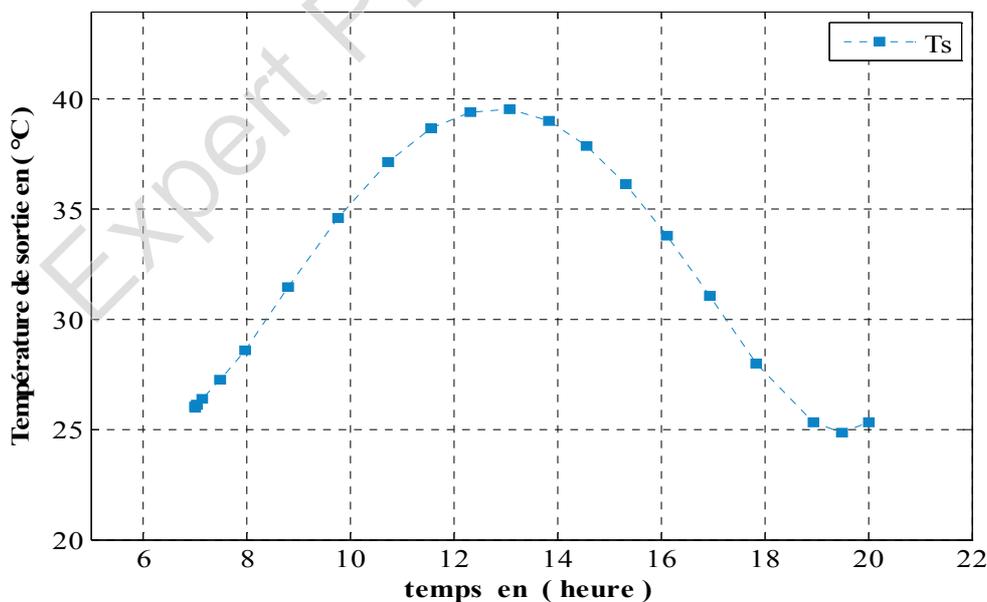


Figure 5.15- La variation de la température de sortie du fluide caloporteur dans notre capteur PVT en tube et feuille

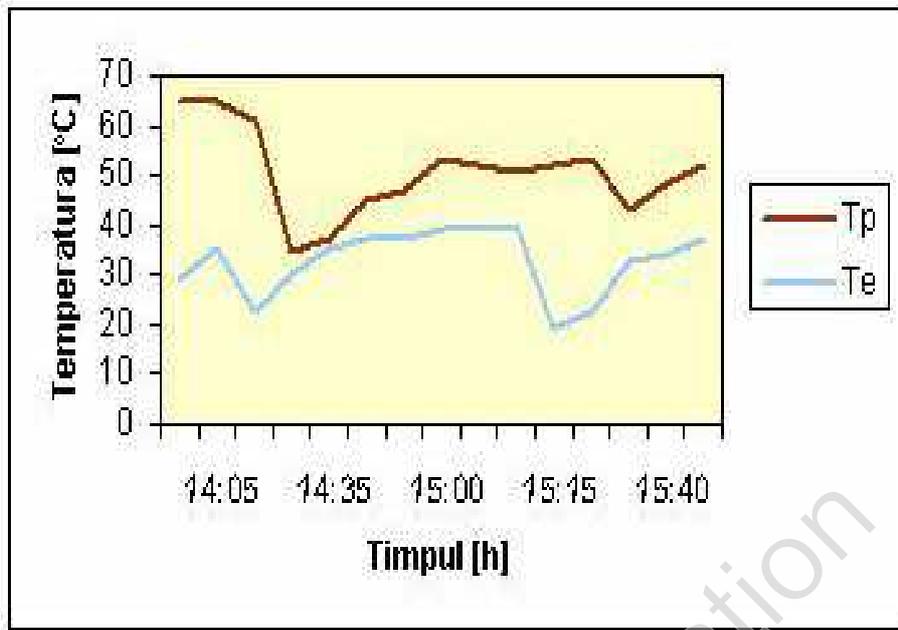


Figure 5.16- La variation de la température de sortie du fluide et de la plaque dans le capteur hybride PVT en serpentin effectué on 24 08 2007 1601

Pour le rendement du capteur hybride PVT en serpentin, il est représenté sur la figure 5.17 :

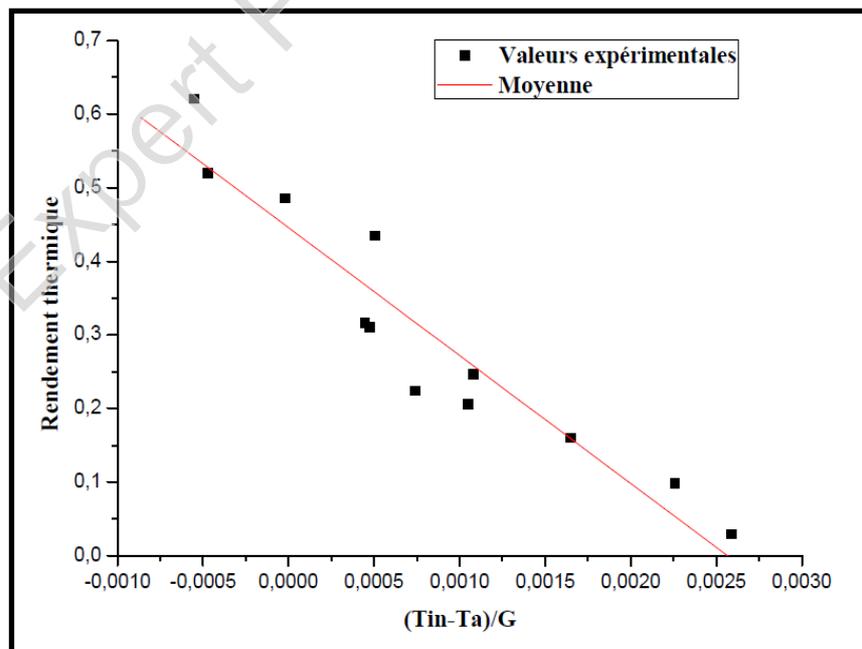


Figure 5.17- Rendement thermique du capteur hybride serpentin

On remarque que le rendement thermique du capteur hybride recouvert avec l'absorbeur en forme de serpentín est presque égal à celui de notre capteur en feuille et tube en acier galvanisé (rappelons qu'il est de 51%).

Expert PDF Evaluation

Conclusion générale et perspectives

Une grande partie du rayonnement solaire absorbé par les cellules photovoltaïques n'est pas convertie en électricité et provoque une augmentation de leur température et réduit en conséquence leur efficacité électrique. La température des capteurs photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. Cette chaleur extraite peut aussi être utilisée pour chauffer de l'eau ou transformée en une autre énergie.

Il existe plusieurs configurations pour les capteurs solaires hybrides, on peut les classés selon la forme du l'absorbeur utilisé comme suit : PVT de la manche, PVT a deux absorbeurs et le PVT en feuille et tube...

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude théorique et numérique d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique PVT ou nous avons utilisé une configuration de l'absorbeur en feuille et tube en Acier galvanisé. Notre intérêt a étudié théoriquement la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride et nous avons établi par simulation numérique le comportement thermique du capteur PVT.

Pour les capteurs hybrides on considère le rendement total qui est la somme du rendement électrique et du rendement thermique pour des conditions de rayonnements choisis.

Nous avons établi les équations gouvernant le système (capteur solaire hybride PVT), en régime transitoire une approche numérique basée sur la méthode d'itération de **RANGE-KUTTA d'ordre 4**, est utilisée pour la résolution des équations qui régissent le fonctionnement de ce système.

CONCLUSION GENERALE

Les résultats obtenus mettent en évidence l'influence des paramètres externes et internes sur les caractéristiques de fonctionnement du capteur solaire hybride notamment la production d'énergie, l'efficacité thermique et électrique, et l'efficacité globale du capteur.

L'irradiation solaire qui reste le paramètre le plus influant sur ces caractéristiques, et que ces dernières ont la même allure que la variation temporelle de l'irradiation solaire.

Nous avons obtenu un rendement thermique égal à 51 % du capteur hybride.

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

On peut résumer les avantages de combiner un collecteur thermique avec un panneau PV dans l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïques et thermiques) séparément installés.

Enfin il faudra sans doute comparer les coûts et performances des systèmes classiques avec les systèmes basés sur les capteurs hybrides comme les mini centrales de production d'énergies électriques et thermiques. Compte tenu de nos résultats, il n'est pas impossible que ces derniers soient plus avantageux.

Perspectives

Comme perspectives à notre travail, on pense que les futures recherches intéressantes à développées porteront sur :

- Une étude d'un capteur hybride avec un système énergétique complet.

 - Une étude du capteur hybride en fonction de l'inclinaison ainsi qu'une étude comparative avec différents débits du fluide caloporteur et pour différents types de fluides (air, glycol..).

 - Une étude complémentaire du capteur hybride avec des réflecteurs qui pourraient augmenter ses performances électriques lorsqu'il est recouvert serait aussi intéressante.
-
-

BIBLIOGRAPHIE

Expert PDF Evaluation

BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] **BELHADJ MOHAMMED.** Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. Mémoire de Magister. 2007-2008
- [2] **PROJET DE RECHERCHE INTEGRE 6.2.** Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques au bâti. Ed. Rapport final. Lyon, France, 2004, 52 p.
- [3] **TSELEPIS S., TRIPANAGONOSTOPOULOS Y.** Economic analysis of hybrid photovoltaic/thermal solar systems and comparison with standard PV modules. In : BIBLIOGRAPHIE 166 Proceedings of the International conference PV in Europe, 2002, Rome, Italie, pp.856- 859.
- [4] **RADZIEMSKA E.** Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review. Progress in Energy and Combustion Science, 2003, vol. 29, n° 5, pp. 407-424.
- [5] **EPIA, IEA-PVPS, EPVTP.** Compared assessment of selected environmental indicators of photovoltaic electricity in OECD cities. Eds. Bruxelles, Belgique: EPIA, IEA-PVPS, EPVTP, 2006, 32 p.
- [6] **POLA O., CHIANESE D., BERNASCONI A.** Flat roof integration of a-Si triple junction modules laminated together with flexible polyolefin membranes. Solar Energy, 2007, vol. 81, n° 9, pp. 1144-1158.
- [7] **KALOGIROU S. A.** Solar thermal collectors and applications. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, vol. 30, n° 3, pp. 231-295.
- [8] **ZONDAG H. A., D.W. DE VRIES., et al.** The yield of different combined PV-thermal collector designs, Solar Energy 74 (2003) 253–269.
- [9] **ZONDAG H. A.** Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2005. Accepté pour publication.
- [10] **ZONDAG H. A., BAKKER M., HELDEN W. G. J.** Eds. PV/T Roadmap-a European guide for the development and market introduction of PV-Thermal technology. Rapport EU-Project PV - Catapult. 2005, 87 p.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [11] **WOLF M.** Performance analyses of combined heating and photovoltaic power systems for residences. *Energy Conversion*, 1976, vol. 16, n° 1-2, pp.79-90.
- [12] **HENDRIE S. D.** Photovoltaic / thermal collector development program. Rapport final. Etats-Unis: Massachusetts Institute of Technology, 1982.
- [13] **RAGHURAMAN P.** Analytical predictions of liquid and air photovoltaic/thermal, flat-plate collector performance. *Journal Solar Energy Engineering*, 1981, vol.103, n° 2, pp. 291-298.
- [14] **COX C. H., RAGHURAMAN P.** Design considerations for flat-plate-photovoltaic/thermal collectors. *Solar Energy*, 1985, vol. 35, n° 3, pp. 227-241.
- [15] **LALOVIC B., KISS Z., WEAKLIEM H.A** hybrid amorphous silicon photovoltaic and thermal solar collector. *Solar Cells*, 1986, vol. 19, n° 2, pp. 131-138.
- [16] **TRIPANAGNOSTOPOULOS Y. TZAVELLAS D., et al.** Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. **In:** Proceedings of the 17th European PV Solar Energy Conference, 2001, Munich, Allemagne, pp. 2515-2518.
- [17] **SANDBERG M., MOSHFEGH B.** Ventilated-solar roof air flow and heat transfer investigation. *Renewable Energy*, 1998, vol. 15, n° 1-4, pp. 287-292.
- [18] **MOSHFEGH B., SANDBERG M.** Flow and heat transfer in the air gap behind photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1998, vol. 2, n° 3, pp. 287-301.
- [19] **GARG H. P., ADHIKARI R. S.** System performance studies on a photovoltaic /thermal (PV/T) air heating collector. *Renewable Energy*, 1999, vol. 16, n° 1-4, pp. 725-730.
- [12] **HEGAZY A. A.** Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors. *Energy Conversion and management*, 2000, vol. 41, n° 8, pp. 861-881.
- [21] **HEGAZY A. A.** Technical note: Optimizing the thermohydraulic performance of flat-plate solar air heaters operating with fixed/variable pumping power. *Renewable Energy*, 1999, vol. 18, n° 2, pp. 283-304.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [22] **HEGAZY A. A.** Performance of flat solar air heaters with optimum channel geometry for constant/variable flow operation. *Energy Conversion and management*, 2000, vol. 41, n° 4, pp. 401-417.
- [23] **MEI L., INFIELD D., EICKER U., et al.** Thermal modelling of a building with an integrated ventilated PV facade. *Energy and buildings*, 2003, vol. 35, pp. 605-617.
- [24] **LLORET A., et al.** Lessons learned in the electrical system design, installation and operation of the Mataro Public Library. **In:** Proceedings of the 14th European PV Solar Energy Conference, 1997, Barcelone, Espagne, pp. 1659-1664.
- [25] **CARTMELL B.P., SHANKLAND N.J., FIALA D., et al.** A multi-operational ventilated photovoltaic and solar air collector: application, simulation and initial monitoring feedback. *Solar Energy*, 2004, vol. 76, pp. 45-53.
- [26] **TIWARI A., SODHA M. S., CHANDRA A., et al.** Performance evaluation of photovoltaic / thermal solar air collector for composite climate of India. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2006, vol. 90, n° 2, pp. 175-189.
- [27] **TIWARI A., SODHA M. S.** Parametric study of various configurations of hybrid PV/thermal air collector: Experimental validation of theoretical model. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2007, vol. 91, n° 1, pp. 17-28.
- [28] **JOSHI A. S., TIWARI A.** Energy and exergy efficiencies of a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) air collector. *Renewable Energy*, 2007, vol. 32, n° 13, pp. 2223-2241.
- [29] **HEPBASLI A.** A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2006. Accepté pour publication.
- [30] **VOKAS G., CHRISTANDONIS N., SKITTIDES F.** Hybrid photovoltaic-thermal systems for domestic heating and cooling-A theoretical approach. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, n° 5, pp. 607-615.
- [31] **DUFFIE J.A., BECKMAN W. A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*. 2nd Ed. New York, Etats- Unis: Wiley Intersciences, 1991, 919 p.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [32] **OTHMAN M. Y., YATIM B., SOPIAN K., et al.** Performance studies on a finned double-pass photovoltaic-thermal (PV/T) solar collector. *Desalination*, 2007, vol. 209, n° 1-3, pp. 43-49.
- [33] **TRIPANAGNOSTOPOULOS Y.** Aspects and improvements of hybrid photovoltaic /thermal solar energy systems. *Solar energy*, 2007, vol. 81, n° 9, pp. 1117 - 1131.
- [34] **HOLLICK J. C.** Solar cogeneration panels. *Renewable Energy*, 1998, vol 15, pp. 195-200.
- [35] **ARENE.** Energie Solaire [en ligne]. Disponible sur:
< <http://www.arenidf.org/energies/solaire.html> > (consulté 18.12.2009).
- [36] **Y.SUKAMONGKOL, S. CHUNGPAINPATANA, B. ET al.** Simulation of a Hybrid Photovoltaic-Thermal (PVT) Air Heating System for Regenerating Desiccant Gel in an Air Conditioning Room; *Asian J. Energy Environ.* Vol. 9, Issue 3 and 4, (2008), pp. 129-159.
- [37] **K.TOUAFEK, M.HADDADI, A.MALEK, W.BENDAIKHA-TOUAFEK.** Étude thermique d'un capteur PVT à air recouvert destiné au chauffage d'habitation; SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009.
- [38] **EBRAHIM M. ALI ALFEGI, KAMARUZZAMAN SOPIAN, MOHD YUSOF HJ OTHMAN AND BAHARUDIN BIN YATIM.** Mathematical Model of Double Pass Photovoltaic Thermal Air Collector with Fins; *American J. of Engineering and Applied Sciences* 2 (4): 703-709, 2009; ISSN 1941-7020.
- [39] **EBRAHIM M. ALI ALFEGI.** The Effect of Flow Rates on the Performance of Finned Single Pass, Double Duct Photovoltaic Thermal Solar Air Heaters; *European Journal of Scientific Research* ISSN 1450-216X Vol.25 No.2 (2009), pp.339-344.
- [40] **FUJISAWA T., TANI T.** Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 1997, vol. 47, n° 1-4, pp. 135-148.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [41] **FRAISSE G., MENEZO C., JOHANNES K.** Energy performance of water hybrid PV/T collectors applied to combisystems of Direct Solar Floor type. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, n° 11, pp. 1426-1438.
- [42] **SANDBERG M., MOSHFEGH B.** Buoyancy-induced air flow in photovoltaic facades. Effect of geometry of the air gap and location of solar cell modules. *Building and Environment*, 2002, vol. 37, n° 3, pp. 211-218.
- [43] **CHOW T. T.** Performance analysis of photovoltaic-thermal collector by explicit dynamic model. *Solar Energy*, 2003, vol. 75, pp. 143-152.
- [44] **BERGENE T., LOVVIK O. M.** Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. *Solar Energy*, 1995, vol. 55, n° 6, pp. 453-462.
- [45] **CHOW T.T., HE W., JI J., et al.** Performance evaluation of photovoltaic-thermosyphon system for subtropical climate application. *Solar Energy*, 2007, vol. 81, pp. 123-130.
- [46] **CHOW T.T., HE W., JI J.** Hybrid photovoltaic-thermosyphon water heating system for residential application. *Solar Energy*, vol. 80, n° 3, 2006, pp. 298-306.
- [47] **CHOW T.T., HE W., JI J.** An experimental study of façade-integrated photovoltaic/water-heating system. *Applied Thermal Engineering*, 2007b, vol. 27, n° 1, pp. 37-45.
- [48] **KALOGIROU S. A., TRIPANAGNOSTOPOULOS Y.** Industrial application of PV/T solar energy systems. *Applied Thermal Engineering*, 2007, vol. 27, n° 8-9, pp. 1259 - 1270.
- [49] **K. TOUAFEK, M. HADDADI, et al.** Simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride solaire photovoltaïque thermique ; *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°1 (2008) 153 – 165.
- [50] **SARTORI E.** Convection coefficient equations for forced air flow over flat surfaces. *Solar Energy*, 2006, vol. 80, n° 9, pp. 1063-1071.
- [51] **MACADAMS W. H. HEAT TRANSMISSION.** 3^{ème} Ed. New York, Etats-Unis: McGraw-Hill, 1954.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [52] **WATMUFF J. H., CHARTERS W. W. S., PROCTOR D.** Solar and wind induced external coefficients for solar collectors. *Comptes Internationales Revue d'Héliotechnique*, 1977, vol. 2. 56 p.
- [53] **LUNDE P. J.** *Solar Thermal Engineering*. New York, Etats-Unis: John Wiley and Sons, 1980, 17 p.
- [54] **DUFFIE J. A., BECKMAN W. A.** *Solar Engineering of Thermal Processes*. New York, Etats-Unis: Wiley-Interscience, 1980.
- [55] **A.Bejan and A.D.Krauss**, *Heat transfer handbook*, Wiley Publication, 2003.
- [56] **F.MIRANVILLE**, *Contribution à l'étude des parois complexes en physique du bâtiment*, thèse de doctorat, Université de la Réunion, 2002.
- [57] **DOUWE W.de Vries**, *Design of photovoltaic/thermal combi-panel*, Eindhoven: Eindhoven Technical University, 1998
- [58] **BENSELLAMA Elhadi**, *Modélisation d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique*, mémoire de fin d'étude, université de Blida, 2006-2007
- [59] http://fr.wikipedia.org/wiki/Wikip%C3%A9dia:Accueil_principal
- [60] **MĂNTESCU Gabriela et al.** the hybrid photovoltaic-thermal panel, optimal solution of using solar energy in buildings, **WEC Regional Energy Forum – FOREN 2008**, Neptun, 15-19 June 2008
- [61] **K.TOUAFEK**, 'Etude d'un Capteur Solaire Hybride Photovoltaïque Thermique', *Mémoire de Magister*, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2005.
-
-

ANNEXE

Expert PDF Evaluation

Annexe

Généralités sur le rayonnement solaire

1- Mouvement terrestre

On sait tous que la terre tourne autour du soleil et que sa trajectoire est elliptique, la terre met une année ou 365 jours pour faire une révolution autour du soleil et 1 jour ou 24 heures pour faire un tour sur elle-même autour d'un axe passant par le pôle Nord et le pôle Sud. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles est nommé l'Equateur.

L'énergie solaire atteignant une surface donnée dépend directement de l'orientation de celle-ci et de la position du soleil, pour récupérer un maximum d'énergie en provenance du soleil, il est nécessaire d'orienter au mieux le récepteur par rapport aux rayons lumineux, la connaissance de la position du soleil en fonction du temps est donc fondamentale.

2- Paramètres de position

Tout point de la sphère terrestre peut être repéré par des coordonnées appelées coordonnées terrestres horizontales, horaires et équatoriales.

➤ Coordonnées terrestres

On distingue:

- La latitude δ (positive dans l'hémisphère nord, négative dans l'hémisphère sud).
- La longitude L (positive à l'ouest, négative à l'est).

Le méridien origine, servant à la mesure de la longitude est celui de Greenwich. On peut trouver ces coordonnées dans un atlas géographique.

➤ Coordonnées horizontales

La position d'un astre dans l'espace peut être repérée par ses coordonnées horizontales définies sur la sphère céleste (**figure A**) et qui sont:

➤ Sa hauteur angulaire h qui est l'angle que fait la direction de l'astre avec le plan horizontal (c'est-à-dire tangent au sol).

➤ Son azimut a correspondant à l'angle que fait le plan du méridien local avec le plan vertical passant par l'astre. L'azimut est compté négativement vers l'est, positivement vers l'ouest.

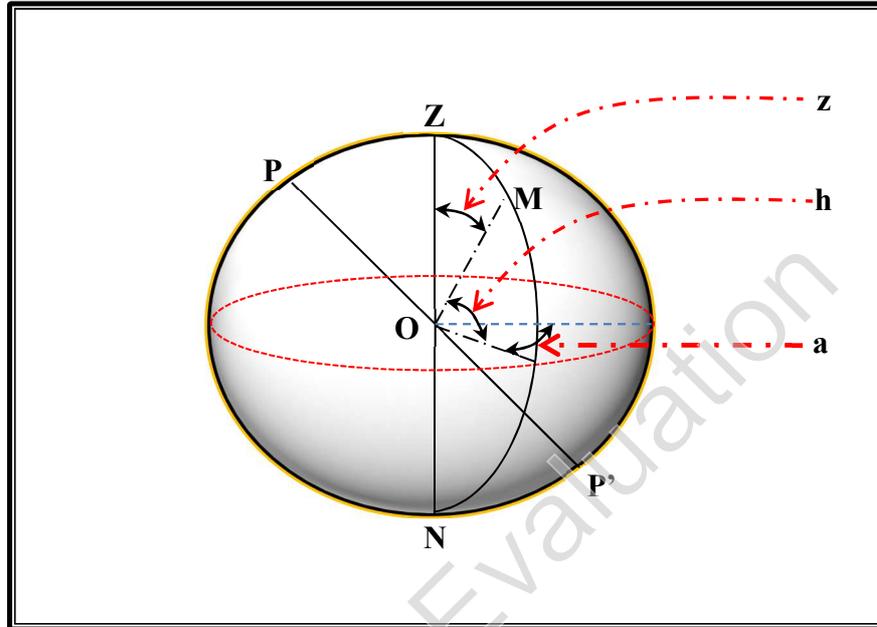


Figure A-Coordonnées horizontales (h , a)

3- Les coordonnées célestes :

3-1- Les coordonnées géographiques :

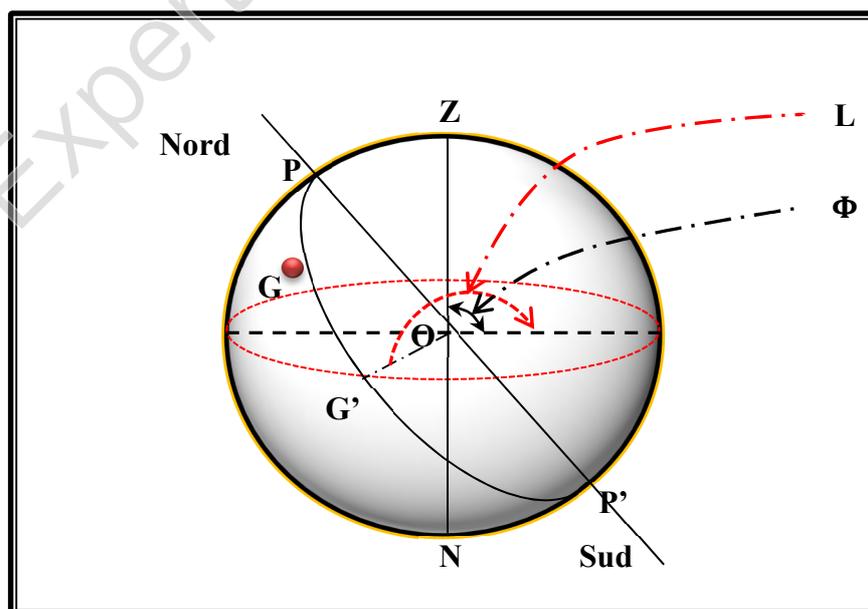


Figure B : Les coordonnées géographiques

➤ **La latitude (ϕ)**, permet de repérer la distance angulaire d'un point quelconque à l'équateur. Elle varie de 0° à 90° dans l'hémisphère nord et de 0° à -90° dans l'hémisphère sud.

➤ **la longitude (L)**, C'est l'éloignement par rapport au méridien de Greenwich, mesuré en degré.

➤ **l'altitude (Z)**, C'est l'altitude d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence théorique (le niveau de la mer =0), elle est exprimée en mètre.

3-2- Les coordonnées horaires :

➤ **la déclinaison (δ)**, C'est l'angle formé par la direction du soleil avec et le plan équatorial, elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation :

$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{360}{365}(n_j + 284)\right) \dots \dots \dots (A 1)$$

Ou :

δ : La déclinaison mesurée en degrés.

n_j : Le numéro du jour dans l'année.

➤ **l'angle horaire**, L'angle « ω » étant l'angle formé par le plan méridien passant par le centre du soleil et le plan vertical du lieu (méridien), il définit le vrai temps solaire **figure C**.

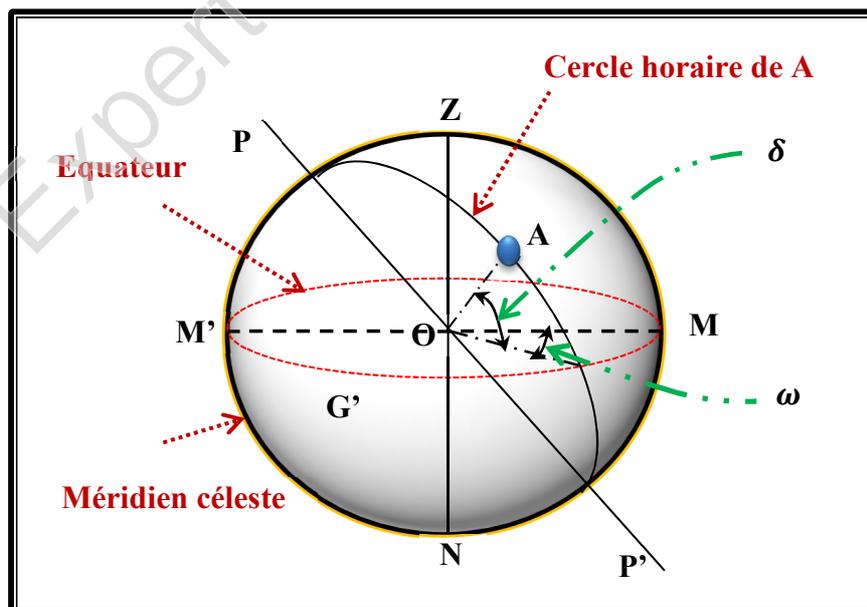


Figure C : Les coordonnées horaires

Le repérage du soleil se fait par l'intermédiaire de deux angles :

➤ **l'azimut (a)**, ou l'angle qui fait la projection de la direction sud du soleil avec la direction sud. Il est compté de 0° à 360° d'ouest en est, ou de 0° à 180° à partir du sud vers l'ouest.

➤ **la hauteur (h)**, ou l'angle qui fait la direction du soleil avec sa projection. Il est compté de 0° à 90° vers le zénith et de 0° à -90° vers le nadir.

La hauteur du soleil est déterminée par la formule suivante :

$$\sin(h) = \sin(\phi)\sin(\delta) + \cos(\phi)\cos(\omega)\cos(\delta) \dots \dots \dots (A 2)$$

4- les paramètres du temps

➤ **le temps solaire vrai (TSV) :**

Le temps solaire vrai, en un instant et un lieu donné, est l'angle horaire du soleil ω , il est donné sous la forme suivante :

$$TSV = \frac{\omega}{15} + 12 \dots \dots \dots (A 3)$$

ω : Est en degré.

Si $\omega = 0$, $TSV = 12^h .00$;

Si $\omega < 0$, la matinée;

Si $\omega > 0$, l'après-midi.

➤ **le temps solaire moyen (TSM) :**

Il est donné par la relation :

$$TSV - TSM = Et \dots \dots \dots (A 4)$$

Ou :

Et : Équation de temps (**min**), elle corrige le TSV par rapport au TSM .

Elle est donnée par la relation:

$$Et = 9.87 \sin(2.n) - 7.53 \cos(n) - 1.5 \sin(n) \dots \dots \dots (A 5)$$

Avec :

$$n = \left(\frac{360}{365} (n_j - 81) \right) \dots \dots \dots (A 6)$$

n_j : Le numéro du jour dans l'année.

➤ **le temps universel :**

C'est le temps moyen du méridien de Greenwich.

$$TU = TSM - \left(\frac{L}{15} \right) \dots \dots \dots (A 7)$$

Ou: L est la longitude.

$L > 0$, pour les villes situées à l'est de Greenwich,

$L < 0$, pour les villes situées à l'ouest de Greenwich,

$TU = TSM$, pour le méridien de Greenwich.

➤ **le temps légal :**

C'est une heure liée au « TL » par une différence fixe exprimé en un nombre entier d'heures qui dépend de la longitude, et des coutumes de chaque pays.

$$TL = TU + \Delta H \dots \dots \dots (A 8)$$

ΔH : Le décalage horaire entre le méridien de Greenwich et l'état considéré.

$\Delta H = 1$ heure pour l'Algérie.

5- Rayonnement solaire :

Les apportes solaire sont constitués par :

- Le rayonnement direct.
- Le rayonnement diffus.

5-1- Calcul du rayonnement direct reçu par la vitre :

La relation calculant le rayonnement direct est G_d Rayonnement solaire direct

$$G_D = I_c A \exp\left(\frac{-B}{\sin(h)}\right) \cos(i) \dots \dots \dots (A 9)$$

$$I_c = I_o (1 + 0.0034 \cos(30 (m - 1) + n)) \dots \dots \dots (A 10)$$

m : Le numéro de moi dans l'année.

n : Le numéro de jour dans le mois.

A et B étant les coefficients de trouble du ciel dont les valeurs sont confinés dans tableau ci-dessous :

	Ciel pur	Condition normale	Zone industrielle
A	0.87	0.88	0.91
B	0.17	0.26	0.43

Les valeurs des coefficients de trouble atmosphérique

5-2- Calcul du rayonnement diffus reçu par la vitre :

Le flux diffus par la vitre provient du flux diffus émis par la voûte céleste (φ_1) et de celui qui est émis par le sol (φ_2)

$$G_d = \varphi_1 + \varphi_2 \dots \dots \dots (A 11)$$

G_d : L'intensité du rayonnement solaire diffuse

$$\varphi_1 = \varphi_0 \frac{(1 + \cos(\beta))}{2} \dots \dots \dots (A 12)$$

$$\varphi_2 = \rho (I_o \sin(h) + \varphi_0) \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \dots \dots \dots (A 13)$$

$$\varphi_0 = I_c \sin(h) \left[0.271 - 0.2939 \exp\left(\frac{-B}{\sin(h)}\right) \right] \dots \dots \dots (A 14)$$

ρ : Albédo du sol.

Sur face	Albédo
Mer chaud	0.05
Forêt tropical	0.12
Mer froid	0.15
Pierre, ciment, sol cultive	0.15 à 0.25
Herbe vert	0.25
Sable clair	0.37
Neige tassée	0.6
Vénus	0.64
Neige fraiche	0.85
Nuage	0.8

Valeurs de l'albédo du sol « ρ »

ملخص :

خلال عملية التحويل الكهروضوئي للوح الشمسي، تنتج كمية معتبرة من الحرارة والتي تتسبب في ارتفاع درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية وبالتالي تحد من فعاليتها. هذه الظاهرة ناتجة عن كمية الأشعاع غير الممتصة من طرف الخلايا الكهروضوئية مما يجعلها أكثر حرارة. تعتبر هذه الحرارة العائق أمام فعالية الخلية الكهروضوئية لذا فالتخفيف من المبعثرات تبذل من أجل صرف هذه الأخيرة. يمكن تخفيض حرارة الألواح الكهروضوئية بامتصاص الحرارة عن طريق إنجاز نموذج للوح ثنائي الاستعمال بحيث يستطيع أن ينتج طاقة كهربائية وحرارية في نفس الوقت. بهذه الوسيلة يمكن خفض الحرارة وبالتالي رفع المردود الكهروإلحائي للألواح. المصدف من عملنا هذا هو دراسة نظرية وإنجاز نموذج للوح ثنائي الاستعمال وتحديد درجة الحرارة عند كل طبقة ثم دراسة فعاليتها الحرارية وفي الأخير إجراء مقارنة بين مزايا هذا النموذج مع مختلف الأشكال الأخرى، إن النتائج التي تحصلنا عليها تدل على أن هذا اللوح يمكن أن يكون البديل بالنسبة للألواح الكهروضوئية والحرارية المستعملة عادة بصفة مستقلة.

الكلمات مفتاحية: الألواح الشمسية، الخلايا الكهروضوئية، الحرارة، لوح ثنائي الاستعمال، نموذج المردود.

Résumé :

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

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

L'objectif de ce travail est d'étudier théoriquement, et de modéliser le capteur hybride à travers la détermination des niveaux des températures de ses différentes couches et d'étudier son rendement thermique et enfin comparer ses performances avec d'autres configurations.

Mots clés: Capteur solaire, Photovoltaïque, Thermique, hybride, Rendement thermique.

Abstract:

During the photovoltaic conversion of the solar collector a heat is generated what will increase the temperature of the photovoltaic cell and will cause a fall of its efficiency. This phenomenon is due to the part of the solar radiation not absorptive by the cells and which will cause its heating.

This heating was regarded as harmful for the output of the photovoltaic solar collectors. Several efforts were performed to evacuate this heat. A nother way to exploit this phenomenon is by the combination of the photovoltaic system with a thermal one to form the hybrid collector (PVT) which will generate at the same time electricity and heat.

The objective of this work is to study theoretically and to model the hybrid collector through the determination of the levels of the temperatures of its various layers and to study its thermal efficiency, and finally to compare its performances with other configurations.

Key words: Solar collector, Photovoltaic, Thermal, hybrid, Thermal efficiency.