



Département Electronique

Mémoire de Magister

Option : Electricité Solaire

Présenté par : TOUAFEK Khaled

Thème

Etude d'un capteur solaire hybride photovoltaïque thermique

Soutenu publiquement le : 02 -10 -2005

Membres du Jury

M ZERGUERRAS Ahmed, Pr	Président
M HADDADI Mourad, Pr	Rapporteur
M MALEK Ali, MR (CDER)	Rapporteur
M DJEGHLAL Mohamed Elamine, MC	Examineur
M LARBES Chérif, MC	Examineur
M BELHAMEL Maiouf, DR (CDER)	Examineur

2005

Ecole Nationale Polytechnique 10, Avenue Hassen Badi, El-Harrach,

ملخص :

كمية معتبرة من الأشعة الشمسية المستقبلية من الخلايا الكهروضوئية لا يتم تحويلها الي كهرباء وتسبب ارتفاع درجة حرارتها وبالتالي تحد من فعاليتها. يمكن تخفيض حرارة الألواح الكهروضوئية بامتصاص الحرارة عن طريق سيلان طبيعي أو غير طبيعي لسائل قابل لحمل الحرارة. بهذه الوسيلة يمكن خفض الحرارة وبالتالي رفع المردود الكهربائي للألواح. الهدف من عملنا هذا هو دراسة تطبيقية و إنجاز نموذج للوح ثنائي الاستعمال بحيث يستطيع أن ينتج طاقة كهربائية وحرارية في نفس الوقت. إن النتائج التي تحصلنا عليها تدل على أن هذا اللوح يمكن أن يكون البديل بالنسبة للألواح الكهروضوئية و الحرارية المستعملة عادة بصفة مستقلة.

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

Résumé :

Une grande partie du rayonnement solaire absorbée 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 panneaux photovoltaïques peut être abaissée par extraction de la chaleur à l'aide d'une circulation naturelle ou forcée adéquate d'un fluide. La chaleur extraite pourrait alors être utilisée pour chauffer de l'eau ou transformée en une autre énergie. On augmenterait ainsi le rendement électrique du capteur et exploiter l'énergie thermique recueillie. L'objectif de notre travail a été d'étudier expérimentalement et de mettre en œuvre le prototype d'un capteur hybride pour évaluer ses performances électriques et thermiques. Les résultats obtenus permettent de penser que ce type de capteur constitue une bonne alternative aux capteurs photovoltaïques et aux capteurs thermiques classiques séparément installés.

Mots clés : Capteur solaire, Photovoltaïque, Thermique, hybride, prototype, Rendement

Abstract:

Most of the solar radiation absorbed by the photovoltaic cells is not converted in electricity, causes an increase in their temperature, and reduced consequently their electric efficiency. The temperature of the photovoltaic panels can be lowered by extraction of the heat by means of an adequate natural or forced circulation of a fluid. The extracted heat could be then used to warm some water or transformed into another energy. One could thus increase the electric output of the sensor and exploit thermal energy collected. The objective of our work was to study experimentally and implement the prototype of a hybrid sensor to estimate his electric and thermic performances. The obtained results allow to think that this type of sensor constitutes a good alternative to the photovoltaic sensors and to the classic thermal sensors separately installed.

Keywords: Solar sensor, Photovoltaic, Thermal, hybrid sensor, prototype, efficiency

Remerciements

J'aimerais remercier et exprimer toute ma gratitude et reconnaissance à mes encadreurs, Pr Mourad HADDADI chef de Laboratoire d'Electricité Solaire à l'Ecole National Polytechnique et Dr Ali MALEK Maître de recherches et chef de Laboratoire d'Electricité Photovoltaïque au Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour avoir proposer et diriger cette thèse et pour leur support, conseil, et motivation durant tout le projet.

Ce travail a été réalisé à l'Unité de Recherches Appliquée en Énergies Renouvelables de Ghardaïa, je tiens à remercier son Directeur Monsieur Lazhar SERIR Chargé de recherches pour toute son aide, sa disponibilité et le matériel qu'il a mis à ma disposition, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

Je remercie Pr A. ZERGUERRAS, Enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

Mes remerciements vont également au Dr M. BELHAMEL Directeur de recherches et Directeur du Centre de Développement des Energies Renouvelables pour toute l'aide qui m'a apporter et pour avoir accepter d'examiner ce travail.

Je remercie Dr C. LARBES, Maître de conférences et Dr M. L. DJEGHLAL, Maître de conférences à l'ENP, pour avoir accepté d'examiner ce travail et faire partie du jury.

Je remercie 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	01
Chapitre 1 Les capteurs photovoltaïques	03
1.1 Introduction	03
1.2 Les capteurs photovoltaïques	03
1.3 La cellule photovoltaïque	04
1.4 Les composantes du rayonnement solaire	07
1.5 Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule photovoltaïque	09
1.6 Rendement du capteur photovoltaïque	11
1.7 Zone utile du spectre solaire et conversion photovoltaïque	12
1.8 Influence de la température et de l'éclairement	13
1.9 Modèle de la température de la cellule photovoltaïque	15
1.10 Orientation des capteurs photovoltaïques	16
1.11 Systèmes photovoltaïques	16
1.12 Systèmes photovoltaïques indépendants	16
1.13 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau	20
1.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque	21
1.15 Secteurs d'applications	22
Chapitre 2 Les capteurs thermiques	23
2.1 Introduction	23
2.2 Notions sur le transfert thermique	23
2.3 Les différents types des capteurs thermiques	25
2.4 Les principaux éléments constitutifs des capteurs thermiques	26
2.5 Le chauffe-eau solaire	29
2.6 Les transferts d'énergie dans le chauffe-eau solaire	30

2.7	Avantages et inconvénients des capteurs thermiques.....	31
2.8	Principales applications de l'énergie solaire thermique	32
2.9	Performances et bilan énergétique du capteur thermique.....	33
2.10	Distribution de la température dans le capteur thermique.....	33
2.11	Facteur d'extraction de la chaleur du capteur.....	35
2.12	Standard de tests sur les capteurs thermiques.....	36
Chapitre 3	Etude théorique des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques.....	38
3.1	Introduction.....	38
3.2	Historique et état de l'art.....	38
3.3	Performances électriques des capteurs hybrides.....	41
3.4	Modèle thermique des capteurs photovoltaïques.....	42
3.5	Modèle thermique du capteur hybride photovoltaïque thermique.	47
3.6	Comparaison entre les performances du capteur hybride et le capteur thermique plan.....	55
3.7	Performances thermiques des capteurs hybrides.....	56
Chapitre 4	Simulation numérique.....	58
4.1	Introduction.....	58
4.2	Méthodes de résolution	60
4.3	Résolution du problème sous FEMLAB.....	60
4.4	Résultats obtenus.....	53
Chapitre 5	Etude expérimentale.....	69
5.1	Introduction.....	69
5.2	Description du banc d'essai	69
5.3	Relevé de la caractéristique I (V) des capteurs.....	72
5.4	Paramètres électriques du capteur.....	73
5.5	Dispositif expérimental.....	75
5.6	Performances électriques et thermiques du capteur isolé thermiquement, sans échangeur et sans vitre.....	78
5.7	Performances électriques et thermiques du capteur isolé thermiquement, sans échangeur et avec vitre supplémentaire....	85
5.8	Performances thermiques et électriques du capteur hybride non recouvert.....	91

5.9	Performances thermiques et électriques du capteur hybride recouvert.....	
Chapitre 6	Résultats et discussions.....	102
6.1	Introduction.....	102
6.2	Performances électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement et sans vitre.....	102
6.3	Distribution de la température dans le capteur photovoltaïque isolé.....	103
6.4	Comparaison des températures des deux capteurs.....	104
6.5	Effet de l'ajout d'une vitre au capteur isolé thermiquement.....	105
6.6	Résultats de l'expérimentation sur le capteur avec échangeur de chaleur.....	107
6.7	Effet de l'ajout d'une vitre supplémentaire au capteur hybride...	110
	Conclusion générale.....	114
	Bibliographie	

Liste des symboles

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

A_c	: Air de captation du capteur solaire
AC	: Courant alternative
A_{glass}	: Surface du verre (m^2)
A_{pt}	: Surface de contact (entre la plaque et le tube)
A_{yf}	: Surface intérieur du tube
C	: Capacité de la batterie
C_p	: Chaleur spécifique
C_{p-capt}	: Chaleur spécifique de la plaque absorbante du capteur hybride
C_{p-f}	: Chaleur spécifique du fluide
CC	: Courant continu
d	: Eclairage direct
di	: Eclairage diffus
Di	: Diamètre intérieur du tube (m)
E	: Champ électrique
E_g	: Energie de gap
FF	: Facteur de remplissage
FR	: Facteur d'extraction de la chaleur du collecteur
G	: Eclairage global
G_T	: Eclairage total
h_c	: Coefficient d'échange par convection.
$h_{c,libre}$: Coefficient de convection naturelle
I_{ph}	: Courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses
I_{sc}	: Courant de court circuit
I_{pmax}	: Courant maximum
K	: Conductivité thermique

L : Longueur du tube (m)
 \dot{m} : Débit massique
 \dot{m}_f : Débit massique du fluide
 m_{capt} : Masse de la plaque absorbante du capteur
 m_f : Masse du fluide
 Nu : Nombre de Nusselt
 Pr : Nombre de Prandtl
 PVT : Photovoltaïque thermique
 P_{max} : Puissance maximum
 Q_u : Energie thermique utile
 Re : Nombre de Reynolds
 R_s : Résistance série
 R_p : Résistance parallèle
 T : Température
 T_{pm} : Température moyenne de l'absorbeur (mean absorber plat)
 T_a : Température ambiante
 U_{pt} : Coefficient de transfert de chaleur entre la plaque et le tube contenant le fluide
 U_L : Coefficient de transfert de chaleur
 U_{oc} : Tension de circuit ouvert
 $U_{p\text{max}}$: Tension maximum
 $\tau\alpha$: Transmittivité-absorptivité du rayonnement par le capteur
 T_{out} : Température de sortie du fluide
 T_{in} : Température d'entrée du fluide
 T_f : Température du fluide (K)
 T_{abs} : Température de la plaque absorbante limité par l'isolant (K)
 T_{cell} : Température de la cellule solaire
 T_{av} : Température de la face avant du capteur
 T_{ar} : Température de la face arrière du capteur
 T_{cellpvt} : Température de la cellule du capteur hybride
 T_{cellpv} : Température de la cellule du capteur photovoltaïque
 T_{vitre} : Température de la vitre supplémentaire
 \dot{Q}_{th} : Flux d'énergie thermique généré par le capteur hybride

- τ_{glass} : Transmittivité du verre
- μ_i : Viscosité de l'eau
- σ : Constante de Stefan-Boltzmann
- α_{cell} : Coefficient d'absorptivité de la cellule solaire
- α : Facteur d'idéalité de la cellule photovoltaïque
- ζ : Facteur d'émissivité du corps
- Φ : Flux total incident sur le plan du capteur
- η : Rendement instantané du capteur

Liste des figures

Figure 1.1 : Conduction dans les matériaux semi-conducteurs.....	04
Figure 1.2 : L'opération du dopage.....	05
Figure 1.3 : Le spectre solaire.....	07
Figure 1.4 : Calcul de l'Air Mass.....	08
Figure 1.5 : Circuit équivalent d'un capteur solaire photovoltaïque.....	09
Figure 1.6 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donné.....	11
Figure 1.7 : Spectre du rayonnement incident sur le capteur photovoltaïque.....	12
Figure 1.8 : Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements G avec $T = 30^{\circ}\text{C}$	13
Figure 1.9 : Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures T avec $G = 1000\text{W}/\text{m}^2$	14
Figure 1.10 : Systèmes photovoltaïques indépendants.....	17
Figure 1.11 : Système de régulation de charge.....	18
Figure 1.12 : Système photovoltaïque avec batteries.....	19
Figure 1.13 : Système connecté à un réseau local.....	19
Figure 1.14 : Principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque raccordée au réseau électrique.....	20
Figure 2.1 : Exemple d'un capteur thermique.....	23
Figure 2.2 : Vue en coupe des éléments d'un capteur plat vitré.....	26
Figure 2.3 : Schéma synoptique du capteur thermique.....	29
Figure 2.4 : Vue en coupe du capteur thermique à une vitre.....	34
Figure 2.5 : Distribution de la température dans le capteur thermique.....	34
Figure 2.6 : Rendement instantané pour capteur plan tiré de la littérature....	37
Figure 3.1 : Mode de transfert d'énergies thermiques au niveau du capteur photovoltaïque.....	43

Figure 3.2 :	Vue en coupe du capteur hybride.....	47
Figure 3.3 :	Production de l'énergie thermique par le capteur hybride.....	48
Figure 3.4 :	Schéma électrique équivalent du capteur hybride.....	50
Figure 4.1 :	les quatre configurations pour la simulation.....	59
Figure 4.2 :	Description géométrique dans le logiciel FEMLAB.....	61
Figure 4.3 :	Le maillage.....	62
Figure 4.4 :	Représentation des conditions aux limites Dirichlet ou Neumann.....	63
Figure 4.5 :	Distribution de la température dans le capteur PV isolé (droite) et libre (gauche).....	64
Figure 4.6 :	Zoom pour le capteur PV isolé (droite) et libre (gauche).....	65
Figure 4.7 :	Modèle thermique PV+ verre.....	66
Figure 4.8 :	Distribution de la température dans le capteur hybride.....	67
Figure 4.9 :	Cas de circulation de l'eau +vitre.....	68
Figure 5.1 :	Vue de dessus des deux capteurs.....	70
Figure 5.2 :	Photo des deux capteurs photovoltaïques utilisés.....	71
Figure 5.3 :	Charge électronique permettant de caractériser les capteurs photovoltaïques.....	72
Figure 5.4 :	Interface graphique de la charge électronique.....	73
Figure 5.5 :	Caractéristique du capteur hybride avant le début des essais.....	73
Figure 5.6 :	Dimensions du capteur photovoltaïque en mm.....	74
Figure 5.7 :	Capteur solaire non recouvert.....	75
Figure 5.8 :	Capteur solaire recouvert d'une vitre.....	76
Figure 5.9 :	Capteur solaire non recouvert avec échangeur de chaleur.....	77
Figure 5.10 :	Capteur solaire recouvert avec échangeur de chaleur.....	77
Figure 5.11 :	Maillage de température pour le capteur sans vitre et sans échangeur.....	78
Figure 5.12 :	Photo montrant le maillage de la température pour le capteur hybride sans vitre et sans échangeur.....	79
Figure 5.13 :	Caractéristique du capteur sans vitre pour la première configuration.....	83
Figure 5.14 :	Caractéristiques électriques du capteur libre pour la première configuration.....	83

Figure 5.15 :	Capteur hybride avec vitre et sans échangeur.....	85
Figure 5.16 :	Caractéristique I (V) du capteur isolé thermiquement et avec vitre.....	89
Figure 5.17 :	Caractéristique I (V) du capteur laissé libre pour la deuxième configuration.....	89
Figure 5.18 :	Plaque en cuivre.....	91
Figure 5.19 :	Ensemble de tube soudé à la plaque en cuivre.....	92
Figure 5.20 :	Caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert.....	95
Figure 5.21 :	Caractéristique I (V) du capteur laissé libre pour la troisième configuration.....	95
Figure 5.22 :	Photo de capteur hybride et du capteur témoin.....	97
Figure 5.23 :	Caractéristique I (V) du capteur hybride recouvert.....	100
Figure 5.24 :	Caractéristique I (V) du capteur photovoltaïque témoin.....	100
Figure 6.1 :	Comparaison des caractéristiques I (V) des deux graphes pour la première configuration.....	102
Figure 6.2 :	Températures sur les trois faces du capteur isolé.....	103
Figure 6.3 :	Comparaison des températures des deux capteurs.....	104
Figure 6.4 :	Effet de l'ajout d'une vitre au dessus du capteur isolé thermiquement.....	105
Figure 6.5 :	Comparaison des températures de cellules des deux capteurs.....	106
Figure 6.6 :	Caractéristique I (V) des deux capteurs.....	107
Figure 6.7 :	Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert.....	108
Figure 6.8 :	Rendement thermique du capteur hybride non recouvert.....	109
Figure 6.9 :	Caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert et du capteur libre.....	110
Figure 6.10 :	Distribution de températures dans le capteur hybride recouvert...	111
Figure 6.11 :	Rendement thermique du capteur hybride recouvert.....	112
Figure 6.12 :	Caractéristique I (V) du capteur hybride recouvert et du capteur libre.....	113

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux.....	27
Tableau 5.1 : Paramètres des capteurs photovoltaïques utilisés avant le début des essais.....	74
Tableau 5.2 : Distribution de la température dans le capteur isolé et non vitré...	80
Tableau 5.3 : Comparaison entre les températures de cellules du capteur isolé sans vitre et sans échangeur et du capteur libre.....	82
Tableau 5.4 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement.....	84
Tableau 5.5 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque laissé sans isolation.....	84
Tableau 5.6 : Distribution de températures sur les faces du capteur isolé avec vitre et sans échangeur.....	85
Tableau 5.7 : Comparaison entre les températures de cellules du capteur isolé avec vitre et sans échangeur et du capteur libre.....	88
Tableau 5.8 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement et avec vitre	90
Tableau 5.9 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque laissé sans isolation pour la deuxième configuration.....	90
Tableau 5.10 : Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert.....	92
Tableau 5.11 : Paramètres électriques du capteur hybride non recouvert.....	96
Tableau 5.12 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque témoin.....	96
Tableau 5.13 : Distribution de la température dans le capteur hybride recouvert.....	98
Tableau 5.14 : Paramètres électriques du capteur hybride recouvert.....	100
Tableau 5.15 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque témoin pour la quatrième configuration.....	101

Introduction générale

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

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

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

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

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

Cependant, ce rendement dépend en grande partie de la température de fonctionnement. Typiquement la perte peut atteindre 15-20% si aucun refroidissement du capteur n'est prévu. L'objectif de notre étude est de minimiser la température de fonctionnement du capteur photovoltaïque en arrachant le maximum de chaleur et ensuite l'utiliser pour chauffer de l'eau par exemple.

Le but est donc double : augmenter le rendement électrique du capteur et exploiter deux types d'énergies : électrique et thermique.

L'objectif de notre travail est la mise en œuvre d'un prototype de capteur hybride et de l'étudier expérimentalement pour évaluer ses performances électriques et thermiques.

Nous avons commencé notre travail par une étude théorique générale sur les capteurs hybrides ensuite nous avons entamé l'étude expérimentale à travers la réalisation d'un prototype de capteur hybride photovoltaïque thermique.

Ce mémoire est divisé en six chapitres. Nous avons étudié dans le premier chapitre le principe de fonctionnement des capteurs photovoltaïques, leur modélisation, leur avantages ainsi que leur contraintes et limites d'utilisation.

Nous avons évoqué l'essentiel des capteurs thermiques classique au second chapitre, en expliquant leur principe de fonctionnement, les différents cas ainsi que leur avantages et inconvénients.

Le chapitre trois est consacré à l'étude théorique des capteurs hybrides. En effet nous avons en premier lieu présenté le résumé de notre recherche bibliographique sur les capteurs hybrides puis nous avons modélisé le comportement thermique des capteurs photovoltaïques et enfin nous avons établi le modèle énergétique global du capteur hybride photovoltaïque thermique.

La simulation numérique du comportement thermique du capteur hybride est l'objet du quatrième chapitre. Nous avons alors établi la cartographie de la température au niveau du capteur hybride pour chaque configuration étudiée.

Nous avons résumé les différentes étapes de notre étude expérimentale au cinquième chapitre à travers la description succincte du dispositif expérimental et des différentes configurations étudiées.

Enfin nous avons présenté les résultats obtenus dans le sixième chapitre. Puis une conclusion générale et des perspectives de recherches terminent ce mémoire.

Chapitre 1

Les capteurs photovoltaïques

1.1 Introduction

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

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

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

Dans ce chapitre nous allons étudier le principe de fonctionnement des capteurs photovoltaïques, leur modélisation, leurs avantages ainsi que les contraintes et limites de leur utilisation.

1.2 Les capteurs photovoltaïques

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien

Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité.

Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque, a été découverte par A. Becquerel en 1839.

1.3 La cellule photovoltaïque

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

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

Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction). C'est l'énergie du " band gap ", E_g , en électron-volt (eV). Cette valeur seuil est propre à chaque matériau semi-conducteur et va de 1,0 à 1,8 eV pour les applications photovoltaïques. Elle est de 1,1 eV pour le silicium cristallin, et de 1,7 eV pour le silicium amorphe [1]. La figure 1.1 montre le phénomène de conduction dans les matériaux semi-conducteurs [2].

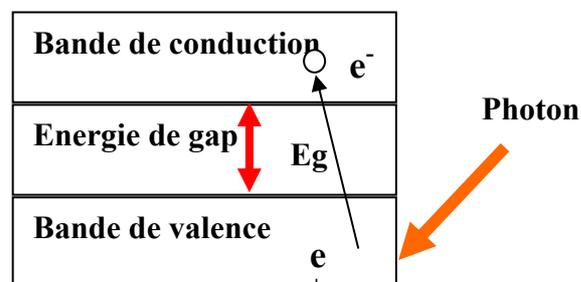


Figure 1.1 : Conduction dans les matériaux semi-conducteurs

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

La méthode utilisée pour créer ce champ est celle du dopage par des impuretés. Deux méthodes de dopage sont possibles :

- ▀ Le dopage de type n, qui consiste à introduire dans la structure cristalline semi-conductrice des atomes étrangers qui ont la propriété de donner chacun un électron excédentaire, libre de se mouvoir dans le cristal.
- ▀ Le dopage de type p utilise des atomes dont l'insertion dans le réseau cristallin donnera un trou excédentaire.

Lorsque l'on effectue deux dopages différents (type n et type p) de part et d'autre de la cellule, il en résulte, après recombinaison des charges libres (électrons et trous), un champ électrique constant créé par la présence d'ions fixes positifs et négatifs. Les charges électriques générées par l'absorption du rayonnement pourront contribuer au courant de la cellule photovoltaïque. Le phénomène de dopage est schématisé par la figure 1.2.

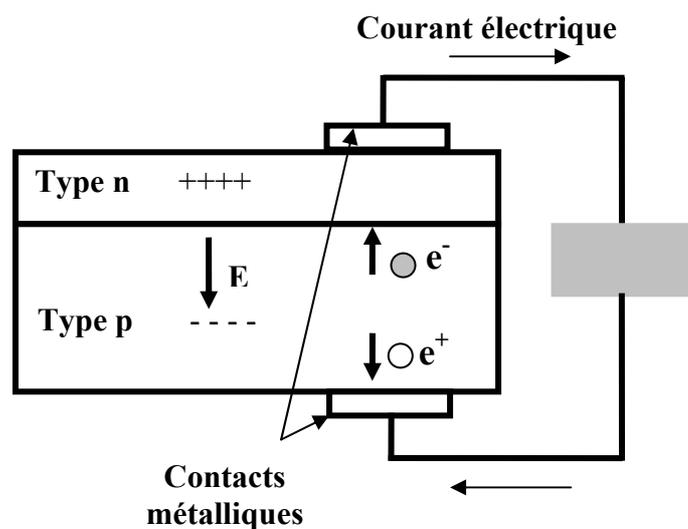


Figure 1.2 : Effet photovoltaïque dans une jonction PN

Il existe trois principaux types de cellules :

► Les cellules au silicium monocristallin

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



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

► Les cellules au silicium polycristallin

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



Les cellules amorphes

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

1.4 Les composantes du rayonnement solaire

Il y a principalement quatre types de rayonnement : Le rayonnement direct (d) émis uniquement par le soleil, le rayonnement diffusé par les molécules atmosphériques (di), le rayonnement global (G) qui est l'ensemble des rayonnements reçus du ciel et enfin le rayonnement total (G_T) qui est la somme de ce rayonnement global, de son albédo et de l'émission de la surface terrestre plus le rayonnement réfléchi ou émis par la surface terrestre [3].

Le rayonnement incident sur le capteur considéré est le rayonnement global.

Le spectre du rayonnement solaire est montré sur la figure 1.3.

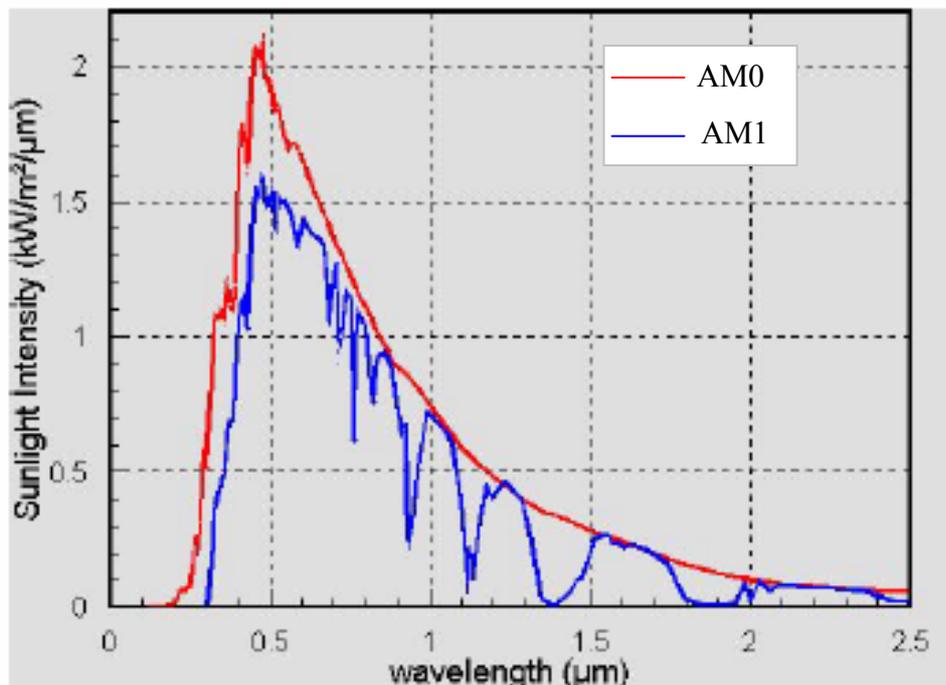


Figure 1.3 : Le spectre solaire [4]

Les performances des capteurs PV devraient être mesurée sous un ensemble de conditions dites standards. Essentiellement, ceux-ci spécifient que la température de la cellule ou capteur devrait être de 25 °C et que le rayonnement solaire incident sur le capteur doit avoir une densité totale de 1000 watts par mètre carré, avec une distribution spectrale, connue comme Air Masse 1.5.

Le concept "d'Air Mass" (en abrégé AM) exprime la façon dont la distribution du spectre d'énergie du rayonnement solaire est affectée par la distance dont les rayons solaires doivent parcourir l'atmosphère avant d'arriver au plan du capteur photovoltaïque.

Dans l'espace, les radiations solaires ne sont pas affectées par l'atmosphère et ont une densité approximative de 1365 watts par mètre carré. Le spectre de radiation solaire mesuré dans l'espace est décrit comme la Masse de l'Air 0 (AM 0).

Nous avons montré sur La figure 1.4 comment on détermine le coefficient d'Air Mass.

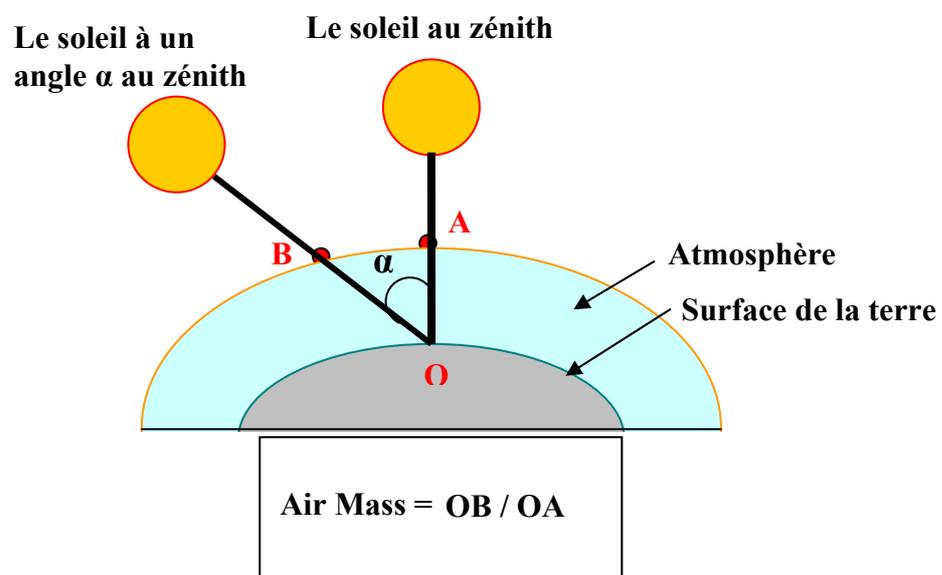


Figure 1.4 : Calcul de l'Air Mass

Le coefficient Air Mass peut être calculé par l'équation suivante :

$$\text{Air Mass} = \frac{1}{\cos \alpha}$$

1.5 Circuit équivalent et modèle mathématique de la cellule photovoltaïque

Nous avons choisi le modèle à cinq paramètres [5] fréquemment utilisé afin de décrire ses paramètres électriques. En effet ce modèle prend en compte les différentes résistances internes, (Figure 1.5) [6] [7].

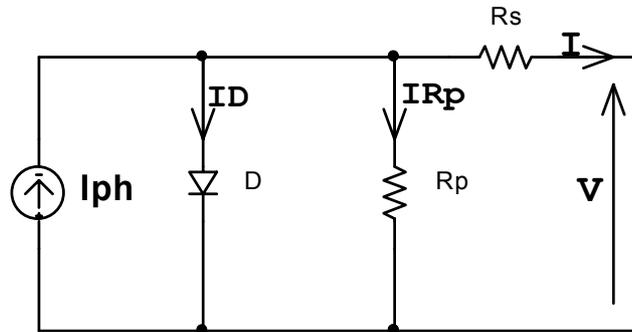


Figure 1.5 : Circuit équivalent d'un capteur solaire photovoltaïque

R_p est la résistance shunt qui modélise les fuites par l'effet de bord autour du capteur photovoltaïque ; R_s prend en considération les contacts ohmiques entre le métal et le semi-conducteur ainsi que la résistance intrinsèque du silicium ; I_{ph} est le courant photovoltaïque engendré par les radiations lumineuses, et la diode D représente la jonction PN de la cellule. Les cinq paramètres de ce modèle sont donc : I_{ph} , I_0 , R_s , R_p et α .

Le courant qui passe dans la résistance R_p est donné par :

$$I_{Rp} = \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1-1)$$

L'expression de la caractéristique $I(V)$ est:

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{e(V + IR_s)}{\alpha KT}\right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_p} \quad (1-2)$$

Avec R_s la résistance série de la cellule (Ω), R_p la résistance parallèle (Ω), α facteur d'idéalité, T la température de la cellule (K), e la charge élémentaire d'électron ($1.6021 \cdot 10^{-19}$ C), K la constante de Boltzmann ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ JK⁻¹).

La caractéristique $I=f(V)$ ainsi que la courbe $P=f(V)$ (figure 1.6) permet d'obtenir les paramètres fondamentaux suivants :

- ▶ Courant de court-circuit I_{sc} , qui est le courant maximum généré par la cellule ; il est produit lorsqu'elle est soumise à un court circuit $V = 0$, puisque $R_s \ll R_p$ on peut mettre $I_{sc} \approx I_{ph}$;
- ▶ Tension à circuit ouvert V_{oc} ; c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré $I = 0$. Elle reflète la tension de seuil de la jonction PN. En négligeant le courant qui passe dans la résistance parallèle R_p , V_{oc} est exprimée comme suit :

$$V_{oc} = \frac{\alpha KT}{e} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) = V_t \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_0}\right) \quad (1-3)$$

Où $V_t = \frac{\alpha KT}{e}$ connue sous le nom de tension thermique et I_0 le courant de saturation de la diode D .

- ▶ Point de puissance maximale, c'est le point de fonctionnement (V_{mp} , I_{mp}) où la cellule solaire génère sa puissance maximale :

$$P_{max} = V_{mp} \cdot I_{mp}.$$

- ▶ Facteur de remplissage FF (*Fill Factor* en anglais) ; il correspond au rapport de la puissance maximale sur le produit de V_{oc} et I_{sc} , $FF = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$ et reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale ($FF = 1$).

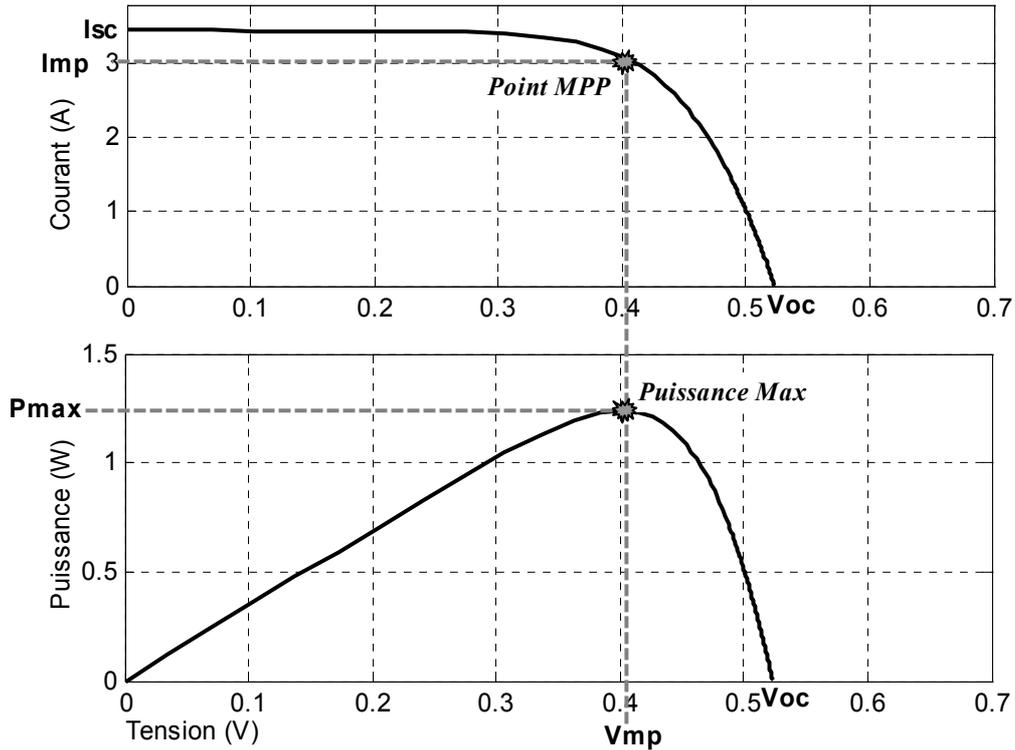


Figure 1.6 : Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés

1.6 Rendement de la cellule photovoltaïque

Le rendement de la cellule photovoltaïque est le rapport de conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est égal au rapport de la puissance maximale de sortie sur la puissance des radiations lumineuses.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_{mp} \cdot I_{mp}}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{P_{in}} \quad (1-4)$$

Où P_{in} est la puissance d'entrée qui est l'éclairement incident sur le capteur par unité de surface.

1.7 Zone utile du spectre solaire et conversion photovoltaïque

Les photons du spectre solaire ne vont pas être tous utilisables pour la génération de paires électrons-trous. La figure 1.7 présente la division en trois zones du spectre solaire (I, II, III)

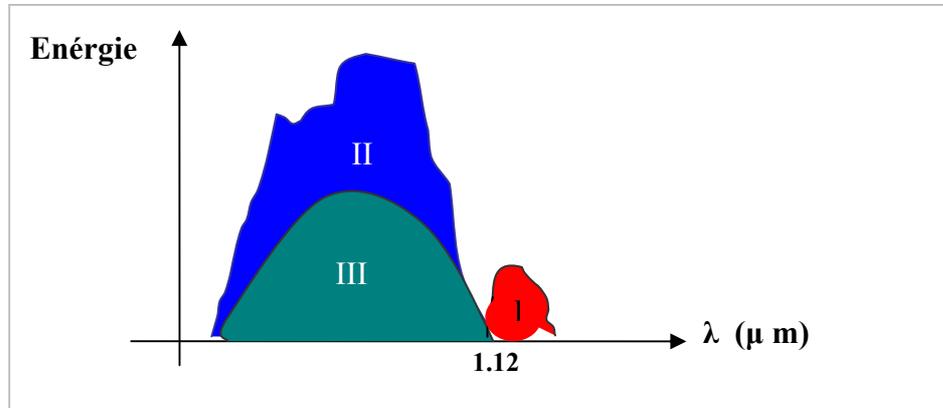


Figure 1.7 : Spectre du rayonnement incident sur le capteur photovoltaïque

Si l'énergie du photon est inférieure à l'énergie du gap, le photon n'est pas absorbé par le semi conducteur.

Si l'énergie du photon est supérieure à celle du gap, le photon est absorbé mais une partie de cette énergie est perdue par thermalisation [1].

La partie I de la figure 1-7 correspond à la partie des photons non absorbés (environs 20%).

La partie II correspond aux pertes par thermalisation (environs 32%).

La zone utile (partie III) qui va générer l'électricité est environ 48% mais ce n'est pas tous ce pourcentage qui sera transformé en électricité.

Nous remarquons donc que la cellule photovoltaïque ne répond que dans un domaine limité de longueur d'onde (de 0.4 μ m à 1.1 μ m), ceci pour le silicium.

1.8 Influence de la température et de l'éclairement

En traçant les courbes $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour différents ensoleillements à température constante [8] (figure 1.8), et pour différentes températures à ensoleillement constant (figure 1.9), on constate bien que les caractéristiques du capteur solaire dépendent fortement de l'ensoleillement et de la température.

Pour des ensoleillements variables et température constante le courant I_{SC} est très influencé par le changement de l'ensoleillement alors que la tension V_{OC} reste sensiblement constante, contrairement, la tension V_{OC} est influencée par les changements de la température alors que le courant I_{SC} reste confiné dans un intervalle étroit.

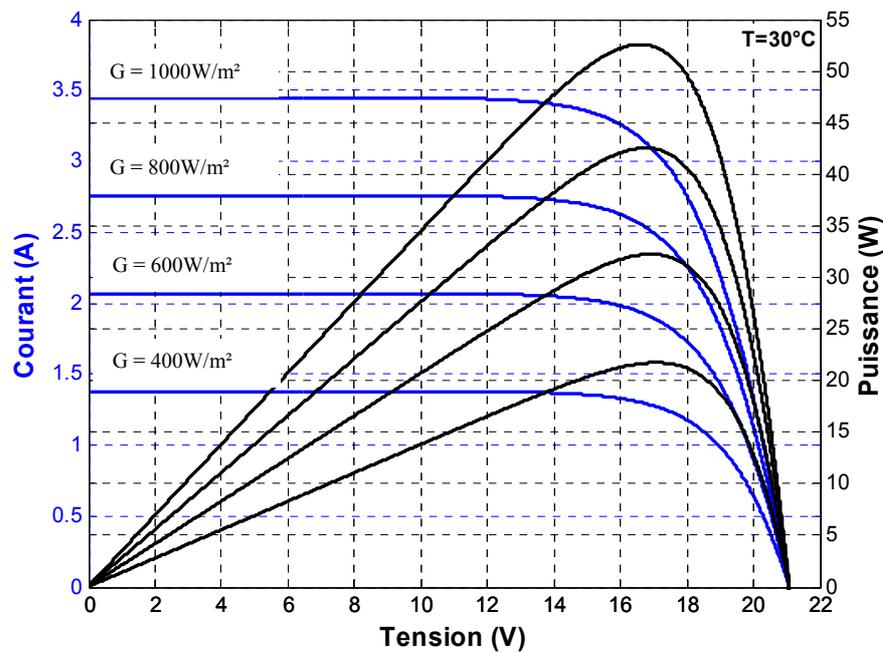


Figure 1.8 : Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différents ensoleillements G avec $T = 30^{\circ}\text{C}$.

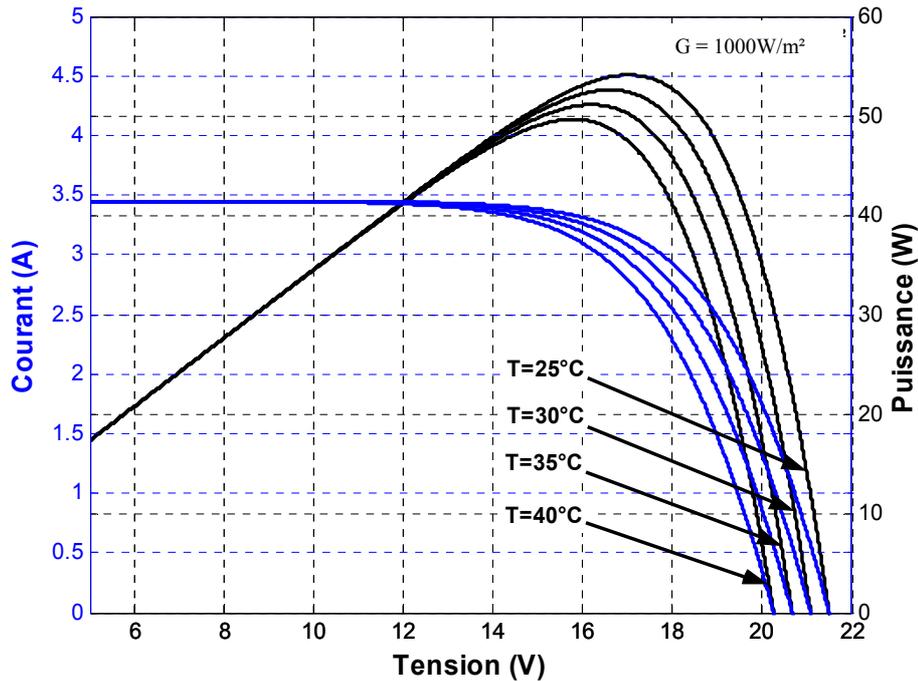


Figure 1.9 : Caractéristique $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un panneau solaire constitué de 36 cellules en série pour différentes températures T avec $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

A partir des caractéristiques $I = f(V)$ on obtient les caractéristiques en puissance du panneau solaire $P = f(V)$ pour différentes valeurs d'ensoleillement S et de températures T (Figure 1.8 et 1.9).

La figure 1-9 montre que la puissance de sortie ne dépend pas seulement de l'ensoleillement mais aussi de la température de la cellule, cela est expliqué par l'augmentation du courant de saturation de la diode D , qui conduit à un grand taux des recombinaisons dans le semi-conducteur [9] [10].

On constate aussi que la puissance de sortie ne dépend pas seulement de l'ensoleillement et de la température mais aussi de la tension de fonctionnement V du capteur. La puissance de sortie est maximale pour une certaine tension V . C'est en ce point de fonctionnement qu'on doit faire fonctionner le panneau pour qu'il travaille avec un rendement maximal. Ce point est appelé *MPP* (Maximum Power Point).

1.9 Modèle de la température de la cellule photovoltaïque

Le rendement électrique des capteurs photovoltaïques diminue linéairement avec la température de la cellule [11] [12].

L'augmentation de la température des capteurs photovoltaïques au silicium diminue leur puissance de sortie de -0.3%/K à -0.5%/K [13]

Dans les applications stationnaires S. Krauter et son équipe [14] ont conclu dans une étude qu'une ventilation active par convection forcée de 2 m/s dans les façades des immeubles réduit la température de fonctionnement de la cellule photovoltaïque de 18K, ce qui va augmenter de 7.2% la production électrique en comparaison avec les façades photovoltaïques non ventilées.

En négligeant les effets de l'inertie thermique du capteur dans les processus transitoires, les effets non linéaires du rayonnement thermique et la présence de vents élevés, la température de la cellule photovoltaïque (T) peut être exprimée approximativement comme une fonction linéaire de la température ambiante (Ta) et de l'éclairement G [6] :

$$T = T_a + \left(\frac{\text{NOCT} - 20}{800} \right) \cdot G \quad (1-5)$$

Où NOCT est la température de fonctionnement nominale de la cellule (Nominal Operating Cell Temperature) en °C, définie comme étant la température qu'atteignent les cellules lorsque G est de 800 W/m², Ta de 20°C, la vitesse du vent de 1m/s et la distribution spectrale égale à AM 1,5.

L'équation (1-5) montre clairement que la température de la cellule du capteur photovoltaïque est liée totalement à la température ambiante et à l'éclairement. Or un bon éclairement augmentera le courant électrique produit par le capteur, l'idéal pour un capteur photovoltaïque est de fonctionner à éclairement maximum et à faible température. Il faut donc avoir un moyen d'abaisser la température de fonctionnement du capteur photovoltaïque pour qu'il fonctionne dans de bonnes conditions. C'est l'objectif principal de notre travail.

1.10 Orientation des capteurs photovoltaïques

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

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

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

1.11 Systèmes photovoltaïques

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

1.12 Systèmes photovoltaïques indépendants

C'est un système photovoltaïque qui alimente l'utilisateur en électricité (sans être connecté au réseau électrique). En effet, ces systèmes appelés aussi " autonomes " sont des systèmes qui ne dépendent pas de l'existence d'un réseau d'électricité classique. C'est bien souvent le seul moyen de s'électrifier lorsque le courant du réseau n'est pas disponible : les

maisons en site isolé, sur des îles, en montagne,... La figure 1.10 montre les systèmes photovoltaïques indépendants.

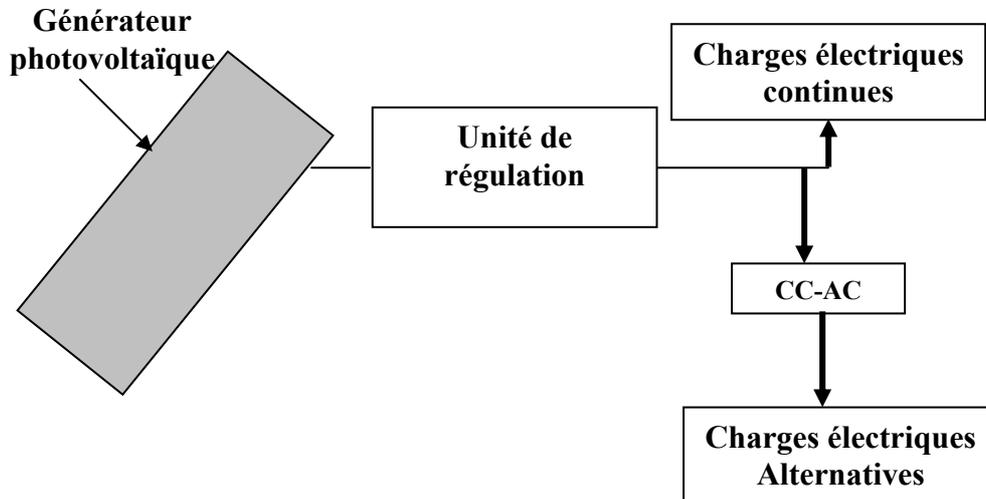


Figure 1.10 : Systèmes photovoltaïques indépendants

1.12.1 La régulation de charge

Les systèmes de régulation de charge sont des éléments d'un système photovoltaïque qui ont pour but de contrôler la charge et la décharge des batteries de stockage afin d'en maximiser leur durée de vie. Son rôle principal est de réduire le courant lorsque la batterie est presque entièrement chargée. Lorsqu'une batterie se rapproche d'un état de charge complète, de petites bulles commencent à se former sur les électrodes positives. A partir de ce moment, il vaut mieux réduire le courant de charge non seulement pour éviter des dégâts mais aussi afin de mieux atteindre l'état de charge complète. Un courant trop élevé peut provoquer une déformation des électrodes à l'intérieur, ce qui pourrait créer un court-circuit.

La durée de vie d'une batterie sera considérablement allongée si l'on évite autant que possible des surcharges importantes et des décharges profondes. Pour ce faire, on sera bien avisé de maintenir la tension par élément de batterie entre 11 V et 14,4 V pour une batterie

de 12 V. Les différents types de régulateurs se distinguent essentiellement par la manière dont ils empêchent la surcharge.

La Figure 1.11 montre le système de régulation de charge.

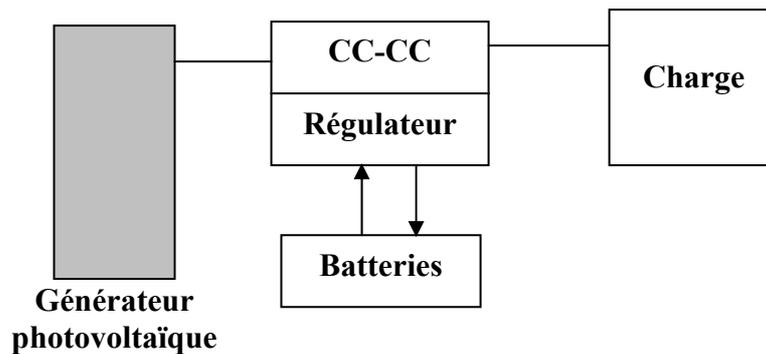


Figure 1.11 : Système de régulation de charge

1.12.2 Les batteries

La batterie aura pour rôle de maintenir en service une charge en période de faible ensoleillement ou en l'absence d'ensoleillement (figure 1.12). Dans les systèmes nécessitant un stockage de l'énergie électrique, la batterie électrochimique à accumulateur constituera souvent l'option la plus simple et la plus adéquate.

En effet, une batterie peut se connecter directement à un module photovoltaïque sans la moindre conversion ni transformation. La capacité nominale, C , d'une batterie s'exprime en ampère-heure (Ah) au régime de $C/10$, c'est-à-dire la capacité pour un temps de décharge de 10 heures. Ainsi une batterie de 100 Ah fournira idéalement un courant de 10 A pendant 10 heures.

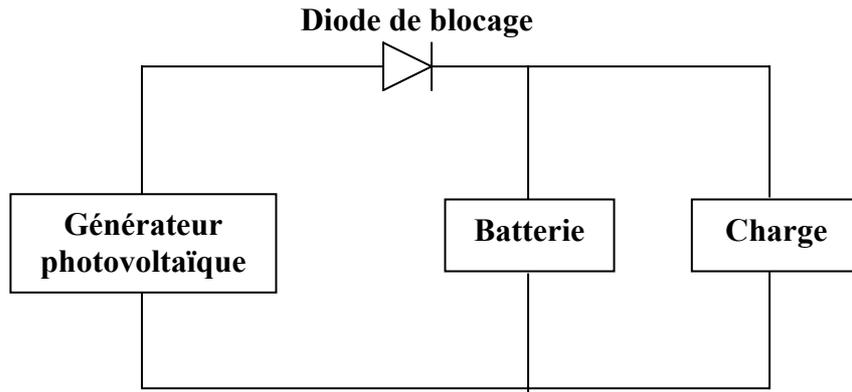


Figure 1.12 : Système photovoltaïque avec batteries

1.12.3 Système connecté à un réseau local

De tels systèmes (figure 1.13) ont souvent une puissance de 10 à 100 kWc (puissance de crête) ou plus.

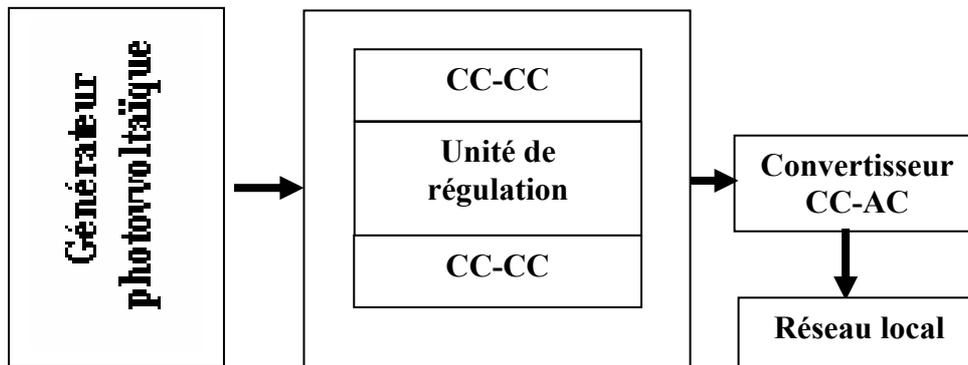


Figure 1.13 : Système connecté à un réseau local

On remarque que les utilisateurs n'utilisent pas seulement des appareils à courant continu, et c'est pourquoi un convertisseur CC/CA alimentera un réseau à courant alternatif à partir d'un groupe de batteries. Pour obtenir un meilleur rendement global du système, on n'utilisera pas de système autorégulant comme celui discuté au paragraphe précédent, mais on établira la connexion entre le champ photovoltaïque et la batterie à l'aide d'un convertisseur CC/CC. Ce convertisseur doit faire en sorte que le champ photovoltaïque fonctionne toujours à son point de fonctionnement optimal (MPP).

1.13 Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le champ photovoltaïque est couplé directement au réseau électrique à l'aide d'un convertisseur statique (continu-alternatif) (figure 1.14).

Le convertisseur ou onduleur remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.

Ce sont habituellement de grandes installations qui sont reliées au réseau (100 kWc à quelques MWc). Cela s'effectuera généralement en moyenne tension et bien souvent, la société d'électricité est impliquée dans le projet. L'énergie est immédiatement envoyée sur le réseau public et n'est donc pas liée à un consommateur local.

Des systèmes de production d'énergies photovoltaïques nettement plus réduits peuvent être également raccordés au réseau public en raison de leur caractère modulaire. Ces systèmes sont alors disposés de manière décentralisée sur les toitures des habitations, des immeubles...

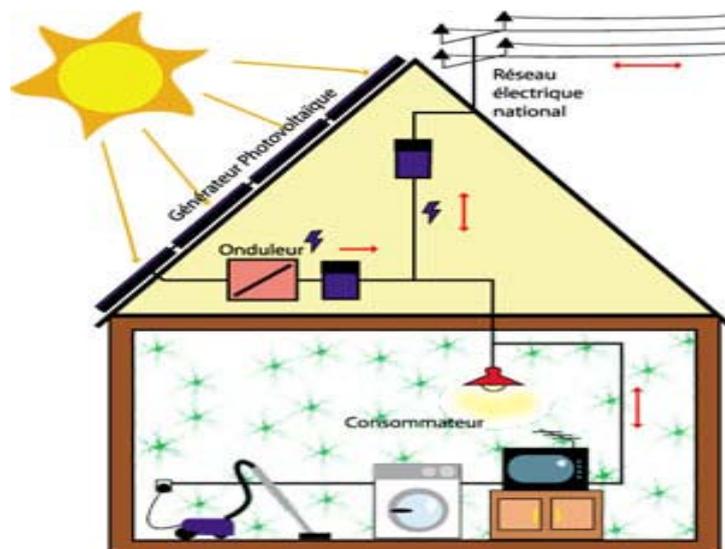


Figure 1.14 : Principe de fonctionnement d'une installation solaire photovoltaïque raccordée au réseau électrique [15]

1.14 Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque

1.14.1 Avantages

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

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

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

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

1.14.2 Inconvénients

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

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % avec une limite théorique pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergies en régions isolées. Sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m², 12 m² de capteurs PV sont nécessaires pour fournir 1 kWc, ce qui induit un coût élevé du watt crête.

Tributaire des conditions météorologiques.

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

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

Le faible rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit

au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à 1 eV perdront cette énergie, le reste étant dissipé sous forme de chaleur.

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

1.15 Secteurs d'applications

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

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

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

► **Bâtiments et toits**

► **Acquisition de données** :

L'énergie photovoltaïque joue un rôle très important pour les stations isolées d'acquisition de données, vu la haute fiabilité de fonctionnement, l'autonomie, la moindre sensibilité à la foudre, la résistance extrême aux conditions naturelles, la maintenance légère et la longue durée de vie des équipements. (25 ans)

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

Chapitre 2

Les capteurs thermiques

2.1 Introduction

Les capteurs thermiques (figure 2.1) transforment l'énergie portée par le rayonnement solaire en énergie thermique sous forme de chaleur et la transmettent à un fluide caloporteur [16].

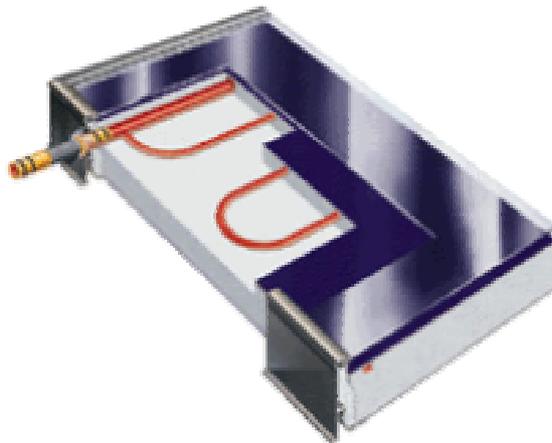


Figure 2.1 : Exemple d'un capteur thermique [17]

2.2 Notions sur le transfert thermique

Le transfert thermique se fait en général sous trois formes, transfert par conduction, par convection et par rayonnement.

2.2.1 Transfert par conduction

C'est l'aptitude qu'ont les matériaux à conduire la chaleur, 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.

Ce mode de transmission de chaleur est prépondérant à l'intérieur des isolants thermiques, et des parois d'échanges.

2.2.2 Transfert par convection

Le gradient de température génère le transfert de chaleur grâce à des variations de densité au sein du fluide qui sont à l'origine des mouvements de convection.

2.2.3 Transfert par radiation

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

L'énergie rayonnée est donnée par la relation de Stefan:

$$Q = \zeta * 4,93 * (T/100)^4$$

Avec:

Q: énergie rayonnée en kcal/h

ζ : facteur d'émissivité du corps

T: température du corps en Kelvin

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

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

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

Facteurs d'émissivité de matériaux courants

Matériau	Emissivité [e]
Aluminium poli	0,02
Aluminium oxydé	0,20
Noir de carbone	0,95
Inox poli	0,28
Zinc (galvanisé)	0,23
Brique rouge	0,93
Eau	0,67
Glace	0,98
Bois	0,91
Sable	0,76
Sol	0,38

2.3 Les différents types des capteurs thermiques

Les types les plus courants de capteurs solaires thermiques sont les capteurs plans et les capteurs à tubes sous vide. Dans les deux cas, les capteurs sont montés sur un support incliné ou un toit face au sud et sont raccordés à un réservoir de stockage. Par temps suffisamment ensoleillé, une pompe fait circuler dans le capteur un fluide caloporteur qui peut consister en de l'eau ou du glycol. Le liquide se réchauffe en parcourant le capteur, puis il transfère son énergie à l'eau du réservoir de stockage en traversant l'échangeur thermique [18].

La figure 2.2 montre une vue en coupe des éléments d'un capteur thermique plat vitré.

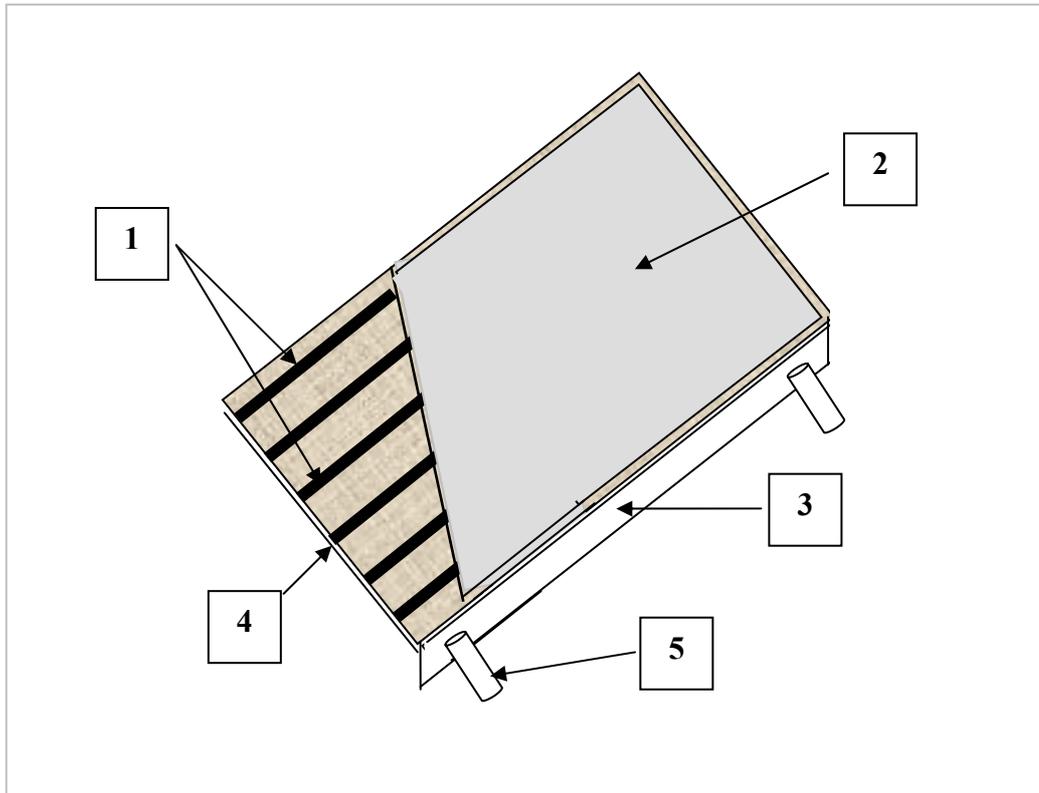


Figure 2.2 : Vue en coupe des éléments d'un capteur plat vitré

Avec :

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

2.4 Les principaux éléments constitutifs des capteurs thermiques

2.4.1 L'absorbeur

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

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

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

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

Le tableau 2.1 contient les conductivités thermiques de différents matériaux [19].

Tableau 2.1 : Conductivités thermiques de quelques matériaux

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		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

2.4.2 Système de refroidissement par le fluide caloporteur

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

2.4.3 Isolation et vitrage

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

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

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

matériaux plastiques est la dégradation de certaines de leurs propriétés, avec le temps pour certains, ou le prix élevé pour d'autres.

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

2.5 Le chauffe-eau solaire

Les capteurs solaires thermiques peuvent servir au chauffage des habitations ainsi qu'au chauffage de l'eau. L'installation servant au chauffage de l'eau est appelée « chauffe-eau solaire ».

Le chauffage de l'eau (figure 2.3) pour les douches, le lavage de la vaisselle et la lessive est l'une des utilisations les plus rentables de l'énergie solaire. Des milliers de nouveaux chauffe-eau solaires sont installés chaque jour dans le monde.

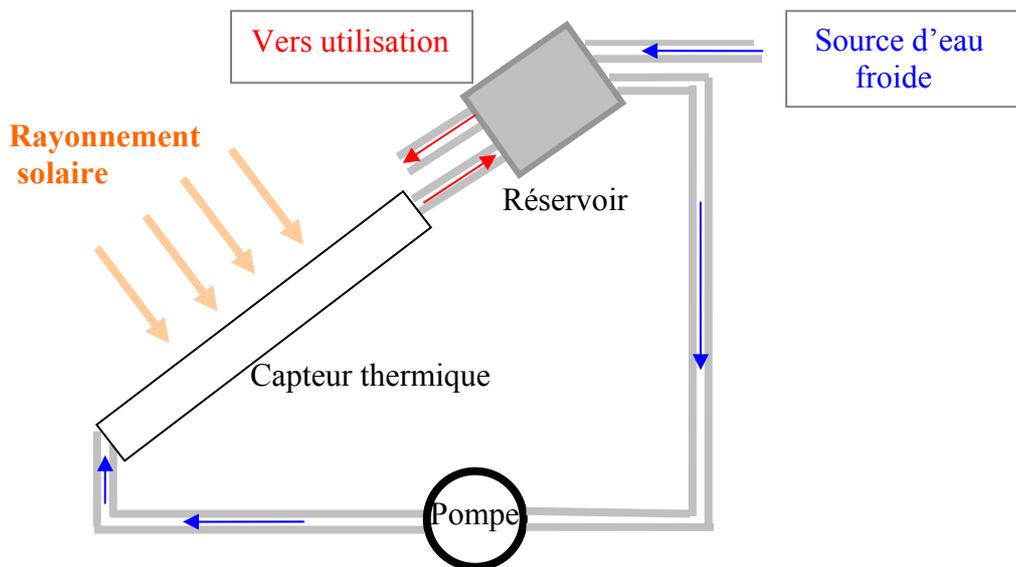


Figure 2.3 : Schéma synoptique du capteur thermique

2.6 Les transferts d'énergie dans le chauffe-eau solaire

L'énergie captée par le collecteur solaire et transformée en chaleur est cédée au fluide caloporteur puis transférée vers un réservoir de stockage.

Ce transfert se fait soit par circulation naturelle, soit par circulation forcée.

2.6.1 Transfert par circulation naturelle de l'eau

Dans ces installations, le transfert d'énergie est basé sur la plus faible densité de l'eau chaude qui confère à celle-ci un mouvement ascendant.

2.6.2 Système direct avec thermocirculation et appoint dans le stockage

L'eau entrant par le bas du capteur est chauffée par l'ensoleillement et sort en partie haute pour rejoindre le ballon de stockage situé à au moins 60 cm au-dessus du capteur. Un appoint (résistance électrique ou apport quelconque de chaleur via un échangeur) est intégré dans la partie supérieure du stockage alors que l'eau chaude solaire en occupe la partie basse.

Lorsqu'il n'y a pas d'ensoleillement, seule l'eau située dans la partie supérieure du ballon est chauffée par l'appoint. Ceci évite de chauffer toute l'eau à condition qu'il y ait une stratification des couches en fonction de la température. Cette stratification existe dans les ballons bien conçus: l'eau chaude se trouve en partie supérieure et l'eau froide en bas.

Lorsque le capteur est chauffé par le soleil, le fluide caloporteur, c'est-à-dire l'eau sanitaire dans ce cas, se met en mouvement pour rejoindre le ballon. Ce dernier se vide à sa base d'une quantité correspondante d'eau froide qui retourne au capteur. En cas d'utilisation de l'eau sanitaire, l'eau chauffée par le soleil va monter de la partie inférieure du ballon vers la partie supérieure.

2.6.3 Système indirect avec thermocirculation et appoint hors du stockage

Dans ce cas, le chauffe-eau possède deux circuits: l'un dit "primaire" contient l'eau qui est chauffée dans le capteur tandis que le circuit "secondaire" est alimenté par l'eau sanitaire à réchauffer.

Le transfert de chaleur s'effectue par un échangeur situé dans le ballon. L'appoint est situé en dehors du stockage. Comme la circulation n'est pas forcée, on veillera, comme dans le système précédent, à placer le bas du ballon à au moins 60 cm au-dessus du haut du capteur et à simplifier au maximum le circuit de canalisations. Le double circuit a l'avantage d'éviter la purge du système en cas de gel.

Le placement de l'appoint à l'extérieur de ballon permet au capteur de fonctionner librement sans que l'apport réalisé par l'appoint devienne excessif. Par contre, ce type d'installation est plus coûteux et la présence de l'échangeur nécessite que le capteur travaille à plus haute température ce qui diminue son rendement.

2.6.4 Transfert par circulation forcée

L'installation utilise ici, en plus des éléments utilisés dans les systèmes précédents, une pompe de circulation commandée par une régulation de température.

Le rôle de la pompe de circulation est de permettre un transfert plus rapide des calories captées par l'absorbeur vers le réservoir de stockage. L'utilisation de cette pompe permet aussi d'interrompre le transfert de chaleur lorsque l'eau des capteurs n'est pas plus chaude que celle contenue dans le réservoir.

C'est le rôle de la régulation de comparer les deux températures (à la sortie du capteur solaire et dans le réservoir de stockage) et de commander la pompe de circulation uniquement lorsque la première température est supérieure à la deuxième. En pratique, les régulateurs disponibles sur le marché permettent à l'utilisateur de fixer indépendamment la différence de température à l'enclenchement (entre 5 et 10°C) et au déclenchement du circulateur (entre 2 et 5°C).

2.7 Avantages et inconvénients des capteurs thermiques

2.7.1 Avantages

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

- Les technologies à mettre en oeuvre pour utiliser l'énergie solaire thermique sont aisément maîtrisables et adaptables aux situations de toutes les régions. Les techniques et

les matériaux utilisés sont similaires à ceux employés dans le secteur traditionnel de chauffage, Il s'agit d'une forme modulable de production d'énergie que l'on peut adapter en fonction de ses besoins.

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

2.7.2 Inconvénient

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

- La puissance disponible par unité de surface est relativement limitée; ceci rend difficile une réponse à des besoins importants (grands ensembles d'appartements, par exemple).

- Le chauffe-eau solaire ne permet pas une production d'électricité.

2.8 Principales applications de l'énergie solaire thermique

La production d'eau chaude sanitaire est peut-être l'application la plus répandue de l'énergie solaire thermique. Dans ces systèmes, on peut utiliser aussi bien la circulation naturelle (thermosiphon) que la circulation forcée (pompes de circulation), de diverses configurations.

Le chauffage des piscines est l'application la plus simple de l'énergie solaire thermique active. Dans ces systèmes, la piscine elle-même forme le système de stockage. Le plus souvent, l'eau de la piscine circule directement dans les collecteurs, qui sont parfois des collecteurs nus. Pour les systèmes de plus grande taille, on utilise également des collecteurs à revêtement transparent.

Le chauffage des locaux peut se faire avec des collecteurs à eau ou à air. Les systèmes peuvent être simples ou relativement complexes. Les systèmes sont pour la plupart développés pour satisfaire uniquement à une partie de la demande de chaleur. Dans ce sens une étude vient de paraître [20] concernant l'implantation des échangeurs dans le toit

d'habitation. Selon cette étude on peut chauffer de l'eau sanitaire et ainsi climatiser l'habitat à travers une pompe à chaleur.

2.9 Performances et bilan énergétique du capteur thermique

Les capteurs thermiques plans travaillent à températures faibles. Dans un état stable, les performances du collecteur sont décrits par le gain utile du collecteur qui est défini comme étant la différence entre l'entrée qui est l'énergie portée par le rayonnement solaire absorbée et les pertes thermiques au niveau du collecteur [21].

On a [16] :

$$Q_u = A_c [G - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2-1)$$

Où ; G : Rayonnement absorbé par le capteur (en $[\text{w}/\text{m}^2]$).

U_L : Coefficient de transfert de chaleur (en $[\text{w}/\text{m}^2 \text{ K}]$).

T_{pm} : Température moyenne de l'absorbeur (mean absorber plat) difficile à déterminer.

T_a : Température ambiante.

A_c : Surface de captation du capteur.

Le rendement instantané du capteur thermique est donné par la formule générale suivante :

$$\eta = \frac{\int Q_u dt}{A_c \int G_T dt} \quad (2-2)$$

G_T : Rayonnement total

2.10 Distribution de la température dans le capteur thermique

Le capteur thermique est constitué principalement comme nous l'avons indiqué dans les paragraphes précédents d'une vitre pour piéger le rayonnement solaire, d'une plaque absorbante et d'une tyauterie pour faire passer le fluide caloporteur à réchauffer (figure 2.4).

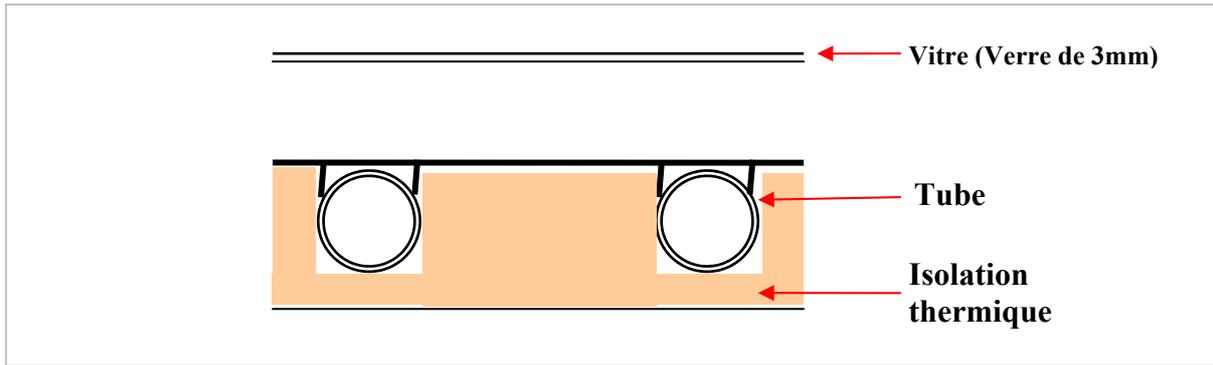


Figure 2.4 : Vue en coupe du capteur thermique à une vitre

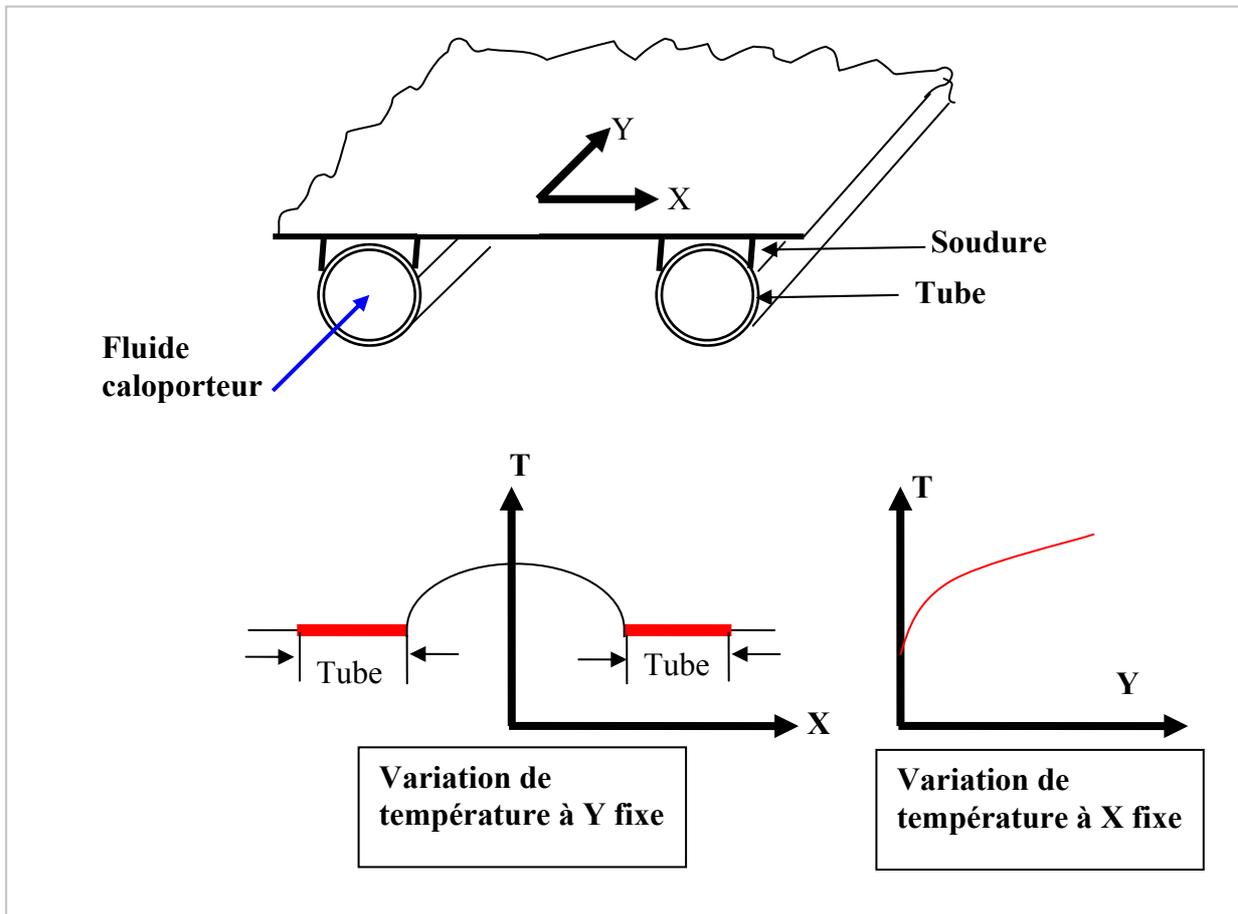


Figure 2.5 : Distribution de la température dans le capteur thermique [22]

La température est maximum entre les deux tubes et elle est uniforme pour leur dessus (figure 2.5). En allant dans la direction du fluide (vers l'axe y) la température augmente.

2.11 Facteur d'extraction de la chaleur du capteur

Le facteur d'extraction de la chaleur du collecteur, F_R , 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 est défini comme suit :

$$F_R = \frac{\dot{m}.C_p(T_0 - T_i)}{A_c[G - U_L(T_i - T_a)]} \quad (2-3)$$

Où T_0 et T_i sont respectivement les températures de sortie et d'entrée du fluide, T_a est la température ambiante.

C_p : Chaleur spécifique

L'énergie calorifique (thermique) à la sortie des tubes (utile) devient :

$$Q_u = A_c.F_R.[G - U_L(T_i - T_a)] \quad (2-4)$$

On voit bien que la formule (2-4) est différente de la formule (2-1) par le fait que l'énergie utile dépend de la température d'entrée du fluide et non pas de la température moyenne du capteur.

Le facteur d'extraction de chaleur du capteur thermique augmente lorsque le débit augmente et en même temps la température va diminuer.

On introduit le produit de transmittivité-absorptivité du rayonnement par le capteur ($\tau\alpha$)

$$(\tau\alpha) = \frac{S A_p}{G_T A_c} = (\tau\alpha)_{avg} \frac{A_p}{A_c} \quad (2-5)$$

Où $(\tau\alpha)_{avg}$ est la moyenne du produit transmissivité- Absorption pour le rayonnement direct, diffus et réfléchi. Telle que $(S.A_p)$ est l'énergie absorbée à la surface de l'absorbeur du capteur et $(G_T.A_c)$ est l'énergie du rayonnement incident sur la surface total du capteur.

Le rendement instantané du capteur en fonction du produit ($\tau\alpha$) est donné par :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c G_T} = \left[F_R (\tau\alpha) - F_R U_L \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \right] \quad (2-6)$$

Le capteur thermique est caractérisé par deux paramètres importants, $F_R (\tau\alpha)$ et $F_R U_L$, qui indiquent comment le capteur fonctionne ; $F_R (\tau\alpha)$ indique comment l'énergie est absorbée par le capteur alors que $F_R U_L$ indique comment cette énergie sera perdue.

Ces deux paramètres constituent le modèle du capteur plan. Un troisième paramètre peut être défini pour caractériser l'effet de l'inclinaison [23].

2.12 Standard de tests sur les capteurs thermiques

L'étude des performances des capteurs thermiques consiste en général en trois parties :

- . La première est la détermination du rendement instantané du capteur avec une orientation directe du capteur au rayonnement solaire.
- . La deuxième est la détermination de l'effet de l'angle d'incidence de l'irradiation solaire.
- . La troisième est la détermination de la constante de temps du capteur et la mesure de la capacité de chaleur effective.

Le standard ASHRAE 93-86 [23] et le document SRCC RM-1 [24] donnent le standard test à réaliser pour la détermination des performances du capteur thermique. La procédure générale est que les tests se font sous des conditions presque stables et de relever les données nécessaires pour l'analyse. Bien qu'elles diffèrent dans les détails, ces deux normes, les traits essentiels de leurs procédures peuvent être résumées comme il suit :

En générale, on mesure :

- La température d'entrée du fluide (T_i)
- La température de sortie du fluide (T_o)
- Le débit (m)
- L'éclairement mesuré par un pyranomètre (G)
- La vitesse du vent (v) et sa direction

Le rendement thermique est calculé par :

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c \cdot G_T} = \frac{\dot{m} C_p (T_o - T_i)}{A_c \cdot G_T} \quad (2-7)$$

Les tests se font au voisinage de midi, quand le ciel est clair (relativement) et les rayons solaires sont directement dirigés vers le capteur. Les tests sont faits symétriquement autour de midi (une heure avant et une heure après).

Dans ces conditions, on calcule le rendement thermique instantané du capteur selon la formule (2-7) et on trace le graphe du rendement en fonction de T^* [$\text{m}^2\text{C}/\text{w}$] telle que :

$$T^* = \frac{(T_i - T_a)}{G_T} \quad (2-8)$$

Nous donnons dans la figure 2.6 deux résultats du rendement des capteurs thermiques obtenus à partir des travaux de Holland et al [25] et de Yiqin et al [26], Lorsque la différence entre la température d'entrée et la température ambiante augmente, le rendement instantané du capteur diminue.

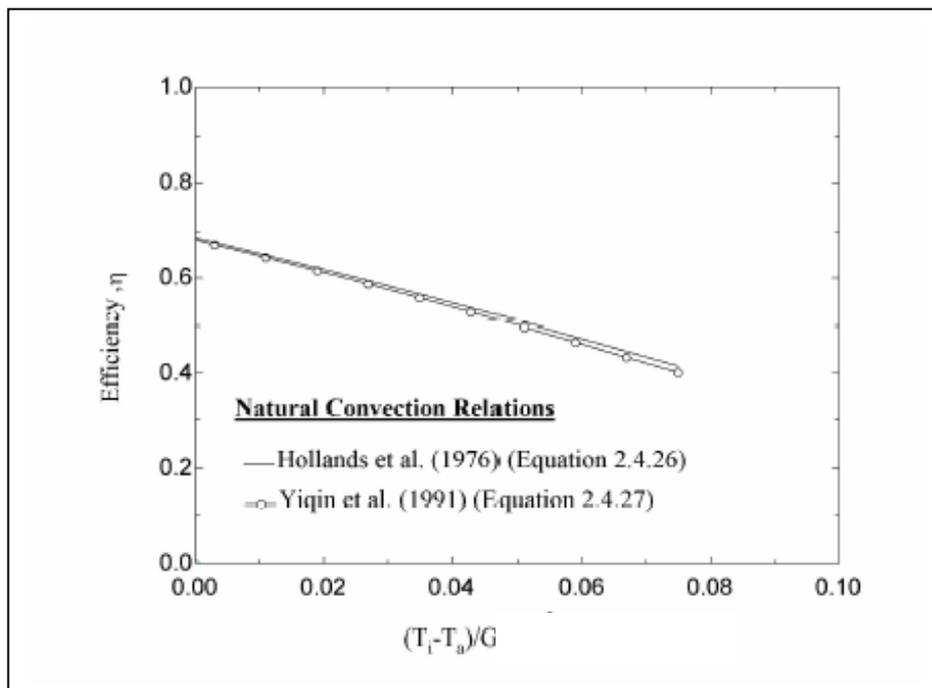


Figure 2.6 : Rendement instantané pour un capteur plan (tiré de la littérature)

Chapitre 3

Etude théorique des capteurs hybrides photovoltaïques-thermiques

3.1 Introduction

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 panneaux 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.

Une alternative intéressante aux modules photovoltaïques ordinaires est d'utiliser les capteurs photovoltaïques combinés thermiques hybrides qui sont constitués de capteurs photovoltaïques et d'un dispositif thermique produisant ainsi simultanément de l'électricité et de la chaleur.

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

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

3.2 Historique et état de l'art

Le capteur hybride photovoltaïque/thermique (PV/T) convertit l'énergie solaire en chaleur et en électricité. Les avantages de combiner un collecteur thermique et un panneau pv dans

un seul capteur sont l'augmentation de l'efficacité totale de la conversion d'énergie solaire et l'uniformité architecturale dans le cas d'utilisation sur un toit. Les coûts aussi seront réduits comparés aux deux systèmes (photovoltaïque et thermique) séparément installés.

Plusieurs instituts et centres de recherches de part le monde ont étudié les capteurs hybrides. Les capteurs hybrides utilisant de l'air et de l'eau avec absorbeur ont été évalués expérimentalement [27] [28] [29] [30] [31], analytiquement [32] [33] [34] et économiquement. Des travaux ont été menés pendant trois ans au Massachusetts Institute of Technology [35]. La conclusion la plus importante de ce travail affirmait que la viabilité du capteur hybride PV/T sera décidée par la capacité du système à satisfaire les charges thermiques et électriques demandées.

Kern et Russell, 1978 [36], donnent les principaux concepts de ces systèmes par l'usage d'eau ou de l'air comme fluide caloporteur. Hendrie, 1979 [37], présente un modèle théorique sur les systèmes PV/T qui utilisent des techniques du capteur plan thermique conventionnel.

Bhargava et al 1991 [38] et Prakash 1994 [39] présentent les résultats de leur travaux sur l'effet du débit et de canal d'air. Des travaux sur les performances des capteurs hybrides ont été étudiés par Sopian et al en 1995 et en 1996 [40]. Dans les travaux précités le rendement thermique de ces systèmes PV/T était dans la gamme de 45% à 65%.

Bergene et Lovvik, 1995 [34], ont analysé le transfert de l'énergie entre les différents composants du système hybride PV/T utilisant du liquide comme fluide caloporteur. Une étude paramétrique pour l'habitat a été présentée par Brinkworth et al, 1997 [41]. Garg et Adhikari, 1999 [42] ont étudié le système PV/T utilisant de l'air pour le chauffage en simple et en doubles vitrages.

Les résultats trouvés dans les travaux précités ont été très encourageants et ils ont trouvé des rendements thermiques de 70% avec refroidissement par du liquide et 60% pour un refroidissement par air. Les publications récentes sur les capteurs PV/T présentent des systèmes, basés sur le stockage de chaleur latente qui pourra être utilisée dans les immeubles et pour produire de l'eau chaude, ont été développés par Hauser et Rogash, 2000 [43]. Le capteur hybride PV/T avec réservoir de l'eau chaude a été proposé par Huang et al,

2001 [44] et une autre conception des système PV/T a été incluse récemment par Zondag et al, 2002 et 2003 [45] [46].

B. S. Sandnes et al [47] ont étudié des capteurs photovoltaïques thermiques à base d'absorbeur en polymère.

L'augmentation de la production d'énergie totale du système hybride PV/T peut être obtenue en utilisant des réflecteurs diffus en Aluminium, comme amplificateurs qui produiront une distribution uniforme du rayonnement solaire réfléchi sur la surface du capteur hybride [48] [49] [50] [51] [52].

Une étude a été publiée dernièrement [53] en Europe et qui a mis en commun plusieurs laboratoires. Toujours en Europe G. Fraise et son équipe ont traité des capteurs photovoltaïques thermiques dans l'habitat [54].

En général, deux types de capteurs PVT peuvent être distingués: collecteurs PVT avec couverture en verre qui produisent une chaleur à haute température mais avec un rendement électrique légèrement inférieur, et les capteurs PVT sans vitre qui produisent de la chaleur relativement basse température et qui possèdent de hautes performances électriques [55] [56].

Les capteurs hybrides sans vitre supplémentaire délivrent relativement de faibles températures, et doivent être combinés avec des pompes à chaleur pour chauffer de l'espace ou de l'eau [57] [58].

Une des applications des capteurs photovoltaïques en combinaison non directe avec les capteurs thermiques est dans les systèmes SDHW (Solar Domestic Hot Water) qui consistent en général à alimenter la résistance interne nécessaire au chauffage de l'eau par l'électricité générée par les capteurs photovoltaïques [59].

Des travaux relativement récents (2003-2004) ont été consacré aux aspects de la production simultanée de la température et de l'électricité par les capteurs photovoltaïques [60].

Les capteurs hybrides à base de silicium amorphe qui ont un rendement de conversion photovoltaïque faible (près de 7%) ont été étudiés par K. Adamoto et son équipe [61].

M.J. Elswijk et al [62] ont conclu dans une étude que dans l'habitat, un capteur hybride PVT a besoin de 38% moins d'espace de toiture qu'un système combiné de modules PV et collecteurs thermiques avec le même rendement approximatif.

Le rendement thermique a été trouvé de l'ordre de 77%, avec un coefficient de perte de chaleur de $23 \text{ W/m}^2\text{K}$ (travaux de M.Bakker et al [63]).

H.A. Zondag et al [64] ont étudié l'effet de la résistance thermique sur le rendement du capteur hybride

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

Y. Tripanagnostopoulos a appliqué le système basé sur le refroidissement des capteurs photovoltaïque aux capteurs hybrides à concentrateurs [65].

Récemment (fin 2004), dans les applications stationnaires, un modèle simplifié permettant d'étudier le comportement énergétique global d'un prototype de toiture d'une habitation (6 m^2 de capteurs hybrides photovoltaïque thermiques) a été développé [66].

3.3 Performances électriques des capteurs hybrides

On obtient les performances électriques des capteurs hybrides en traçant la caractéristique instantanée $I=f(V)$ du capteur. Cette caractéristique nous fournira les paramètres électriques du capteur (les résistances série et parallèle) selon le modèle électrique du capteur hybride ainsi que le point de puissance maximum (P_m).

Le modèle à cinq paramètres du capteur hybride est similaire à celui du capteur photovoltaïque classique (figure 1.3).

Le rendement électrique du capteur hybride se calcule de la même façon que celui du capteur photovoltaïque classique. C'est le rapport entre la puissance utile (P_m) de sortie du capteur et la puissance d'entrée qui est l'éclairement solaire par unité de surface ($G \cdot S$).

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{in}} = \frac{V_m \cdot I_m}{P_{in}} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{G \cdot S} \quad (3-1)$$

Telle que :

V_m : Tension maximum du capteur hybride

I_m : Courant maximum délivré par le capteur hybride

V_{oc} : Tension du circuit ouvert du capteur hybride

I_{sc} : Courant de court circuit du capteur hybride

FF : Facteur de remplissage FF (Fill Factor en anglais) ; il correspond au rapport de puissance maximale sur le produit de V_{oc} et I_{sc} , et reflète la qualité de la cellule par rapport à une cellule idéale ($FF = 1$).

$$FF = \frac{V_m \cdot I_m}{V_{oc} \cdot I_{sc}} \quad (3-2)$$

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

3.4 Modèle thermique des capteurs photovoltaïques

La température des capteurs photovoltaïque dépend des propriétés physiques, de la configuration du module, de l'état du ciel et de l'environnement (intensité du rayonnement solaire et de la vitesse du vent).

La modélisation du comportement avec la température des capteurs photovoltaïques a été traitée par plusieurs auteurs en évaluant l'énergie d'entrée et de sortie au niveau du capteur par les trois types de transfert de chaleur connus qui sont le transfert de chaleur par conduction, par convection et par rayonnement ainsi que l'énergie électrique produite par le capteur photovoltaïque [67] [68] [69].

Le temps de réponse du capteur est défini comme étant le temps nécessaire pour atteindre 63% du changement maximum de la température provoqué par un changement de

rayonnement incident [70]. La valeur moyenne pour la plupart des capteurs est environ 7 minutes [70].

La température du capteur photovoltaïque est estimée en considérant que l'échange de l'énergie thermique du capteur se fait avec son environnement (pour les deux faces du capteur).

Les trois modes de transfert de chaleur sont le transfert par convection, par conduction et par rayonnement.

La figure (3.1) montre les différents modes de transfert de chaleur du capteur photovoltaïque à son environnement ainsi que le transfert de l'énergie électrique vers la charge.

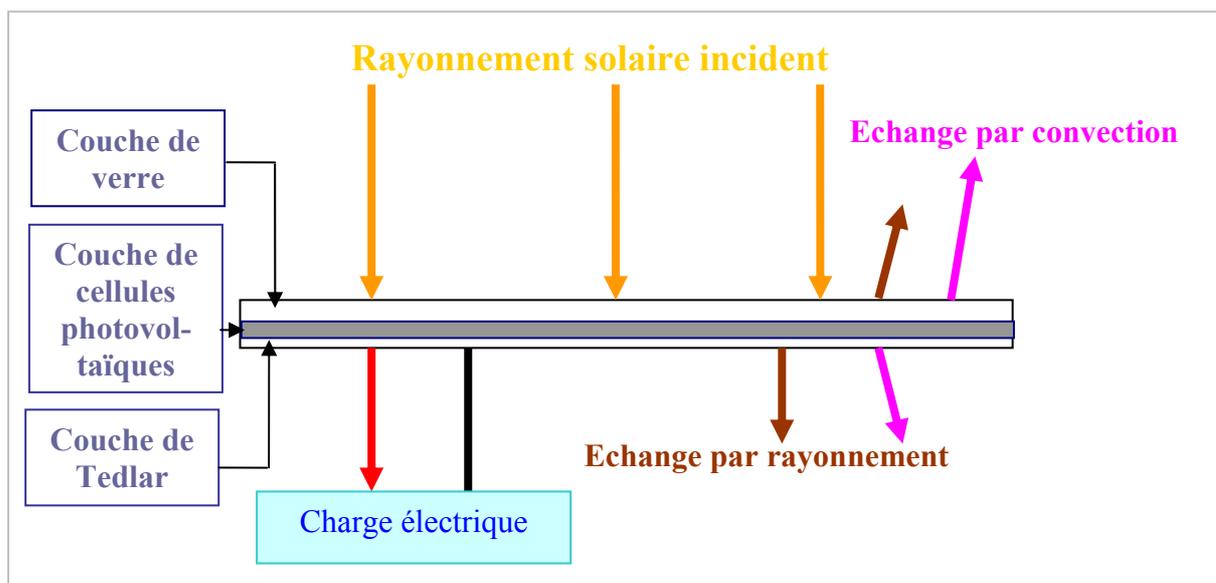


Figure 3.1 : Mode de transfert d'énergie thermique au niveau du capteur photovoltaïque

Nous avons considéré seulement le transfert par convection et par rayonnement des deux côtés du capteur, par contre nous avons négligé le transfert par conduction vers la structure vu la faible surface de contact.

Tous ces modes de transfert vont contribuer à produire une variation de la température du capteur photovoltaïque en fonction du temps et on a [70] :

$$C_{\text{capteur}} \frac{dT}{dt} = q_{lw} + q_{sw} + q_{conv} - P_{out} \quad (3-3)$$

Avec ;

C_{capteur} : Capacité thermique du capteur photovoltaïque

P_{out} : Puissance électrique fournie à la charge

q_{lw} : Quantité de chaleur transmise par rayonnement en grandes longueurs d'ondes

q_{sw} : Quantité de chaleur transmise par rayonnement en petites longueurs d'ondes

q_{conv} : Quantité de chaleur transmise par convection

Le capteur photovoltaïque est considéré comme constitué de trois couches (figure3-1) :

- La couche du verre trempé qui est la face exposée aux rayonnements solaires incidents.
- La couche contenant les cellules photovoltaïques (englobés dans l'EVA)
- La couche protectrice qui est le Tedlar

La température est supposée uniforme dans les trois couches du capteur photovoltaïque et on néglige l'effet de la structure et de l'étanchéité sur la température du capteur.

La capacité thermique du capteur est la somme des capacités thermiques de ses différents constituants:

$$C_{\text{capteur}} = \sum_m A \cdot d_m \cdot \rho_m \cdot C_m \quad (3-4)$$

Où m désigne le type de composant du capteur, d et ρ sont respectivement l'épaisseur et la chaleur spécifique. A est la surface du capteur.

3.4.1 Transfert de chaleur par rayonnement de courtes longueurs d'ondes

Le rayonnement effectif atteignant la face avant du capteur photovoltaïque est une fonction de l'intensité du rayonnement direct et diffus de courtes longueurs d'ondes et de l'absorptivité de la face avant du capteur.

La quantité de chaleur transmise à la face avant du capteur photovoltaïque par rayonnement de courtes longueurs d'ondes est exprimée par :

$$q_{sw} = \alpha \cdot \Phi \cdot A \quad (3-5)$$

Φ est le flux total incident sur le plan du capteur.

α est le coefficient d'absorptivité, qui dépend de l'orientation et de la configuration du capteur et dépend aussi des caractéristiques d'absorptivité du matériau constituant le capteur. Pour un capteur en silicium, 77% du rayonnement solaire incident est absorbé [71].

3.4.2 Transfert de chaleur par rayonnement de grandes longueurs d'ondes

Le transfert de chaleur pour les grandes longueurs d'ondes est donné par l'équation si dessous basée sur la loi de Stephan-Boltzmann [70] [72] :

$$q_{hw} = A \cdot \sigma \left(\frac{(1 + \cos \beta_{surface})}{2} \varepsilon_{sky} \cdot T_{sky}^4 + \frac{(1 - \cos \beta_{surface})}{2} \varepsilon_{ground} \cdot T_{ground}^4 - \varepsilon_{capteur} \cdot T_{capteur}^4 \right) \quad (3-6)$$

Les valeurs des paramètres sont données par Schott [69] :

$\varepsilon_{sky} = 0.95$ pour un ciel clair.

$\varepsilon_{sky} = 1.0$ pour les autres conditions.

$\varepsilon_{capteur} = 0.9$

$\varepsilon_{ground} = 0.95$

$T_{sky} = (T_{ambiante} - \delta T)$, pour un ciel clair ou on a : $\delta T = 20$ K.

$T_{sky} = T_{ambiante}$ pour les autres conditions.

σ : Constante de Stefan- Boltzmann ($\sigma = 5.6695 \cdot 10^{-8}$ W/m².K⁴)

3.4.3 Transfert de chaleur par convection

L'échange d'énergie par convection est donné par la loi de Newton qui est proportionnelle à la différence entre la température de la surface et celle du fluide.

L'énergie totale échangée par convection à partir de la surface du capteur photovoltaïque est donnée par :

$$q_{conv} = -h_c \cdot A \cdot (T_{capteur} - T_{ambiante}) \quad (3-7)$$

Expression dans laquelle h_c est le coefficient d'échange par convection.

La convection dans le cas du transfert de chaleur dans le capteur photovoltaïque est la combinaison entre la convection naturelle et la convection forcée. Dans le cas de temps calme et ciel clair, la convection naturelle (appelée aussi libre) est prédominante. Par contre dans le cas de l'existence de vent, la convection forcée est prédominante. Le coefficient de convection naturelle est donné par Holman [72] :

$$h_{c,libre} = 1.31 \cdot (T_{capteur} - T_{ambiante})^{1/3} \quad (3-8)$$

Pour les journées typiques la convection totale est la somme de la convection libre et forcée et ceci en négligent le fait que le coefficient de convection forcée est une fonction linéaire de la vitesse du vent pour quelques auteurs [69].

Le transfert de chaleur par convection dans un capteur photovoltaïque en tenant compte des aspects cités ci-dessus est donné par l'équation suivante :

$$q_{conv} = -(h_{c,forcée} + h_{c,libre}) \cdot A \cdot (T_{capteur} - T_{ambiante}) \quad (3-9)$$

Expression dans laquelle A est la surface du capteur.

3.4.4 Puissance de sortie du capteur photovoltaïque

Elle est donnée en fonction de la température et du facteur de correction (FF : Fill Factor) par l'équation suivante [70] :

$$P_{out} = C_{FF} \cdot \frac{E \ln(K_1 E)}{T_{capteur}} \quad (3-10)$$

Où C_{FF} est le coefficient de facteur de forme, ($C_{FF}=1.22 \text{ K.m}^2$) et K_1 est une constante ($K_1= 10^6 \text{ m}^2/\text{w}$), E est l'éclairement incident (en W/m^2).

3.4.5 Modèle théorique unidimensionnel instationnaire de la température du capteur photovoltaïque

L'équation (3-3) donne alors :

$$C_{capt} \frac{dT_{capt}}{dt} = \sigma \cdot A \cdot (\varepsilon_{sky}(T_{amb} - \delta T)^4 - \varepsilon_{capt} T_{capt}^4) + \alpha \cdot \phi \cdot A - \frac{C_{FF} \cdot E \cdot \ln(k_1 E)}{T_{capt}} - (h_{c,forcée} + h_{c,libre}) \cdot A \cdot (T_{capteur} - T_{amb}) \quad (3-11)$$

Avec $\delta T = 20 \text{ K}$ pour un ciel clair.

La résolution de l'équation (3-11) permet la détermination de la variation de température du capteur photovoltaïque à l'instant t .

L'équation (3-11) est non linéaire et n'a pas de solution analytique. Il faut utiliser une méthode numérique pour la résoudre. On doit utiliser pour les conditions initiales des températures mesurées expérimentalement.

3.5 Modèle thermique du 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.

On considère le capteur hybride de la figure 3.2 constitué du capteur photovoltaïque logé dans une enceinte métallique qui englobe l'isolation thermique latérale et transversale.

Nous avons modélisé la température du capteur photovoltaïque (seul et sans isolation thermique) dans les paragraphes précédents. Nous allons établir à présent le modèle énergétique du capteur hybride.

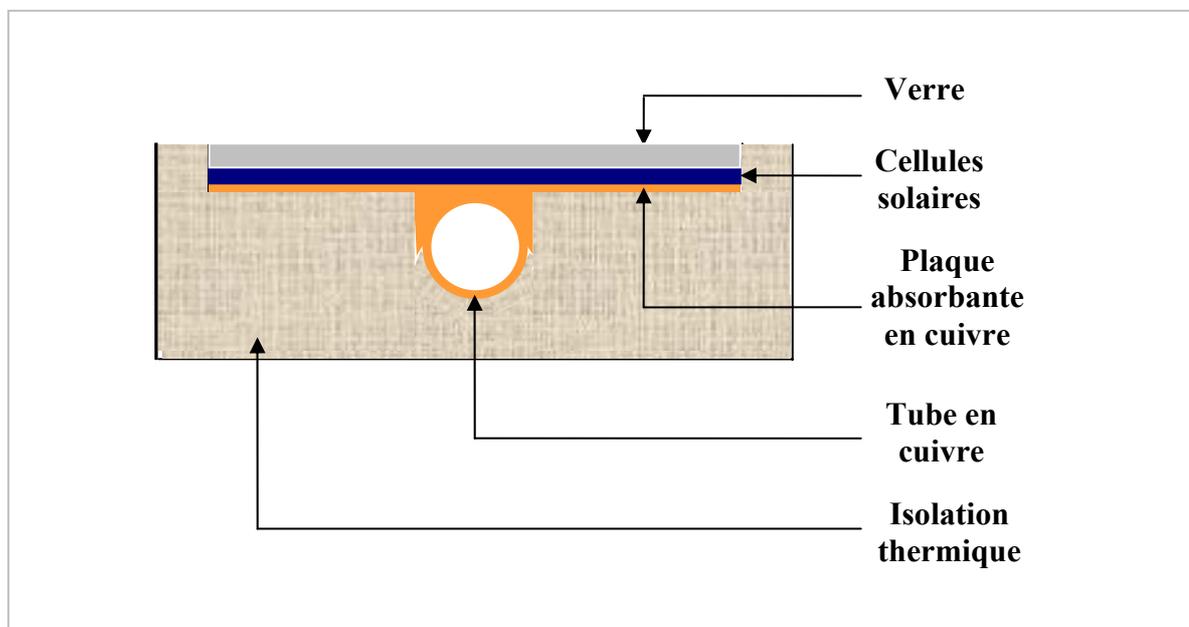


Figure 3.2 : Vue en coupe du capteur hybride

L'équation suivante décrit le flux de chaleur généré par le capteur hybride en fonction de la température [73] :

$$\dot{Q}_{th}(T) = \left(m_{capt} C_{p-capt} + m_f C_{p-f} \right) \frac{dT}{dt} + \dot{m}_f C_{p-f} (T - T_{in}) \quad (3-12)$$

Où :

m_{capt} : Masse de la plaque absorbante du capteur

m_f : Masse du fluide

C_{p-capt} : Chaleur spécifique de la plaque absorbante du capteur

C_{p-f} : Chaleur spécifique du fluide

\dot{m}_f : Débit massique du fluide

T et T_{in} : Température de sortie et d'entrée du fluide

\dot{Q}_{th} : Flux d'énergie thermique généré par le capteur,

L'énergie thermique qui se trouve au niveau du fluide (figure 3.3) dépend de la température du capteur hybride causée par la conversion du rayonnement solaire.

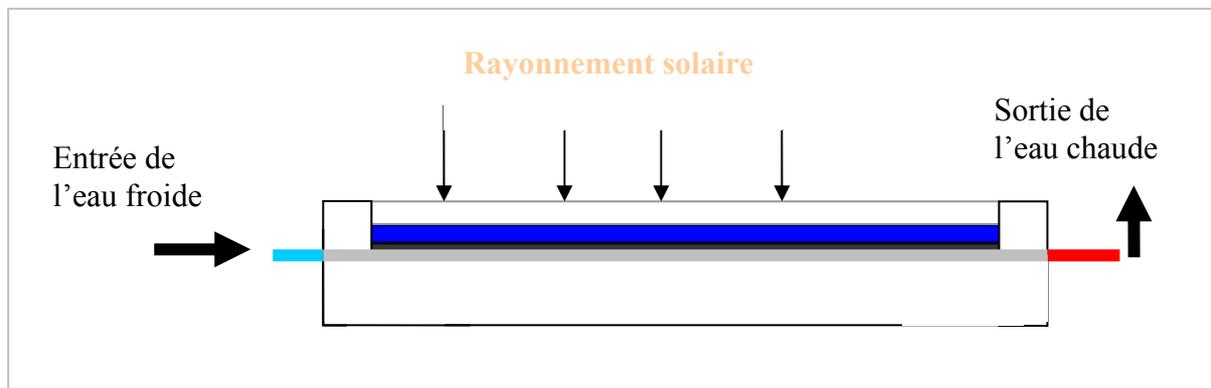


Figure 3.3 : Production de l'énergie thermique par le capteur hybride

On néglige le gradient de température et du rayonnement perpendiculaire au flux de circulation du fluide ainsi que l'échange de chaleur par convection parallèle au flux du fluide.

On suppose que chaque élément peut être caractérisé par une seule température T . L'équation 3-12 est obtenue à partir du bilan énergétique du capteur.

L'équation 3-12 peut être réarrangée pour former une équation différentielle de 1^{er} ordre :

$$\frac{dT}{dt} + AT = B \quad (3-13)$$

Avec

$$A = \frac{\dot{m}_f C_{p-f}}{(m_{capt} C_{p-capt} + m_f C_{p-f})} \quad (3-14)$$

$$B = \frac{\dot{Q}_{th}(T) + \dot{m}_f C_{p-f} T_{in}}{(m_{capt} C_{p-capt} + m_f C_{p-f})} \quad (3-15)$$

La solution de l'équation (3-13) donne la variation de la température du capteur hybride en fonction du temps entre les instants t et Δt . La température moyenne est calculée de la manière suivante :

$$\bar{T} = \frac{1}{A\Delta t} \left(\frac{B}{A} + T_{initiale} \right) \cdot (e^{A\Delta t} - 1) - \frac{B}{A} \quad (3-16)$$

La figure 3.4 montre le schéma électrique équivalent du capteur hybride où figurent les énergies absorbées ou produites par le capteur.

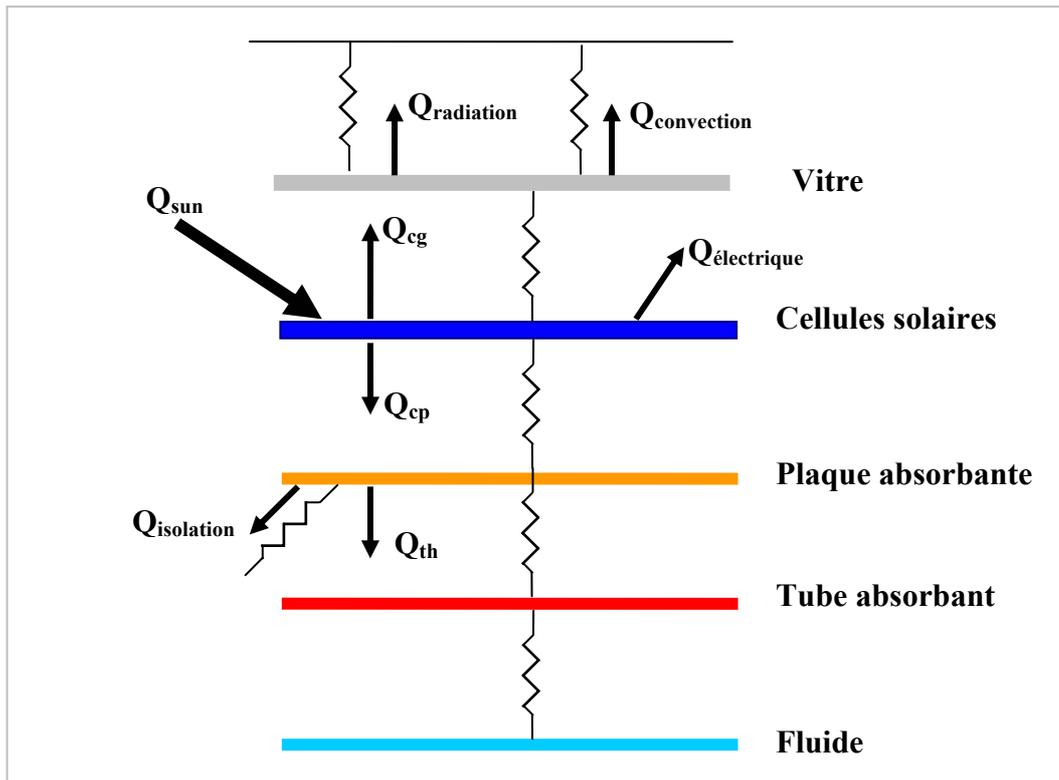


Figure 3.4 : Schéma électrique équivalent du capteur hybride

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

$$\dot{Q}_{sun} = A_{glass} \cdot I \cdot \tau_{glass} \cdot \alpha_{cell} \quad (3-17)$$

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

I : Rayonnement directe total absorbée par la cellule solaire (W/m^2)

τ_{glass} : Transmittivité du verre

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

L'énergie thermique transférée au fluide (l'eau) est donnée par :

$$\dot{Q}_{th} = U_{pt} A_{pt} (T_{abs} - T_{tube}) = h_{cw} A_{tf} (T_{tube} - T_f) \quad (3-18)$$

Telle que h_{cw} est le coefficient de transfert convectif du fluide caloporteur, il est donné par :

$$h_{cw} = \frac{Nu_{tube} K_f}{D_i} \quad (3-19)$$

Nu_{tube} est le nombre de Nusselt ; il est donné pour deux régimes d'écoulement du fluide [74] [34]:

Si le régime est laminaire : $Re < 2300 \Rightarrow Nu_{tube} = 4.364$

Si le régime est turbulent : $Re > 2300 \Rightarrow Nu_{tube} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}$

Re est le nombre de Reynolds donné par la relation :

$$Re_{D,i} = \frac{4 m_i}{\pi D_i \mu_i} \quad (3-20)$$

Pour notre étude nous avons :

$D_i = 0.008$ (m) ; le diamètre intérieur du tube où circule le fluide caloporteur.

Le débit massique minimum que nous avons pris est : $m_i = 0.025$ (kg/s)

La viscosité de l'eau à 20°C est : $\mu_i = 1010 \cdot 10^{-6}$ (m²/s)

Nous avons obtenu alors un $Re_{min} > 2300$ donc le régime d'écoulement de l'eau dans le tube est turbulent.

$$Nu_{tube} = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (3-21)$$

D'où :

$$h_{cw} = \frac{(0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4}) K_f}{D_i} \quad (3-22)$$

On définit le nombre de Prandtl par:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (3-23)$$

T_f : Température du fluide (K)

T_{abs} : Température de la plaque absorbante limité par l'isolant (K)

U_{pt} : Coefficient de transfert de chaleur entre la plaque et le tube contenant le fluide

A_{pt} : Surface de contact (entre la plaque et le tube) (m²)

A_f : Surface intérieur du tube (m²)

k_f : Conductivité thermique de fluide (W/mK)

Di : Diamètre intérieur du tube (m)

L : Longueur du tube (m)

k : Conductivité thermique du tube (W/mK)

\dot{m}_i : Débit massique du fluide (kg/s)

μ_i : Viscosité du fluide (kg/ms)

Nous avons : $A_f = \pi D_i L$

L'énergie électrique produite par le capteur hybride est donnée par :

$$\dot{Q}_{elect} = \frac{\dot{Q}_{sun}}{\alpha_{cells}} \eta_{ref} \cdot \exp(\beta(T_{cell} - T_{ref})) \quad (3-24)$$

Expression dans laquelle :

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).

T_{cell} ; La température de la cellule solaire en (K).

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 :

$$\dot{Q}_{ray} = \sigma \cdot \varepsilon_{glass} \cdot A_{glass} \cdot (T_{glass}^4 - T_{amb}^4) \quad (3-25)$$

Avec :

σ : Constante de Stefan-Boltzmann en (W/ m²K⁴)

ε_{glass} : Émissivité du verre

A_{glass} : Surface du verre en (m²)

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 :

$$\dot{Q}_{conv} = h_{c-a} A_{glass} (T_{glass} - T_{amb}) \quad (3-26)$$

Avec :

T_{glass} : Température du verre du capteur hybride (K)

T_{amb} : Température ambiante (K)

h_{c-a} : Coefficient de transfert convectif qui est fonction de la vitesse du vent en (W/m² K), il est donné par l'expression suivante [16] :

$$h_{c-a} = 2.8 + 3.0 V_{wind}$$

A_{glass} : Surface du verre (m²).

Malgré l'isolation thermique prévue dans notre réalisation en prévoit qu'il y'a toujours des pertes de chaleur car l'isolation ne peut pas être parfaite. Ces pertes thermiques sont exprimées comme suit :

$$\dot{Q}_{ins} = h_{ins} A_{ins} (T_{abs} - T_{amb}) \quad (3-27)$$

Avec :

h_{ins} : Coefficient de transfert convectif (W/m²K)

A_{ins} : Surface de l'isolant (m²)

T_{abs} : Température de la plaque absorbante limitée par l'isolant (K)

T_{amb} : Température ambiante (K)

Nous avons supposé pour \dot{Q}_{ins} que l'épaisseur de l'isolation thermique est uniforme et que T_{plate} reste constante lorsque la température du fluide augmente.

La chaleur emmagasinée dans le capteur hybride varie en fonction du temps. Le bilan thermique instationnaire pour notre capteur hybride est comme suit :

$$\dot{Q}_{sun} = \dot{Q}_{elec} + \dot{Q}_{cg} + \dot{Q}_{cp} \quad (3-28)$$

Avec :

$$\begin{cases} \dot{Q}_{cg} = U_{cg} A_{cg} (T_{cell} - T_{glass}) = \dot{Q}_{ray} + \dot{Q}_{conv} \\ \dot{Q}_{cp} = U_{cp} A_{cp} (T_{cell} - T_{plate}) = \dot{Q}_{th} + \dot{Q}_{ins} \end{cases} \quad (3-29)$$

\dot{Q}_{cp} et \dot{Q}_{cg} expriment le transfert de chaleur depuis la cellule solaire vers la plaque solaire (plaque absorbante) et de la plaque (contenant les tubes) vers le verre respectivement.

U_{cp}, U_{cg}, A_{cp} et A_{cg} : sont les coefficients de transfert de chaleur et les surfaces des interfaces des cellules-plaque et cellules-verre respectivement.

Nous obtenons enfin l'expression de l'énergie thermique produite par le capteur hybride et transmise au fluide caloporteur :

$$\dot{Q}_{th} = \dot{Q}_{sun} \left(1 - \frac{1}{\alpha_{cell}} \eta_{ref} \exp(\beta(T_{cell} - T_{ref}))\right) - (\dot{Q}_{ray} + \dot{Q}_{ray}) - \dot{Q}_{ins} \quad (3-30)$$

Donc pour calculer \bar{T} (de sortie) on utilise l'équation (3-13) en prenant \dot{Q}_{th} calculé selon la formule suivante :

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{th} = & A_{glass} I_d \tau_{glass} \alpha_{cell} \left(1 - \frac{1}{\alpha_{cell}} \eta_{ref} \exp(\beta(T_{cell} - T_{ref}))\right) - (\sigma \epsilon_{glass} A_{glass} (T_{glass}^4 - T_{amb}^4) + \\ & h_{c-a} A_{glass} (T_{glass} - T_{amb})) - A_{ins} h_{ins} (T_{plate} - T_{amb}) \end{aligned} \quad (3-31)$$

3.6 Comparaison entre les performances du capteur hybride et le capteur thermique plan

Pour déterminer les performances instantanées d'un capteur solaire, il existe plusieurs standards de tests [75] basés essentiellement sur l'établissement d'un bilan thermique en régime quasi-permanents.

Les principaux standards destinés aux tests des capteurs solaires thermiques sont :

- ASHRAE 93-77
- RECOMMENDATION FOR EUROPEAN SOLAR COLECTOR TESTS METHODS
- AUSTRALIEN STANDARD 2535-198

Ces standards sont appliqués dans le cas des capteurs thermiques dont:

- Les températures d'entrée du fluide sont inférieures à 90°C.
- Des bancs d'essais à circuit secondaire ouvert.
- Capteurs plans avec couvertures.
- Capteurs sans réflecteurs.
- Fluide caloporteur limité à l'eau ou à l'air.

Pour pouvoir comparer les performances thermiques du capteur hybride par rapport au capteur classique nous avons calculé son rendement thermique à partir des données expérimentales obtenues selon le standard ASHRAE 93-77.

Le standard ASHRAE 93-77 est basé sur la relation exprimant le rendement instantané du capteur, supposée de la forme d'un polynôme du premier degré en fonction de la quantité $((T_i - T_a)/G)$ telle que T_i est la température d'entrée du fluide et T_a est la température ambiante, G étant le rayonnement global incident sur le plan du capteur.

Dans ce standard on prend :

- La différence de température ($T_{out} - T_{in}$) en °C.
- Le débit massique du fluide caloporteur de 0.02 Kg/s.
- Le rayonnement solaire en W/m².
- La vitesse du vent en m/s.

3.7 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.

Durant les tests, le capteur hybride doit être connecté à une charge électrique qui simule son fonctionnement normal. Les expériences doivent être faites dans l'état stable pendant midi (± 2 heures), avec le système orienté au soleil pour assurer une valeur constante de l'intensité de l'éclairement solaire incident.

La variation de l'intensité de l'éclairement solaire ne doit pas dépasser $\pm 20 \text{ Wm}^{-2}$, avec une variation du rayonnement diffus jusqu'à approximativement 25% du rayonnement global. La variation de la température ne doit pas dépasser $\pm 1 \text{ K}$ et la variation de la vitesse du vent $\pm 0.5 \text{ ms}^{-1}$ dans la gamme de $1-2 \text{ ms}^{-1}$.

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

$$T^* = \frac{T_{in} - T_a}{G} \quad (3-32)$$

Avec :

T_{in} : Température d'entrée

T_a : Température ambiante

G : Eclairement solaire

L'énergie utile fournie par le capteur thermique plan est calculée par :

$$q_u = A \cdot F_R (\tau \alpha G - U_L (T_i - T_a)) \quad (3-33)$$

Ou : A est la surface du capteur, F_R est le facteur de perte de chaleur qui dépend de la géométrie du capteur, α est le facteur d'absorptivité du rayonnement, τ est le coefficient de transmittivité ; G est l'éclairement globale incident sur le plan du capteur, U_L est le

coefficient de perte de chaleur, T_i est la température d'entrée du fluide et T_a est la température ambiante.

Cette équation va être modifiée pour le cas des capteurs hybrides car en fait une partie du rayonnement absorbé est convertie en énergie électrique, l'énergie utile est donc.

$$q_u = A \cdot F_R (\tau \alpha^* G - U_L (T_i - T_a)) \quad (3-34)$$

Telle que α^* est le facteur d'absorptivité [76] exprimé par :

$$\alpha^* = \alpha - \eta_{pv} \quad (3-35)$$

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 :

$$\eta = \frac{\dot{m} C_p (T_{out} - T_{in})}{A \cdot G} \quad (3-36)$$

Avec :

A : Surface du capteur en [m²].

G : Eclairement global en [W/m²].

\dot{m} : Débit massique du fluide caloporteur en [Kg/s].

C_p : Chaleur spécifique de l'eau en [J/Kg K].

Tout : Température de sortie du fluide.

Tin : Température d'entrée du fluide.

η : Rendement thermique du capteur en %.

Dans le standard le standard ASHRAE 93-77 le rendement thermique est un polynôme de premier degré.

Chapitre 4

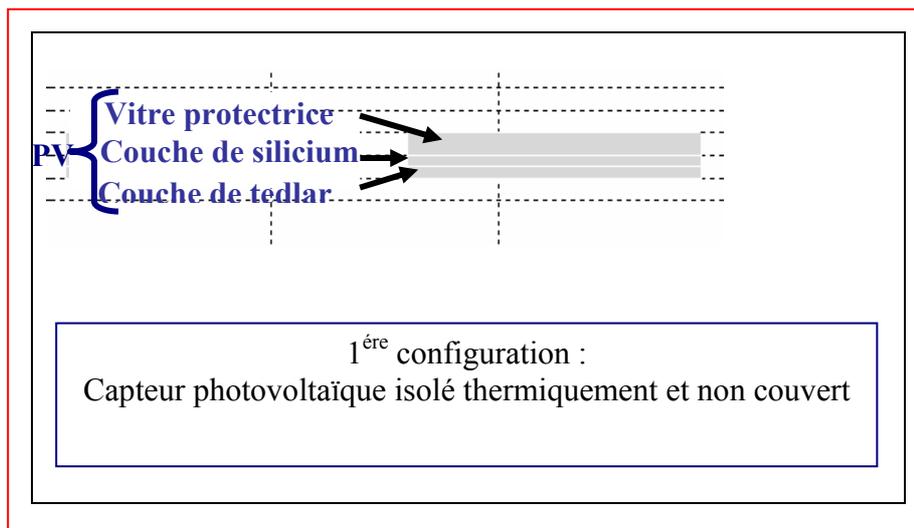
Simulation numérique

4.1 Introduction

Nous avons étudié la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride et nous avons établi par simulation numérique le comportement thermique du capteur et la cartographie de température pour quatre configurations (figure 4.1).

La première configuration était le capteur photovoltaïque isolé thermiquement et non recouvert, la deuxième configuration était le capteur photovoltaïque isolé thermiquement et avec une vitre supplémentaire au dessus.

La troisième configuration était l'introduction d'un échangeur de chaleur constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentin en tubes de cuivre et nous avons supposé l'état stationnaire c'est-à-dire que le fluide est à l'intérieur et qu'il n'y a pas de circulation pendant la durée de la simulation. La quatrième configuration que nous avons simulée était l'ajout d'une vitre supplémentaire au dessus du capteur.



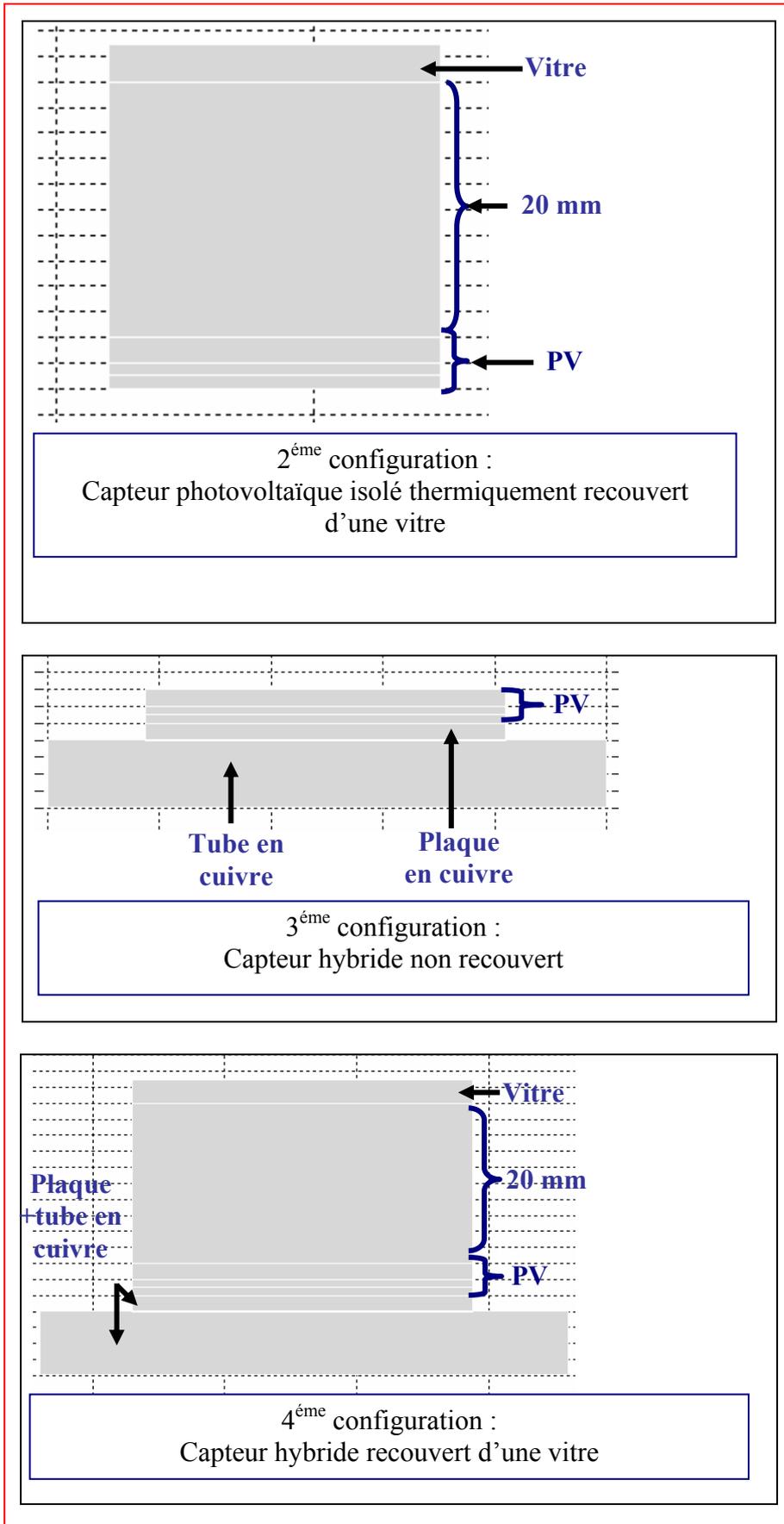


Figure 4.1 : les quatre configurations pour la simulation

4.2 Méthode de résolution

Nous avons utilisé le logiciel FEMLAB spécialisé dans le domaine de la résolution des équations numériques, le transfert de chaleur qui nous intéresse est basé dans sa description sur des équations différentielles partielles, Ce logiciel utilise la méthode des éléments finis pour résoudre les problèmes dynamiques stationnaires et instationnaires.

4.3 Résolution du problème sous FEMLAB

Parmi les logiciels de programmation qui peuvent résoudre notre problème d'une manière bien précise, il y a le logiciel FEMLAB, qui contient plusieurs options et qui le rendent très souple à utiliser dans différents domaines et pour plusieurs cas d'études.

Parmi ces options, l'interface graphique que nous utilisons pour simuler le transfert de chaleur dans le capteur hybride. Le logiciel FEMLAB offre d'abord la possibilité de dessiner ou de réaliser un objet qu'on veut étudier en utilisant l'option "Draw Mode", puis on traduit notre problème (Équation d'énergie ou autres, coefficient, conditions aux limites et condition initiale) sous la forme générale en utilisant la méthode des éléments finis, on commence par :

1) définir notre équation :

- problème parabolique
- problème elliptique
- problème hyperbolique ou autre.

2) définir les conditions initiales et aux limites: s'ils sont du type Newman ou Dirichlet en spécifiant tous les détails....etc.

Le fonctionnement du FEMLAB se résume comme suit :

- 1- Description géométrique
- 2- Initialisation des données en faisant un maillage initial (condition initial)
- 3- Maillage en faisant rentrer les conditions aux limites
- 4- Raffiner le maillage
- 5- Rassemblement de toutes les données
- 6- Résolution numérique

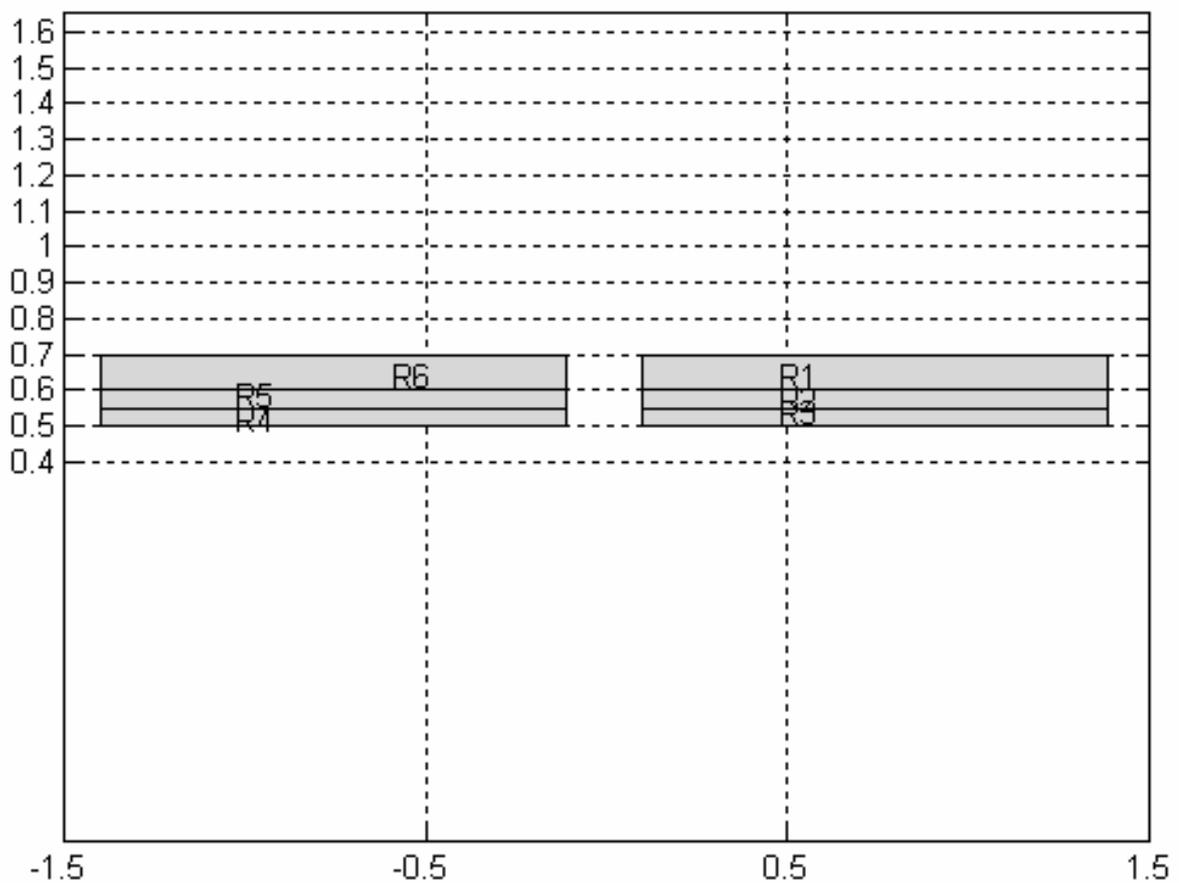
7- Affichage des résultats

4.3.1 Description géométrique

La représentation géométrique peut être faite en deux possibilités :

- en utilisant l'interface graphique.
- en rentrant dans le programme Untitled.m.

On obtient la représentation suivante (figure 4.2) :



4.3.2 Le maillage

Le maillage se fait automatiquement en deux possibilités :

- en utilisant l'interface graphique.

-en rentrant dans le programme Untitled.m.

On obtient la représentation de la figure 4-3:

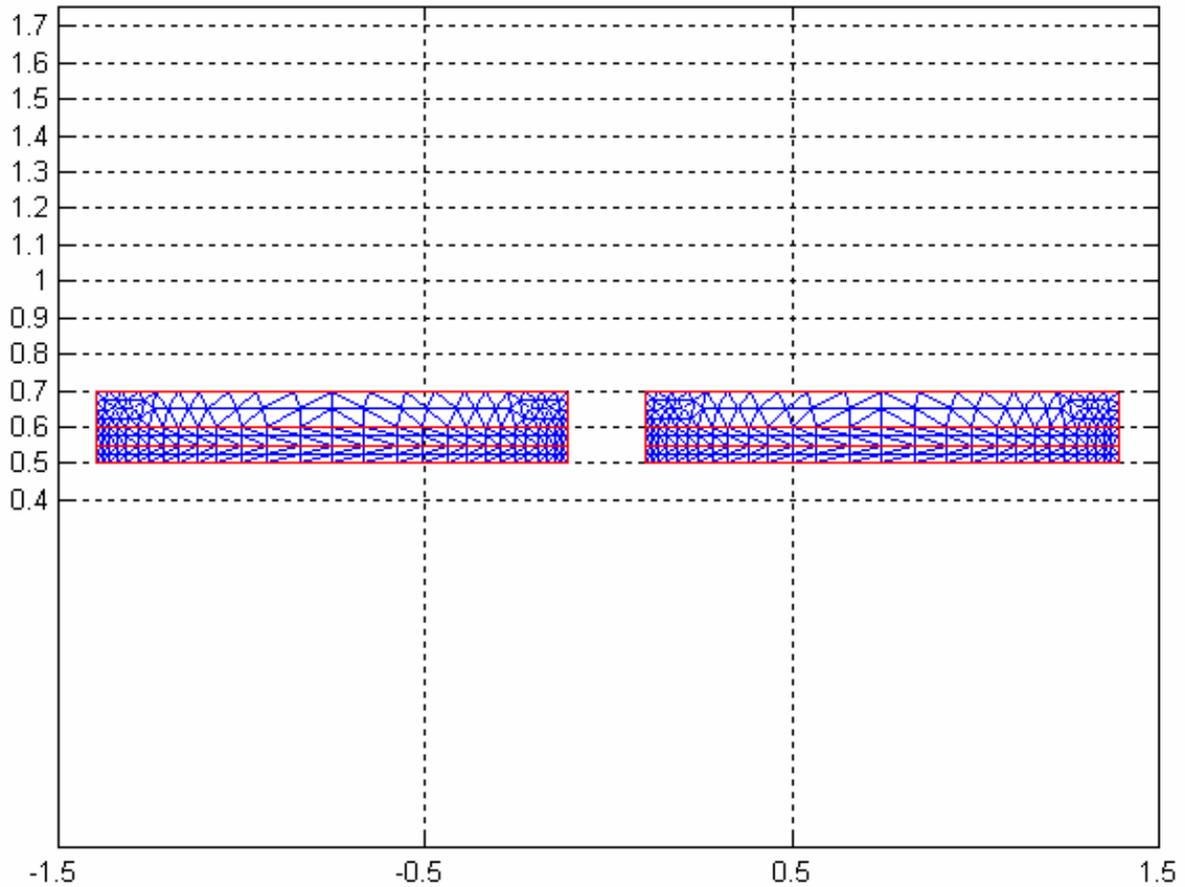


Figure 4.3 : Le maillage

4.3.3 Conditions aux limites

La figure 4.4 montre l'interface du logiciel FEMLAB utilisé pour imposer les conditions aux limites de notre problème.

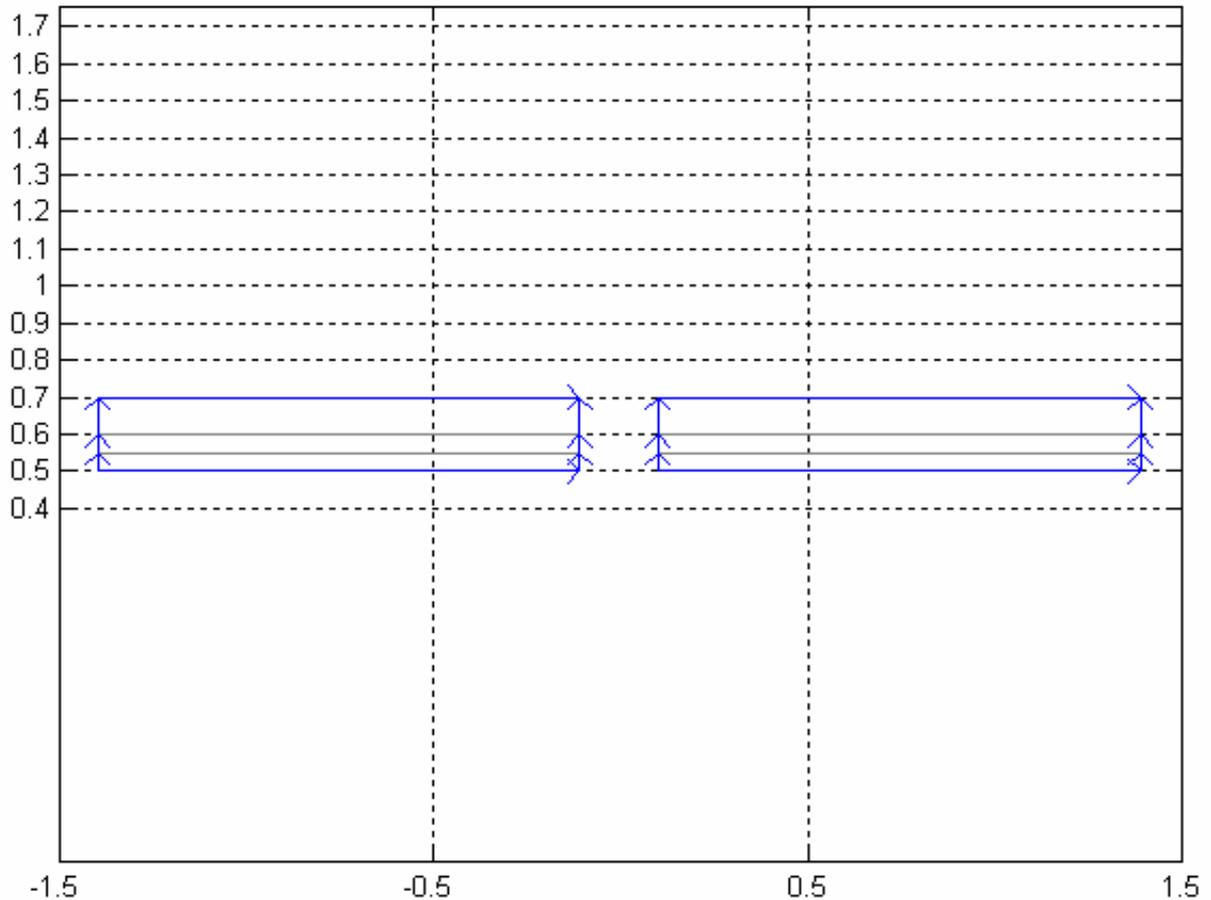


Figure 4.4: Représentation des conditions aux limites Dirichlet ou Neumann

4.4 Résultats obtenus

Nous avons simulé les quatre configurations de notre capteur en supposant le régime stationnaire (permanent), (nous n'avons pas étudié le régime transitoire).

Le capteur est supposé être constitué de trois couches : la couche du verre protecteur, la couche des cellules photovoltaïques et la couche de l'arrière constitué d'une matière plastique qui est le tedlar. Nous avons supposé une isolation latérale et transversale parfaite.

4.4.1 Distribution de la température dans le capteur isolé et non couvert

La figure 4.5 montre la cartographie de la température dans le capteur isolé thermiquement et non couvert (schéma de droite). On remarque que les températures de la cellule et du tedlar sont plus grandes qu'au niveau de la vitre protectrice.

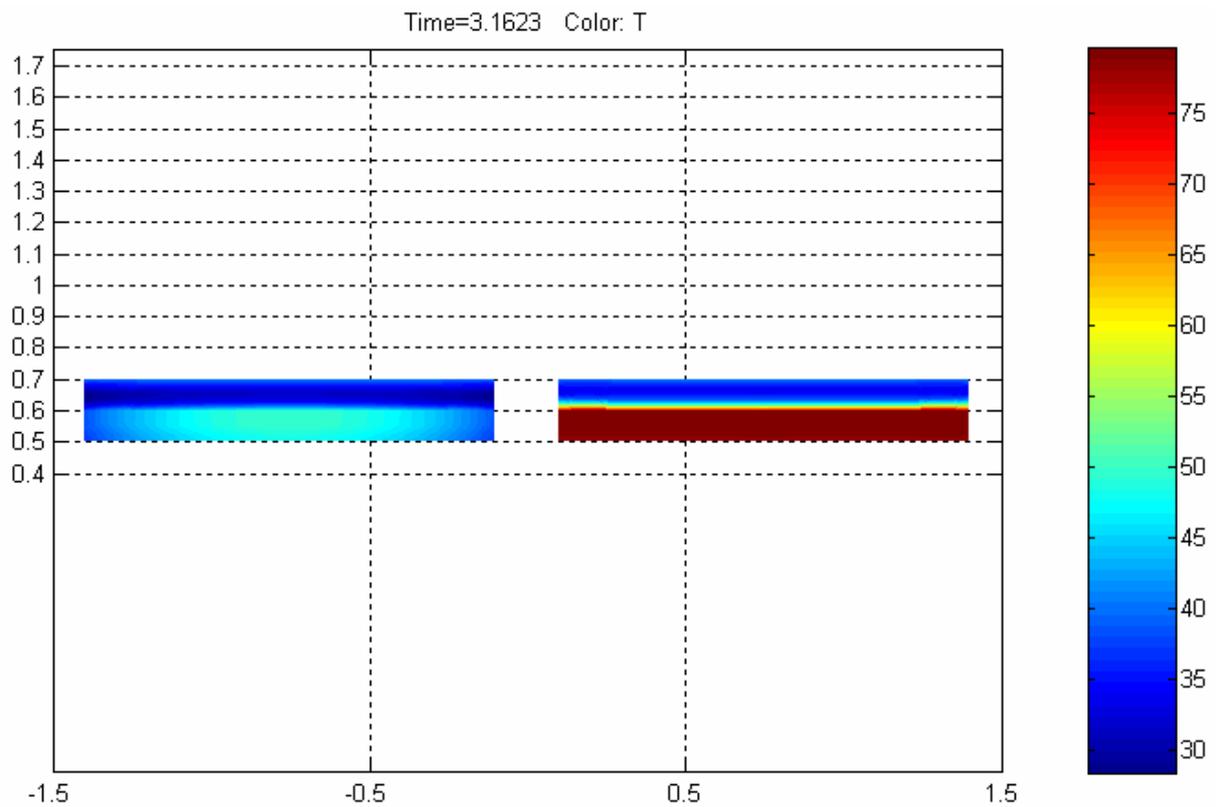


Figure 4.5 : Distribution de la température dans le capteur PV isolé (droite) et libre (gauche)

Nous avons fait un Zoom sur les trois couches du capteur photovoltaïque isolé (figure 4-6), nous remarquons que la température de la cellule est légèrement plus grande que celle de la face du tedlar, ceci s'explique par le fait que la cellule photovoltaïque est un générateur thermique.

L'ordre de grandeur des températures est montré sur la figure 4.5 et 4.6, la température de la cellule du capteur isolé thermiquement peut atteindre les 80°C.

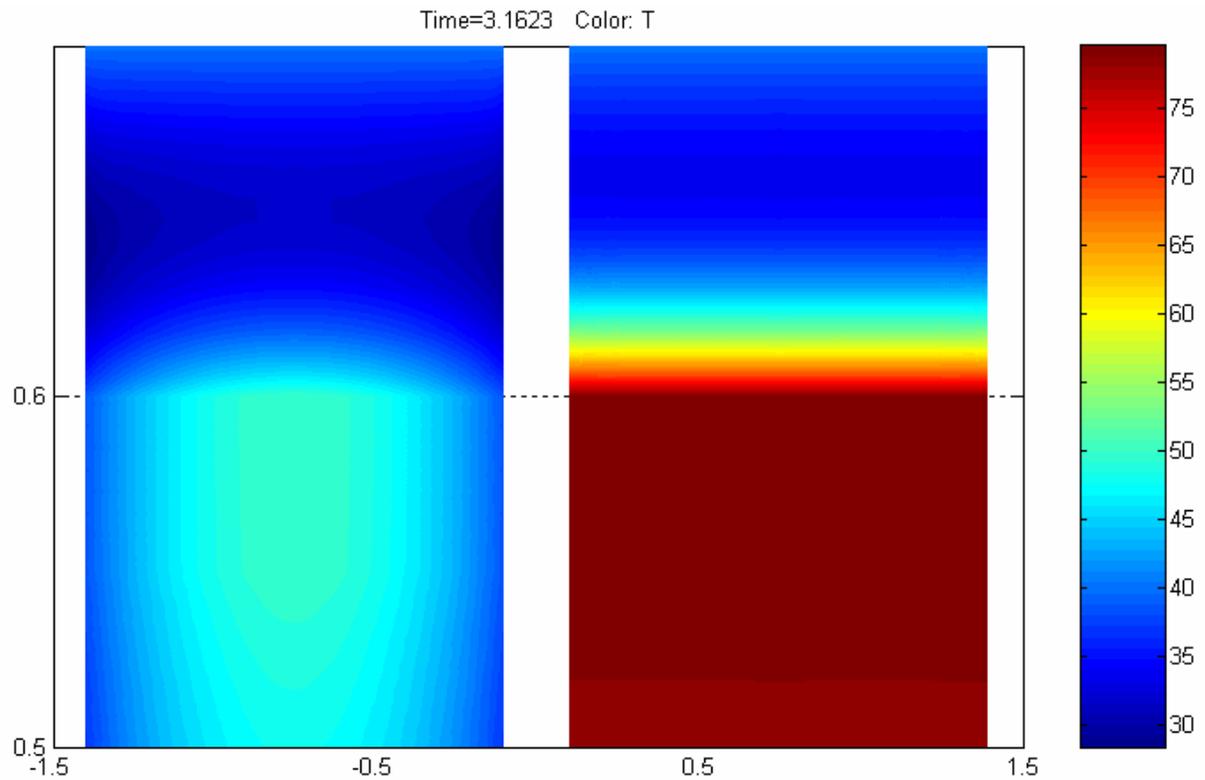


Figure 4.6 : Zoom pour le capteur PV isolé (droite) et libre (gauche)

Pour ce qui concerne le capteur photovoltaïque non isolé (Figure 4.5 à gauche et 4.6 à gauche) on remarque que:

- premièrement la distribution de la température est la même que dans le capteur isolé c'est-à-dire que la température dans la couche de silicium est plus grande que la température dans la face de tedlar et la face avant pour les raisons évoquées.
- L'ordre de grandeur des températures est de l'ordre de 50°C au niveau de la cellule.
- Les températures à gauche et à droite du capteur sont plus faibles car le capteur est libre et non isolé.

4.4.2 Distribution de la température dans le capteur isolé et couvert de vitre

Nous avons simulé le comportement thermique du capteur isolé thermiquement et avec une vitre supplémentaire au dessus (à 2cm).

Les résultats trouvés (voir Figure 4.7) montrent une augmentation des températures dans toutes les couches du capteur et particulièrement sur sa face avant. Ceci peut être expliqué par l'effet de serre causé par l'ajout de la vitre qui piège les rayons solaires.

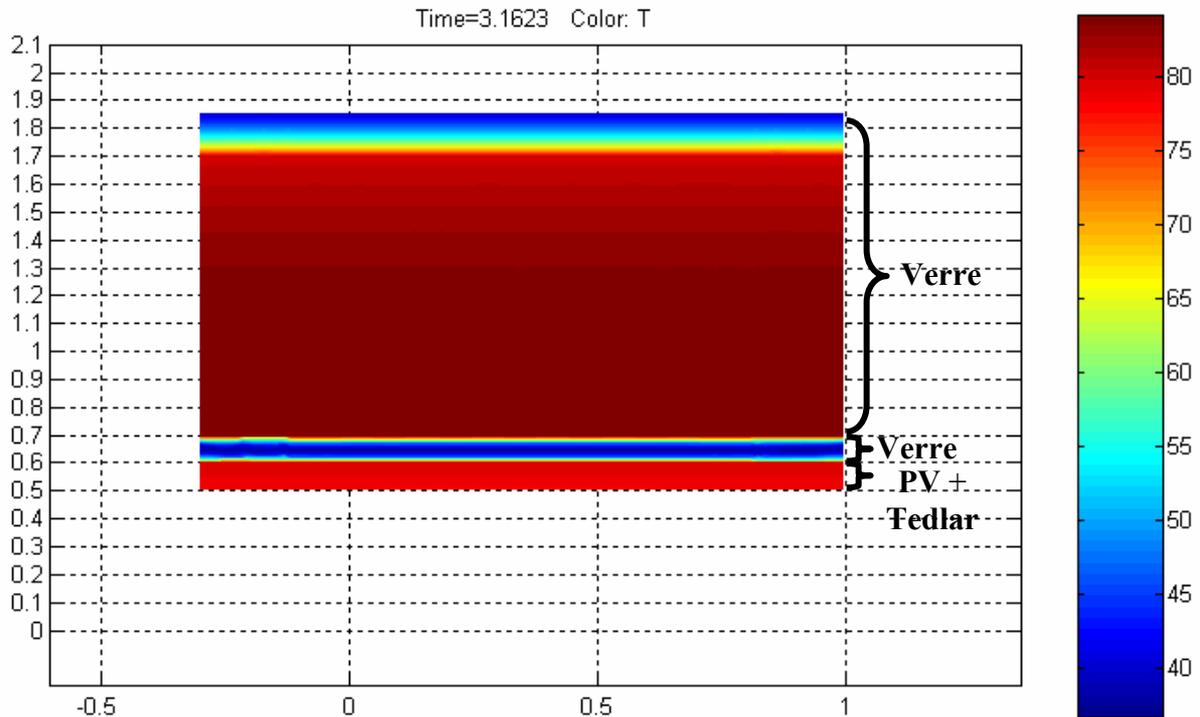


Figure 4.7 : Modèle thermique PV+ verre

4.4.3 Distribution de la température dans le capteur hybride et non couvert

Nous avons simulé pour la troisième configuration le capteur dit hybride qui est constitué du capteur isolé thermiquement à l'intérieur duquel est collé un échangeur de chaleur constitué de tubes de 8mm de diamètre intérieur.

La figure 4.8 montre la distribution de la température dans les différentes couches du capteur hybride en régime établi (régime stationnaire) avec fluide caloporteur (de l'eau) immobile pendant la durée de la simulation.

Nous remarquons que la température de sortie du fluide atteint les 40°C au bout de quelques secondes pour une température d'entrée fixée à 20°C ce qui montre le gain en énergie thermique réaliser.

En même temps la température de la cellule a chuté aux alentours de 45°C. Rappelons qu'elle dépassait les 70°C dans la première configuration dans laquelle il n'y avait pas d'échangeur. Il y a eu donc un refroidissement du capteur.

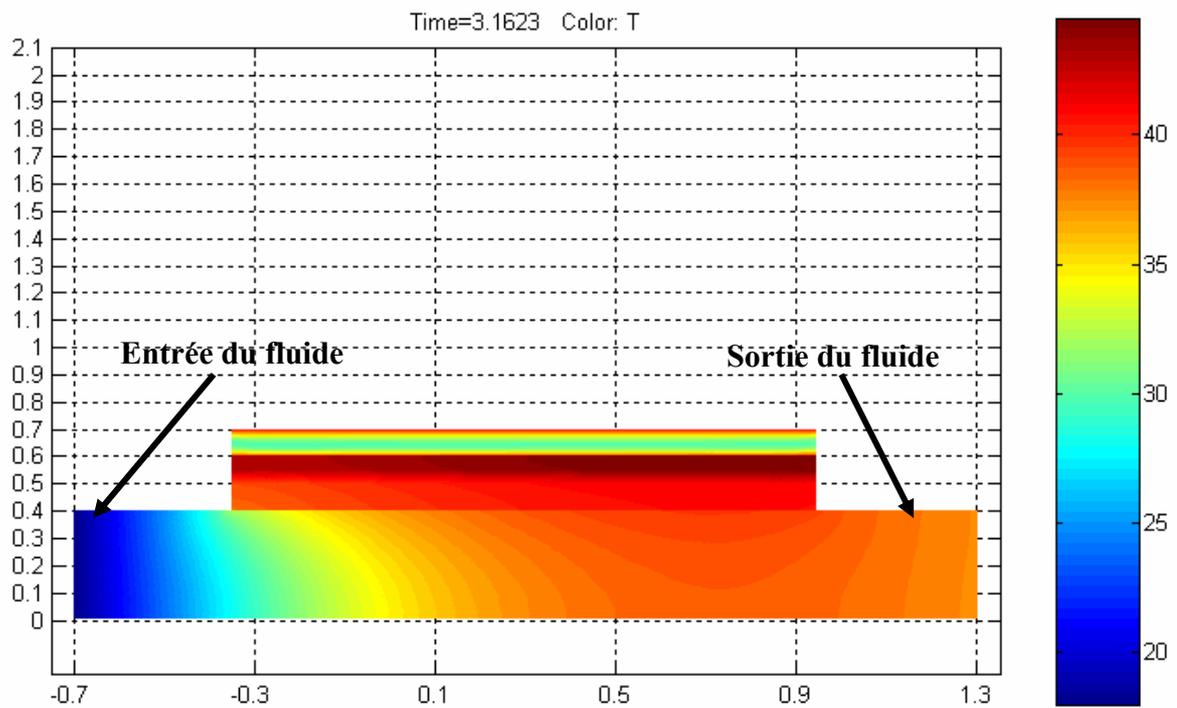


Figure 4.8 : Distribution de la température dans le capteur hybride

4.4.4 Distribution de la température dans le capteur hybride couvert

La dernière configuration consiste dans l'ajout d'une vitre au capteur hybride. Nous avons obtenu la distribution de température donnée sur la figure 4.9.

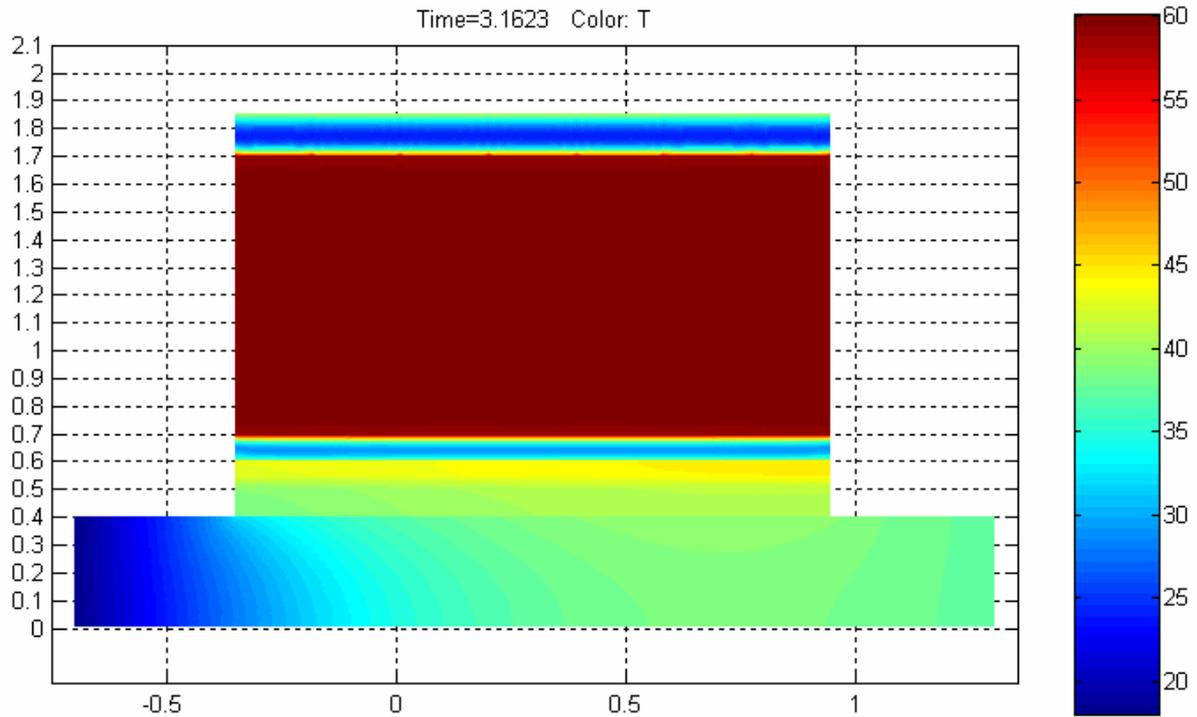


Figure 4.9 : Cas de circulation de l'eau +vitre

On remarque en premier lieu que la température de sortie est plus grande par rapport au cas du capteur hybride sans vitre et ceci pour la même température d'entrée.

La température de la cellule est plus faible par rapport au cas ou on n'avait pas d'échangeur de chaleur, cette configuration améliore donc les performances thermiques du capteur hybride tout en refroidissant la température de la cellule du capteur.

Chapitre 5

Etude expérimentale

5.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'étudier expérimentalement le capteur solaire hybride. Pour cela nous avons réalisé un prototype de capteur hybride à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa et nous avons entamé des mesures de températures, de puissance électrique et de rayonnement sur une période de temps qui nous a permis la détermination pratique de toutes les caractéristiques électriques et thermiques de ce capteur.

Nous avons mené notre étude expérimentale en deux étapes : La première a été celle du capteur hybride sans échangeur de chaleur et la deuxième avec, afin de transférer la chaleur dans le dispositif qui va échanger la chaleur produite par le capteur avec un fluide caloporteur.

Le relevé de la caractéristique $I(V)$ des deux capteurs à chaque étape nous a permis de comparer les performances électriques du capteur hybride par rapport à un capteur photovoltaïque pilote laissé libre sur la même structure.

5.2 Description du banc d'essai

L'étude expérimentale a pour but de déterminer en premier lieu la distribution de la température du capteur hybride et de voir son influence sur la puissance électrique produite par le capteur. Pour cela nous avons mis sur une seule structure un capteur photovoltaïque de mêmes caractéristiques que le capteur utilisé pour réaliser le capteur hybride et nous avons étudié les deux capteurs.

La figure 5.1 montre une vue de dessus des deux capteurs disposés l'un à côté de l'autre sur une même structure : le capteur hybride dans une enceinte qui lui offre une isolation thermique, et le capteur photovoltaïque non isolé thermiquement de mêmes caractéristiques.

Les deux capteurs sont orientés vers le sud avec une inclinaison en fonction de l'attitude du lieu.

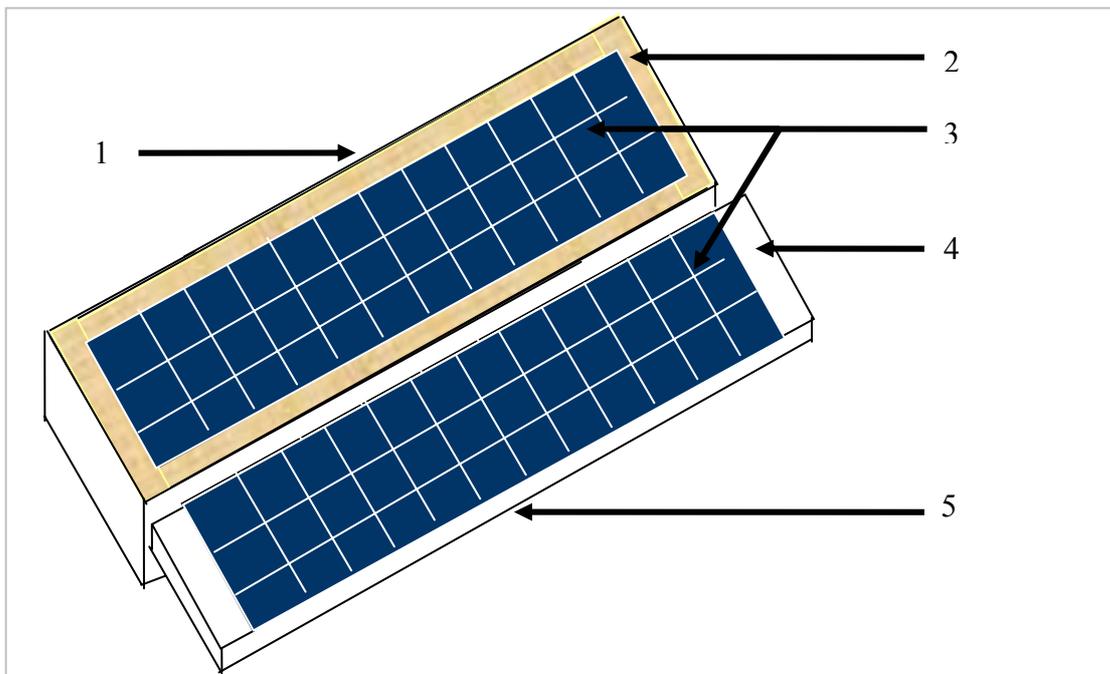


Figure 5.1 : Vue de dessus des deux capteurs

Avec :

- 1- Le capteur hybride.
- 2- Isolation thermique.
- 3- Cellules photovoltaïques.
- 4- Structure en aluminium.
- 5- le capteur photovoltaïque témoin.

5.2.1 Caractéristiques du site de Ghardaïa

Latitude : 32,36°

L'altitude : 450 m

Longitude : 3,81°

La figure 5.2 est une photo prise au sein du Laboratoire à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables à Ghardaïa des deux capteurs photovoltaïques de mêmes caractéristiques utilisées dans notre étude.



Figure 5.2 : Photo des deux capteurs photovoltaïques utilisés

5.2.2 Composition du banc d'essai

Le capteur hybride est un capteur photovoltaïque logé dans une enceinte en métal qui contient deux types d'isolations thermiques :

- Isolation latérale en laine de verre de 2cm
- Isolation au dessous du capteur photovoltaïque en laine de verre et en polystyrène de respectivement 2cm et 3cm.

Le deuxième capteur est un capteur photovoltaïque classique de mêmes caractéristiques que celui utilisé pour former le capteur hybride. Il est laissé libre pour comparer ces performances électriques, entre autres son rendement électrique avec celui du capteur hybride.

5.2.3 Dispositif de mesures

Nous avons utilisé une acquisition de données de type FLUKE HYDRA séries II N° 2625 A pour acquérir l'ensemble des paramètres.

La mesure des températures a été faite par des PT100 RTD de résolution : 0.02°C

Le rayonnement global a été mesuré par un pyranomètre de type Kipp and Zonen de coefficient : 0,00000457 V.m²/W

Les deux capteurs sont en circuit fermé sur une charge (résistance de 1 Kilo ohm).

5.3 Relevé de la caractéristique I (V) des capteurs

Nous avons utilisé une charge électronique de type PVPM 2540C (figure 5.3) pour caractériser les deux capteurs et déterminer leurs paramètres électriques pour pouvoir comparer leurs performances.



Figure 5.3 : Charge électronique permettant de caractériser les capteurs photovoltaïques

Cet appareil permet de déterminer tous les paramètres internes et permet de tracer la caractéristique I (V) du capteur photovoltaïque. La figure 5.4 montre l'interface graphique de cet appareil.

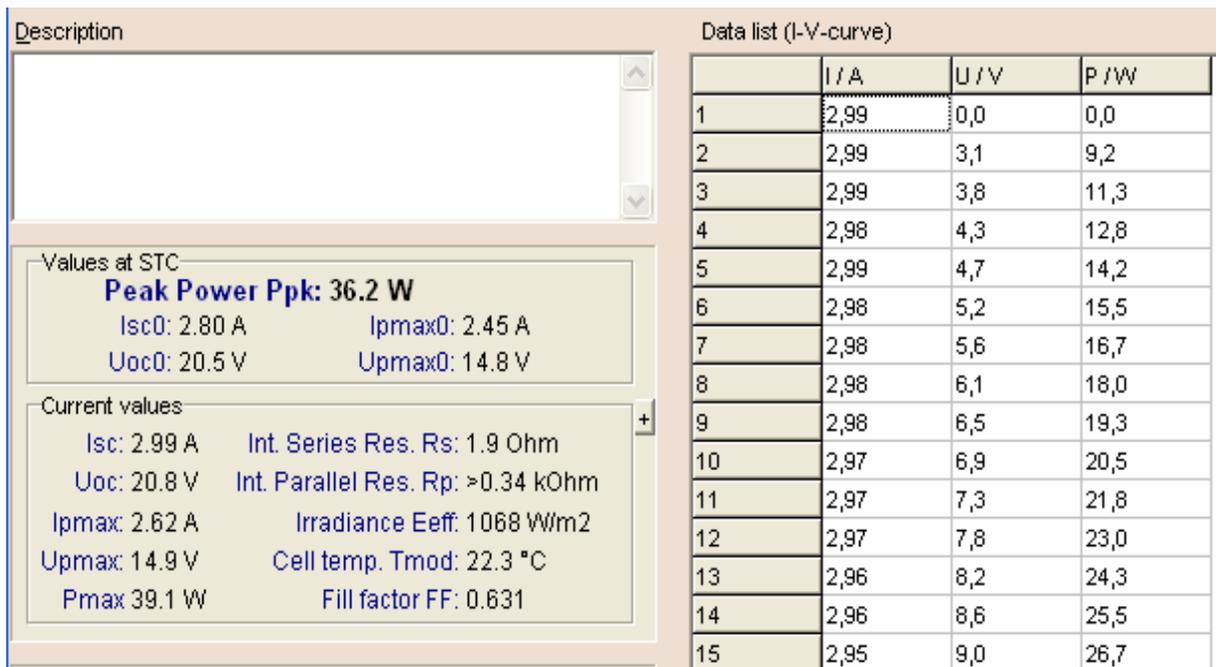


Figure 5.4 : Interface graphique de la charge électronique

5.4 Paramètres électriques du capteur

La caractéristique du capteur photovoltaïque utilisé est montrée sur la figure 5.5. C'est une caractéristique obtenue avant la réalisation du capteur hybride qui montre les différents paramètres internes du capteur.

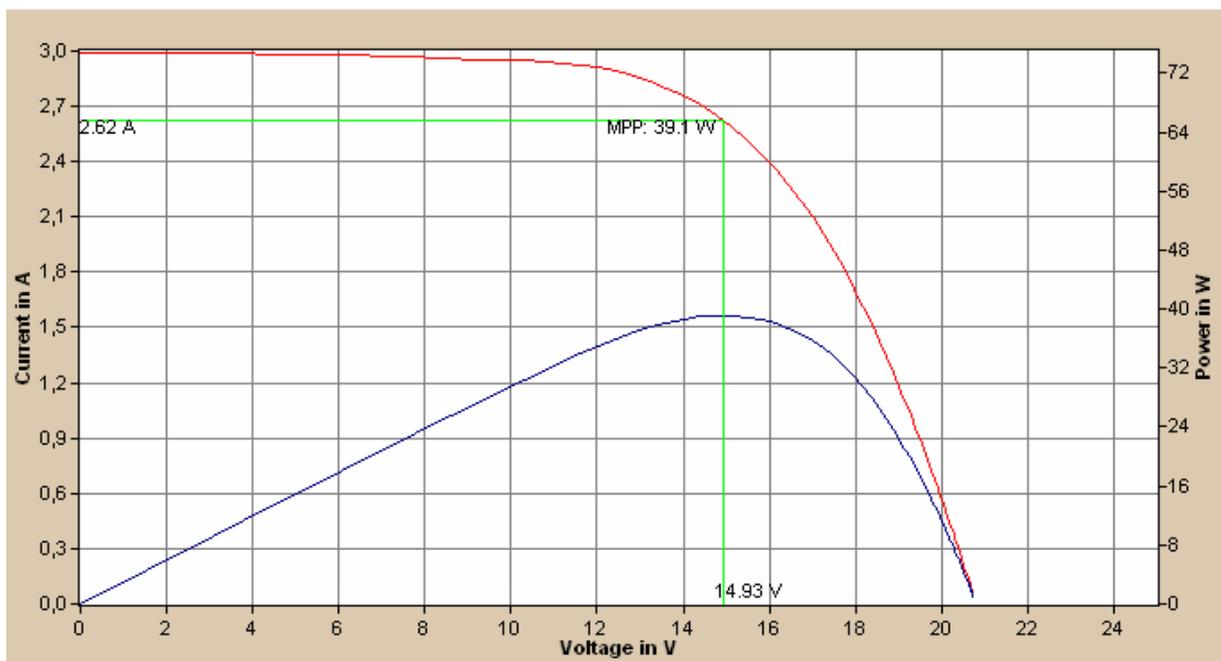


Figure 5.5 : Caractéristique du capteur hybride avant le début des essais

Les capteurs photovoltaïques utilisés sont identiques et sont au silicium monocristallin, avec les paramètres apparaissant dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Paramètres des capteurs photovoltaïques utilisés avant le début des essais

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : R_S	1.9 Ohm
Résistance parallèle : R_p	0.34 kOhm
Eclairement : G	1068 W/m ²
Fill factor : FF	0.631
Courant de court circuit : I_{sc}	2.99 A
Tension de circuit ouvert : U_{oc}	20.8 V
Courant maximum : I_{pmax}	2.62 A
Tension maximum : U_{pmax}	14.9 V
Puissance maximum : P_{max}	39.1W

Les dimensions du capteur sont indiquées sur la figure 5.6. La surface du module est de 0.42 m².

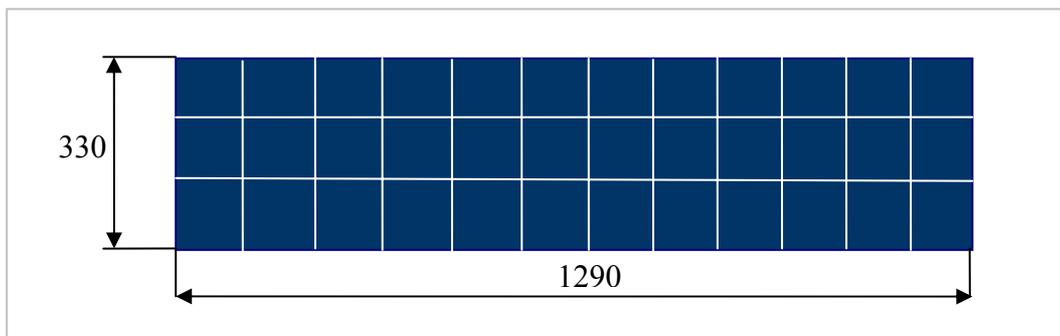


Figure 5.6 : Dimensions du capteur photovoltaïque en mm

5.5. Dipositif expérimental

Nous avons étudié le capteur solaire hybride dans les quatre configurations ci-dessous et nous avons comparé pour chaque cas les performances électriques des deux capteurs à l'aide de la charge électronique qui nous a permis de tracer à chaque fois la caractéristique $I(V)$ des deux capteurs:

-Configuration1 : Capteur solaire photovoltaïque dont la face arrière est isolée thermiquement et la face avant est non recouverte (figure 5.7); nous avons mesuré dans ce cas :

- . Les températures (ambiante, de la cellule, de la face avant et de la face arrière) du capteur hybride.
- . La température de la cellule du capteur photovoltaïque libre.
- . Le rayonnement global.
- . La puissance électrique de sortie (courants-tensions) à travers une résistance.

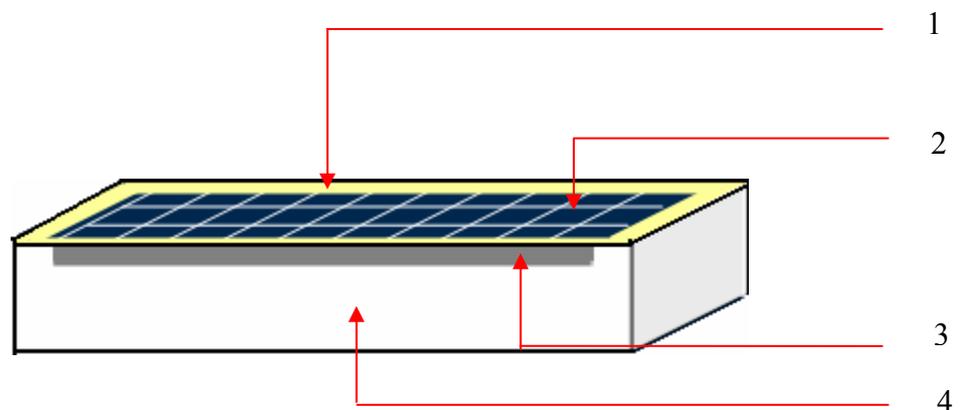


Figure 5.7 : Capteur solaire non couvert

- Avec :
- 1- Isolation thermique latérale
 - 2- Panneau solaire photovoltaïque
 - 3- Support métallique
 - 4- Isolation thermique au dessous du panneau photovoltaïque

-Configuration 2 : Capteur solaire photovoltaïque dont la face arrière est isolée thermiquement et la face avant est couverte d'une vitre (figure 5.8), nous avons mesuré dans ce cas :

- . Les températures (ambiante, de la cellule, de la face avant et de la face arrière) du capteur hybride.
- . La température de la cellule du capteur photovoltaïque libre.
- . Le rayonnement global
- . La puissance électrique de sortie (courants-tensions) à travers une résistance

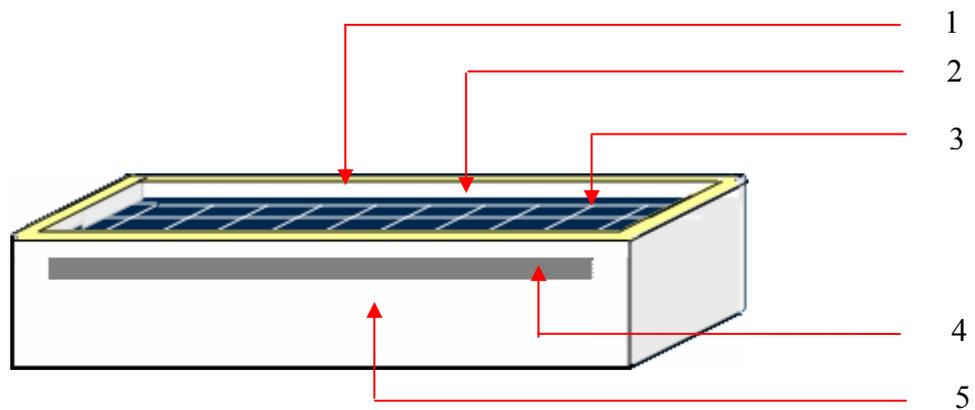


Figure 5.8 : Capteur solaire couvert d'une vitre

- Avec :
- 1- Isolation thermique latérale
 - 2- Vitre
 - 3- Panneau solaire photovoltaïque
 - 4- Support métallique
 - 5- Isolation thermique au dessous du panneau photovoltaïque

-Configuration 3 : Capteur solaire photovoltaïque dont la face avant est ouverte (figure 5.9), et nous avons placé un échangeur de chaleur sur la face arrière du capteur puis nous avons mesuré:

- . Les températures ambiantes, d'entrée et de sortie l'eau, de la face avant et de la face arrière du capteur hybride.
- . Le rayonnement global
- . La puissance électrique de sortie (courants-tensions) à travers une résistance.

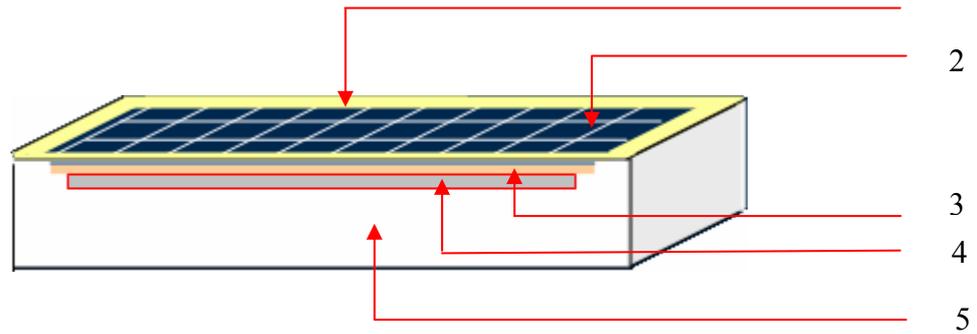


Figure 5.9 : Capteur solaire non couvert avec échangeur de chaleur

- 1- Isolation thermique latérale
- 2- Panneau solaire photovoltaïque
- 3- Plaque en cuivre
- 4- Tube en cuivre
- 5- Isolation thermique au dessous du panneau photovoltaïque

-Configuration 4 : Capteur solaire photovoltaïque dont la face avant est recouverte d'une vitre (figure 5.10), et nous avons placé un échangeur de chaleur sur la face arrière du capteur puis nous avons mesuré:

- . Les températures ambiantes, d'entrée et de sortie de l'eau, de la face avant et de la face arrière du capteur hybride.
- . Le rayonnement global
- . La puissance électrique de sortie (courants-tensions) à travers une résistance.

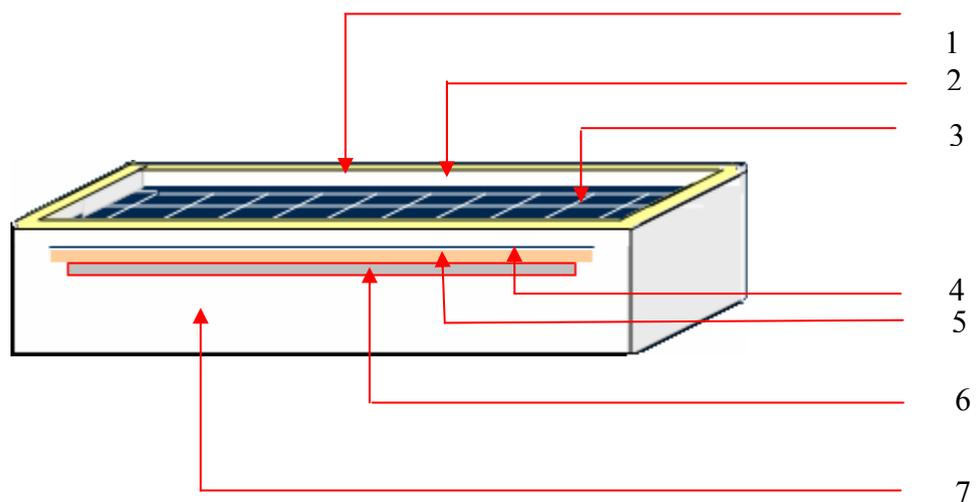


Figure 5.10 : Capteur solaire recouvert avec échangeur de chaleur

- 1- Isolation thermique latérale
- 2- Vitre

- 2- Panneau solaire photovoltaïque
- 4- Vue latérale du panneau photovoltaïque
- 5- plaque en cuivre
- 6- Tube en cuivre
- 7- Isolation thermique au dessous du panneau photovoltaïque

5.6 Performances électriques et thermiques du capteur isolé thermiquement, sans échangeur et sans vitre

5.6.1 Distribution de la température

Dans ce premier cas nous avons laissé le capteur avec son isolation sans vitre et nous avons réalisé un maillage de deux point dans chaque couche du capteur (figure 5.11)

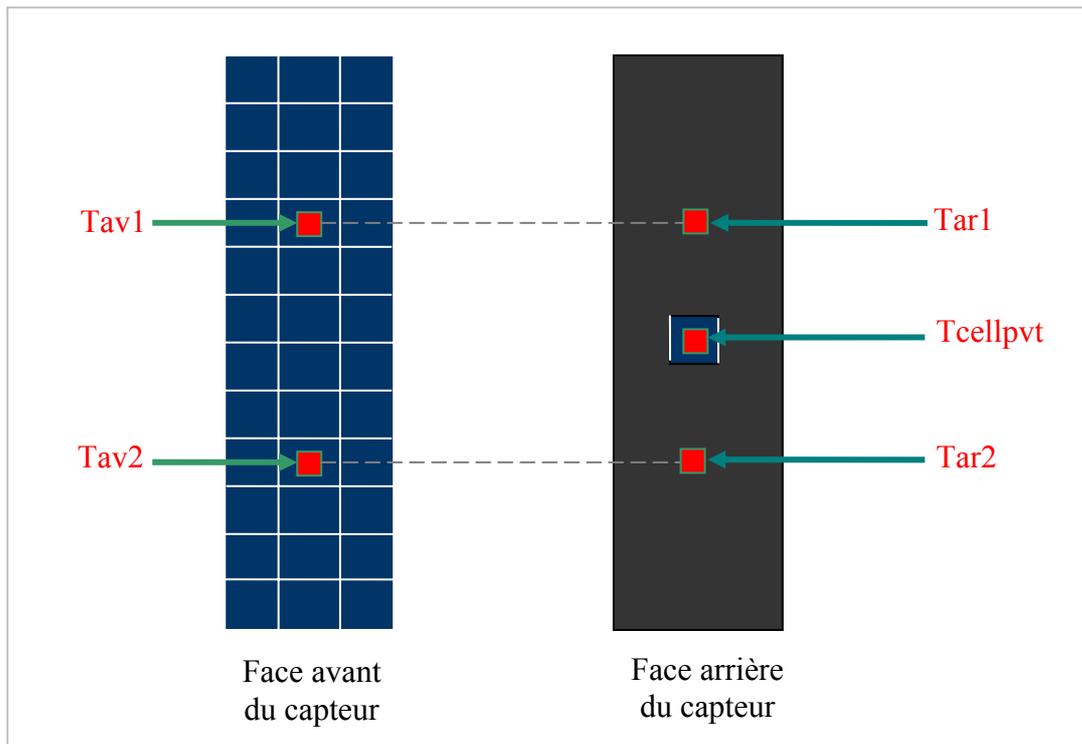


Figure 5.11 : Maillage de température pour le capteur sans vitre et sans échangeur

L'objectif du maillage est de déterminer la distribution de la température sur les deux faces du capteur (face avant et face arrière) (voir tableau 5.12).

Telle que :

- . T_{av1} : Température de la face avant (sur la vitre) du premier point du maillage du capteur isolé.
- . T_{av2} : Température de la face avant (sur la vitre) du deuxième point du maillage du capteur isolé.
- . $T_{cellpvt}$: Température de la cellule du capteur photovoltaïque isolé.
- . T_{ar1} : Température de la face arrière du premier point du maillage du capteur isolé.
- . T_{ar2} : Température de la face arrière du deuxième point du maillage du capteur isolé.

La figure 5.12 montres une photo prise pour cette configuration.

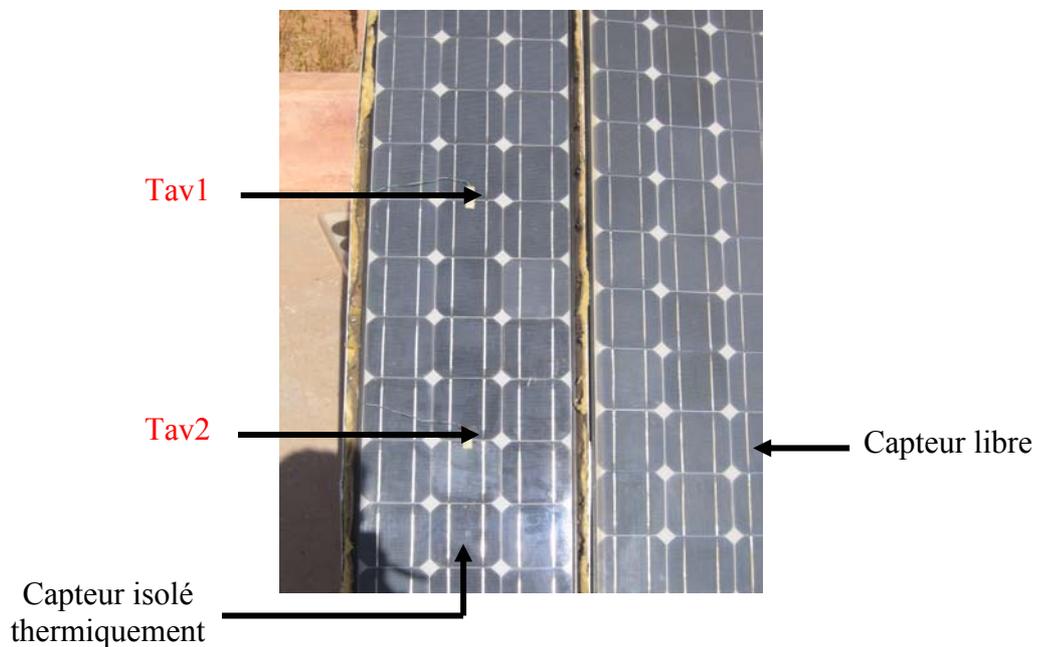


Figure 5.12 : Photo montrant le maillage de la température pour le capteur hybride sans vitre et sans échangeur

L'utilisation de deux points pour chaque face nous a permis de conclure sur le fait que la température est homogène sur toute une face du capteur.

Tableau 5.2 : Distribution de la température dans le capteur isolé et non vitré

Temps (hh:mn)	Ta (°C)	Tav1 (°C)	Tav2 (°C)	Tcellpvt (°C)	Tar1 (°C)	Tar2 (°C)	G (w/m²)
08:03	7,19	4,0457	3,6595	4,123	4,2711	5,4043	52,17068
08:13	7,98	4,6767	4,387	4,8956	4,9729	6,6024	63,06565
08:23	8,94	5,327	5,1017	5,6748	5,7199	8,0394	72,23851
08:33	9,78	5,9003	5,7328	6,4027	6,422	8,974	82,55799
08:43	10,69	6,7763	6,538	7,2661	7,2854	9,915	96,89059
08:53	11,32	7,846	7,6204	8,4196	8,4326	11,238	181,74179
09:03	12,11	16,661	11,612	15,44	17,23	14,626	446,03939
09:13	12,37	23,932	22,456	25,94	26,173	-	502,80088
09:23	12,29	27,152	27,897	31,699	30,978	-	557,26477
09:33	12,53	28,617	30,225	34,107	32,809	-	607,72429
09:43	12,59	29,473	31,432	35,855	34,302	-	657,02407
09:53	13,11	31,575	33,555	38,045	36,193	-	704,02626
10:03	13,67	33,393	35,777	40,712	38,683	43,036	745,31729
10:13	14,42	36,628	38,858	44,059	41,975	42,952	789,45295
10:23	14,49	38,605	41,259	46,548	44,332	46,32	827,87746
10:33	15,01	41,715	44,658	50,083	47,722	49,365	865,71116
10:43	15,08	43,636	46,802	52,211	49,822	50,396	897,81182
10:53	15,61	44,456	47,806	53,72	51,179	51,46	931,64114
11:03	15,83	45,271	48,511	54,896	52,27	52,426	960,87527
11:13	16,19	46,137	49,085	55,164	52,407	52,322	990,10941
11:23	16,46	46,489	49,861	56,065	53,236	53,354	1016,49891
11:33	16,86	47,963	51,375	57,824	54,811	54,928	1036,56455
11:43	16,99	49,235	52,929	59,296	56,327	56,503	1055,47046
11:53	17,32	50,853	54,915	61,495	58,577	58,93	1070,9628
12:03	17,73	51,147	55,314	62,078	59,035	59,512	1065,79869
12:13	17,89	50,39	54,36	61,41	58,308	58,819	1102,49453
12:23	18,12	50,82	54,752	61,45	58,171	58,779	1106,49891
12:33	18,53	53,419	57,615	63,991	60,788	61,332	1111,66302
12:43	18,83	52,381	56,438	63,886	60,664	61,116	1138,03063
12:53	19,11	54,562	58,328	65,256	62,013	62,334	1135,16411
13:03	19,41	54,53	58,093	65,243	61,921	62,078	1139,7593
13:13	19,81	55,268	59,211	66,731	63,362	63,513	1136,89278
13:23	19,63	55,922	60,042	66,974	63,709	64,083	1137,46171
13:33	19,83	54,883	58,936	66,364	63,139	63,447	1125,99562
13:43	19,71	53,034	56,824	64,528	61,358	61,423	1124,83589
13:53	20,01	53,648	57,667	64,994	61,856	62,196	1070,9628
14:03	19,95	52,42	56,621	63,925	60,801	61,391	1016,49891
14:13	19,64	49,822	53,831	60,828	57,779	58,446	909,2779
14:23	19,99	49,946	53,511	59,643	56,523	56,863	1086,43326

14:33	19,94	47,611	51,029	57,615	54,804	55,079	1011,90372
14:43	19,75	47,487	50,944	57,38	54,562	54,771	919,01532
14:53	19,84	46,881	50,618	56,758	53,994	54,419	800,35011
15:03	19,85	44,782	48,1	53,295	50,736	51,297	837,04595
15:13	19,87	43,811	46,998	52,165	49,665	50,096	808,94967
15:23	20,02	43,434	46,457	51,388	49,072	49,307	736,12691
15:33	20,14	42,06	44,971	49,737	47,8	48,322	585,36105
15:43	20,58	41,767	44,541	48,713	46,796	47,239	632,93217
15:53	20,45	41,044	44,033	48,987	46,978	47,474	706,89278
16:03	20,44	39,932	42,444	47,004	45,14	45,44	662,18818
16:13	20,32	37,064	39,574	44,033	42,242	42,665	579,62801
16:23	20,19	37,187	39,138	42,75	41,109	41,292	651,85996
16:33	20,15	35,549	37,707	41,37	39,776	40,029	545,79869
16:43	20,14	35,147	36,999	40,4	38,93	39,086	528,03063
16:53	19,92	32,529	34,361	37,486	36,277	36,667	428,84026
17:03	19,34	28,896	30,336	33,153	32,296	32,692	271,75055
17:13	19,35	26,899	27,936	29,94	29,103	29,376	380,10941
17:23	19,2	26,802	28,001	30,115	29,369	29,674	266,01751
17:33	18,95	24,625	25,609	27,372	26,815	27,139	192,06127
17:43	18,99	24,029	24,89	26,419	25,869	26,057	195,50109
17:53	18,84	22,592	23,31	24,696	24,288	24,528	176,58206
18:03	18,3	20,068	20,547	21,673	21,446	21,724	74,53173
18:13	17,93	17,902	18,154	18,982	18,839	19,059	41,8512
18:23	17,53	16,177	16,273	16,861	16,79	16,958	16,05295
18:33	17,15	14,949	14,956	15,363	15,343	15,472	1,14663
18:43	16,99	14,316	14,181	14,407	14,446	14,523	0
18:53	16,61	13,542	13,322	13,587	13,664	13,697	0
19:03	16,48	13,393	13,154	13,296	13,374	13,4	0
19:13	16,26	13,316	13,083	13,199	13,296	13,335	0
19:23	16,19	13,335	13,096	13,199	13,29	13,316	0
19:33	15,9	13,103	12,896	13,051	13,154	13,187	0
19:43	15,76	12,896	12,651	12,761	12,864	12,89	0
19:53	15,59	12,896	12,625	12,683	12,786	12,825	0
20:03	15,35	12,457	12,289	12,451	12,528	12,567	0
20:13	15,08	11,812	11,702	11,947	11,98	12,044	0
20:23	14,63	11,173	10,986	11,276	11,341	11,347	0
21:23	13,73	9,406	9,103	9,2706	9,3802	9,3093	0
22:23	13,34	10,812	10,593	10,709	10,773	10,818	0
23:23	12,69	10,012	9,793	9,877	9,909	9,973	0

5.6.2 Température de cellule du capteur isolé thermiquement et du capteur libre

Nous avons mesuré aussi la température de la cellule du capteur photovoltaïque pour la comparer avec celle du capteur isolé thermiquement. Les résultats de mesures sont dans le tableau (5.3).

Tableau 5.3 : Comparaison entre les températures de cellules du capteur isolé sans vitre et sans échangeur et du capteur libre

Temps (hh :mn)	Ta (°C)	Tcellpv (°C)	Tcellpvt (°C)	G (w/m²)
09:07	21,53	34,179	39,463	445,47046
09:17	22,24	34,568	43,531	490,76586
09:27	22,25	34,068	45,681	536,03939
09:37	22,09	35,127	47,976	591,66302
09:47	22,42	35,894	49,946	630,65646
09:57	22,58	35,822	50,377	680,52516
10:07	22,98	37,025	51,362	720,65646
10:17	23,5	37,824	53,04	754,48578
10:27	23,98	39,073	55,131	790,61269
10:37	24,51	39,932	56,968	825,57987
10:47	25,02	41,259	58,563	856,54267
10:57	25,1	41,038	61,116	890,35011
11:07	25,24	44,3	64,056	917,30853
11:17	25,83	44,189	64,941	948,84026
11:27	26,39	47,969	68,712	961,4442
11:37	25,75	47,122	69,427	979,80306
11:47	26,61	47,546	71,975	1001,00656
11:57	27,22	52,198	76,168	1015,33917
12:07	27,68	51,617	77,207	1014,77024
12:17	27,88	51,741	78,121	1024,50766
12:27	27,82	52,642	79,339	1046,8709
12:37	27,97	52,799	79,74	1048,03063
12:47	27,98	53,981	80,333	1052,03501
12:57	28,88	56,987	82,783	1060,06565
13:07	29,43	57,34	83,653	1065,22976
13:17	29,88	54,928	82,474	1048,03063
13:27	30,12	57,707	83,521	1019,93435
13:37	30,43	57,353	83,653	1026,80525
13:47	30,65	55,922	82,849	1021,07221
13:57	31,01	58,158	84,148	1003,30416
14:07	30,68	52,733	79,115	994,7046

5.6.3 Tracé de la caractéristique I (V) du capteur isolé et du capteur libre

Nous avons relevé la caractéristique I (V) et les différents paramètres électriques du capteur isolé sans vitre et du capteur photovoltaïque laissé libre.

La figure 5.13 montre la caractéristique I (V) du capteur isolé et la figure 5.14 celle du capteur libre.

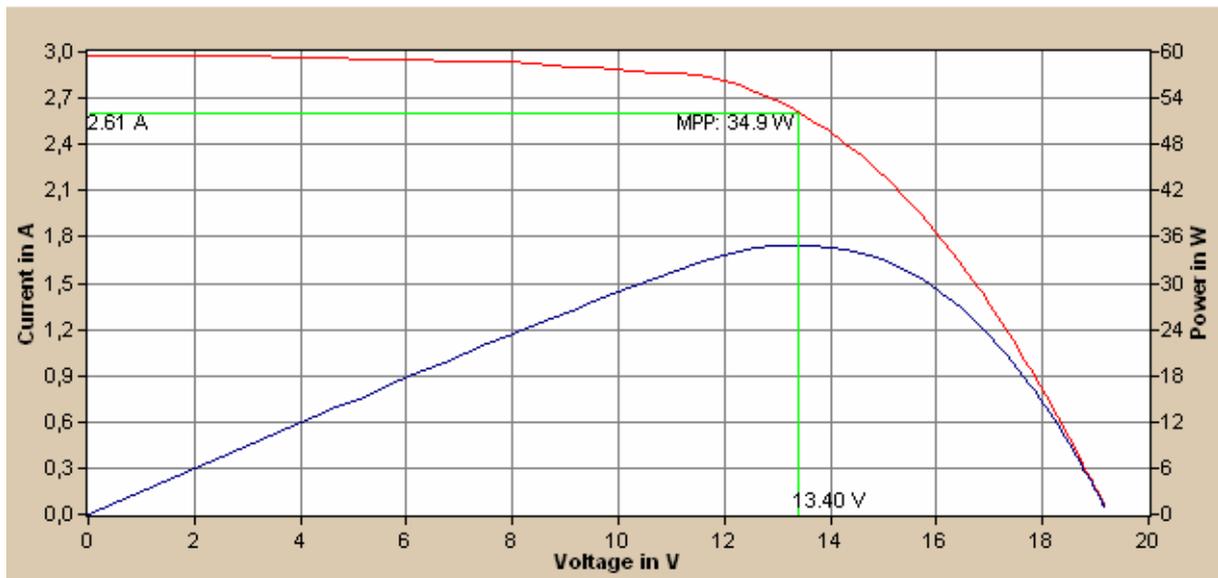


Figure 5.13 : Caractéristique du capteur sans vitre pour la première configuration

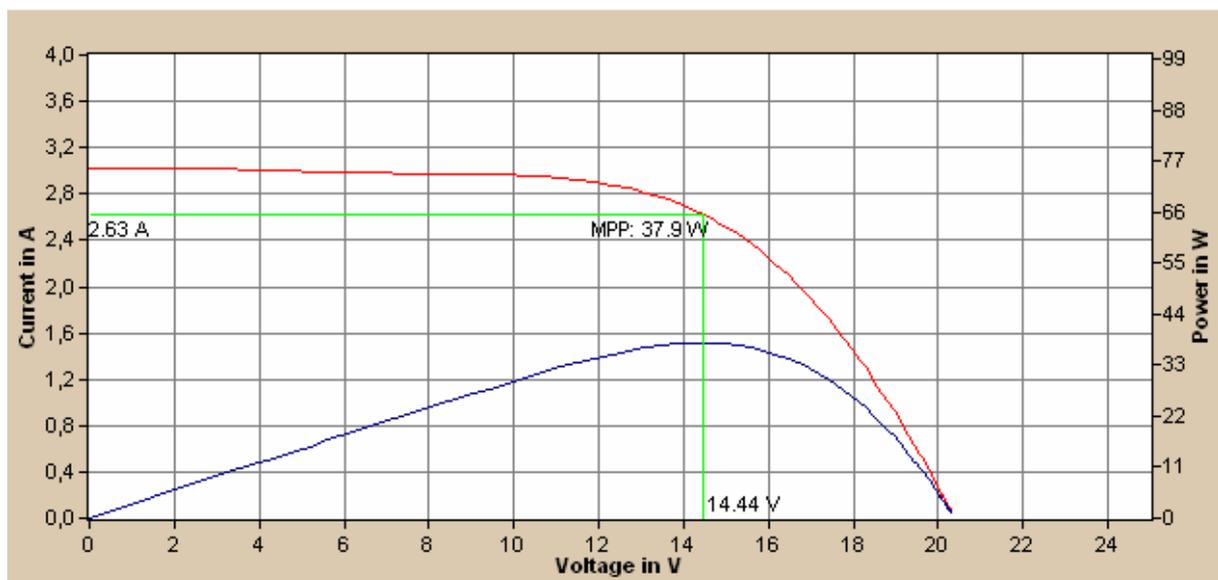


Figure 5.14 : Caractéristiques électriques du capteur libre pour la première configuration

Les tableaux 5.4 et 5.5 montrent respectivement les paramètres électriques des deux capteurs pour la première configuration.

Tableau 5.4 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : RS	2.1 Ohm
Résistance parallèle : Rp	0.31 kOhm
Eclairement : G	1077 W/m ²
Fill factor : FF	0.611
Courant de court circuit : Isc	2.98 A
Tension de circuit ouvert : Uoc	19.2 V
Courant maximum : I _{pmax}	2.61 A
Tension maximum : U _{pmax}	13.4 V
Puissance maximum : P _{max}	34.9W

Tableau 5.5 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque laissé sans isolation

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : RS	2.1 Ohm
Résistance parallèle : Rp	0.32 kOhm
Eclairement : G	1082 W/m ²
Fill factor : FF	0.619
Courant de court circuit : Isc	3.01 A
Tension de circuit ouvert : Uoc	19.2 V
Courant maximum : I _{pmax}	2.63 A
Tension maximum : U _{pmax}	14.4 V
Puissance maximum : P _{max}	37.9W

5.7 Performances électriques et thermiques du capteur isolé thermiquement, sans échangeur et avec vitre supplémentaire

Nous avons ajouté une vitre supplémentaire à 2 cm au dessus du capteur photovoltaïque déjà isolé thermiquement pour voir sans influence sur les performances électriques et thermiques du capteur. La figure 5.15 montre une photo prise pour ce cas de configuration.

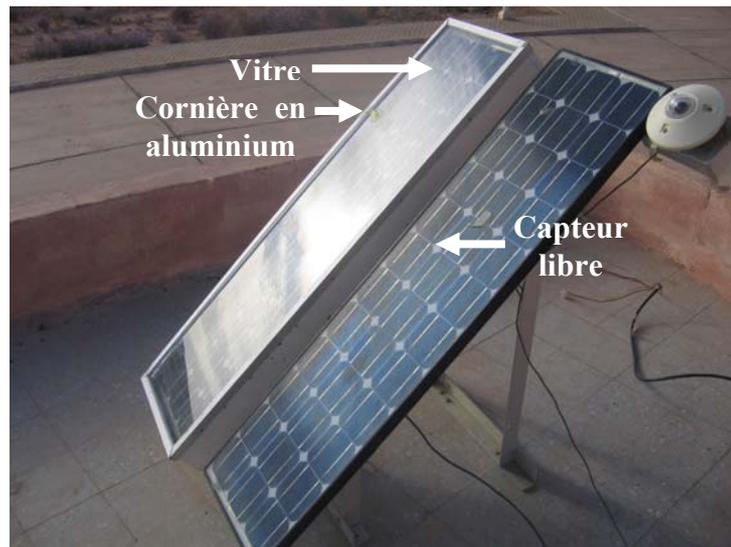


Figure 5.15 : Capteur hybride avec vitre et sans échangeur

5.7.1 Distribution de la température

Nous avons relevé en plus de la température ambiante et de l'éclairement global les températures de chaque face du capteur. Nous avons porté sur le tableau 5.6 les différentes températures mesurées sur les deux faces du capteur vitré.

Tableau 5.6 : Distribution de températures sur les faces du capteur isolé avec vitre et sans échangeur

Temps (hh :mn)	Ta (°C)	Tvitre (°C)	Tavpvt (°C)	Tcell (°C)	Tarpvt (°C)	G (w/m ²)
06:02	15,76	14,723	14,271	14,226	14,284	0
06:12	16,16	15,111	14,562	14,484	14,542	0
06:22	16,17	15,04	14,775	14,73	14,801	0
06:32	16,04	14,917	14,852	14,846	14,911	0

06:42	16,03	14,691	14,872	14,904	14,962	0
06:52	15,92	14,71	14,865	14,898	14,956	0
07:02	16,09	14,794	14,911	14,93	14,994	0
07:12	16,63	15,388	15,169	15,111	15,188	1,71996
07:22	16,83	15,627	15,556	15,466	15,543	8,02648
07:32	17,05	15,892	16,028	15,938	16,015	12,03961
07:42	17,33	16,377	16,584	16,48	16,551	16,05295
07:52	17,63	16,655	17,256	17,139	17,204	29,23851
08:02	17,91	17,288	18,755	18,62	18,587	81,41138
08:12	18,13	17,915	21,026	21,064	20,922	97,46389
08:22	18,34	18,6	23,123	23,362	23,116	121,54267
08:32	18,55	19,273	25,311	25,759	25,396	148,48796
08:42	18,77	20,042	27,528	28,215	27,709	179,44858
08:52	19,13	21,213	30,089	31,121	30,355	224,74836
09:02	19,45	22,346	33,27	34,484	33,542	274,61707
09:12	19,73	23,453	36,667	38,215	37,129	303,8512
09:22	20,02	24,469	39,606	41,519	40,315	324,50766
09:32	20,31	25,473	43,089	45,088	43,622	395,57987
09:42	20,68	26,517	46,737	49,117	47,461	434,00438
09:52	21,05	28,157	51,741	54,366	52,289	571,02845
10:02	21,51	29,817	57,079	60,147	57,818	591,09409
10:12	21,71	31,569	61,77	65,328	62,74	639,25602
10:22	21,83	31,828	65,636	69,841	66,855	733,26039
10:32	22,2	34,263	70,602	75,116	71,751	747,593
10:42	22,25	33,581	73,945	79,003	75,438	787,15536
10:52	22,56	35,419	77,062	82,309	78,7	819,84683
11:02	23,18	36,674	79,339	84,893	81,143	894,37637
11:12	23,52	36,719	82,724	88,601	84,965	786,01751
11:22	23,18	36,726	84,161	90,185	86,311	844,48578
11:32	23,44	37,148	85,513	91,863	87,822	898,38074
11:42	23,75	37,967	87,043	93,371	89,479	874,31072
11:52	23,73	38,475	86,575	93,014	89,142	830,74398
12:02	23,61	37,551	86,014	92,564	88,601	772,25383
12:12	23,6	37,161	85,117	91,454	87,611	734,42013
12:22	23,79	36,427	83,963	90,179	86,383	774,55142
12:32	23,7	36,401	84,26	90,384	86,647	760,78775
12:42	23,65	35,361	82,25	88,475	84,893	695,99562
12:52	23,92	35,523	82,856	89,023	85,381	673,65427
13:02	23,87	36,687	83,172	89,01	85,407	826,71772
13:12	24,19	36,797	84,313	90,278	86,845	705,186
13:22	24,3	35,809	82,981	88,693	85,348	662,18818
13:32	24,01	37,044	82,256	87,842	84,332	873,15098
13:42	24,42	35,186	80,234	85,809	82,685	790,02188
13:52	24,62	36,271	82,731	88,172	84,893	798,05252
14:02	24,16	35,471	80,721	86,726	83,785	566,43326
14:12	24,74	37,285	83,106	88,594	85,539	815,25164
14:22	24,64	36,004	80,096	85,282	82,368	817,54923
14:32	24,83	36,03	79,563	84,873	82,006	629,49672

14:42	25,04	36,427	79,043	84,24	81,354	571,59737
14:52	25,01	36,895	78,924	83,831	81,064	743,01969
15:02	24,87	36,186	78,542	83,482	80,741	749,89059
15:12	25,07	35,471	79,484	84,444	81,762	616,89278
15:22	24,85	35,972	78,029	82,948	80,366	649,56236
15:32	24,77	34,179	74,097	79,187	76,852	431,70678
15:42	24,41	32,796	67,99	72,658	70,372	429,40919
15:52	24,66	32,263	65,367	69,631	67,347	388,70897
16:02	24,65	31,789	63,591	67,642	65,531	435,14223
16:12	24,6	31,114	61,417	65,151	63,192	372,6477
16:22	24,45	29,992	58,406	61,98	60,088	308,44639
16:32	24,02	29,278	54,608	57,89	56,144	257,98687
16:42	23,8	28,124	51,362	54,353	52,733	245,95186
16:52	23,64	27,268	46,985	49,665	48,263	214,42013
17:02	23,85	26,893	45,368	47,885	46,587	163,39606
17:12	23,49	25,92	41,096	43,329	42,307	98,0372
17:22	23,42	25,849	39,177	41,012	40,049	141,60832
17:32	23,43	25,376	38,065	39,782	38,917	112,3698
17:42	23,18	24,806	36,323	37,876	37,122	102,62363
17:52	23,06	24,405	34,783	36,219	35,536	82,55799
18:02	22,85	23,608	32,406	33,731	33,146	43,57112
18:12	22,69	23,077	30,284	31,439	30,92	24,65208
18:22	22,49	22,527	28,312	29,311	28,857	16,62626
18:32	22,42	22,152	26,808	27,644	27,268	9,17309
18:42	22,24	21,776	25,409	26,115	25,804	1,71996
18:52	22,12	21,382	24,243	24,819	24,58	0
19:02	21,92	21,019	23,252	23,764	23,569	0
19:12	21,84	20,89	22,533	22,948	22,799	0
19:22	21,74	20,65	21,977	22,339	22,229	0
19:32	21,59	20,314	21,517	21,835	21,75	0
19:42	21,48	20,152	21,142	21,407	21,349	0
19:52	21,37	19,881	20,838	21,064	21,032	0
20:02	21,24	19,829	20,527	20,734	20,715	0
20:12	21,06	19,512	20,256	20,463	20,463	0
20:22	20,82	19,234	19,984	20,185	20,178	--
21:22	19,58	17,592	18,316	18,561	18,536	0
22:22	18:72	16,054	16,855	17,055	17,081	0
23:22	17,93	16,551	16,293	16,409	16,435	0

5.7.2 Température de cellule du capteur vitré et du capteur libre

Pour voir l'influence de la vitre sur les performances thermiques du capteur nous avons comparé sa température de cellule avec celle du capteur photovoltaïque laissé libre. Les résultats de mesures sont portés sur le tableau 5.7.

Tableau 5.7 : Comparaison entre les températures de cellules du capteur isolé avec vitre et sans échangeur et du capteur libre

Temps (hh :mn)	Ta (°C)	Tcellpv (°C)	Tcellpvt (°C)	G (w/m²)
09:18	18,18	27,56	42,542	445,47046
09:35	19,48	34,426	57,334	643,26039
09:45	20,41	38,663	66,692	690,85339
09:55	20,87	40,895	75,023	733,26039
10:05	20,71	37,61	81,196	716,06127
10:15	21,26	39,782	86,7	803,21663
10:25	21,59	44,319	92,359	838,75274
10:35	22,04	45,153	97,433	875,44858
10:45	22,01	46,157	101,4	883,47921
10:55	22,55	44,574	105,13	914,44201
11:05	22,85	45,557	108,55	968,90591
11:15	23,39	48,093	111,96	1011,33479
11:25	23,74	51,349	115,18	998,14004
11:35	23,87	49,979	117,85	1027,96499
11:45	23,79	46,405	118,05	998,14004
11:55	23,83	44,938	115,38	1010,76586
12:05	24,3	50,553	118,56	1066,36761
12:15	24,61	48,648	122	1130,56893
12:25	24,65	45,342	123,46	1029,10284
12:35	24,36	42,73	116,49	888,0744
12:45	24,8	46,183	115,3	1050,89716
12:55	25,51	47,317	119,26	1130
13:05	25,58	48,55	121,43	1080,70022
13:15	26,33	49,157	121,02	990,70022
13:25	26,93	53,145	122,79	1117,39606
13:35	27,47	54,641	125,09	1118,53392
13:45	27,63	52,518	127,52	1119,10284
13:55	28,06	53,798	128,21	1092,1663

5.7.3 Tracé de la caractéristique I (V) du capteur vitré et du capteur libre

L'influence de l'ajout de la vitre au dessus du capteur déjà isolé thermiquement sur ces performances électrique peut être remarquée en traçant les caractéristiques I(V) du capteur en test et du capteur laissé libre (figure 5.16, et figure 5.17) respectivement..

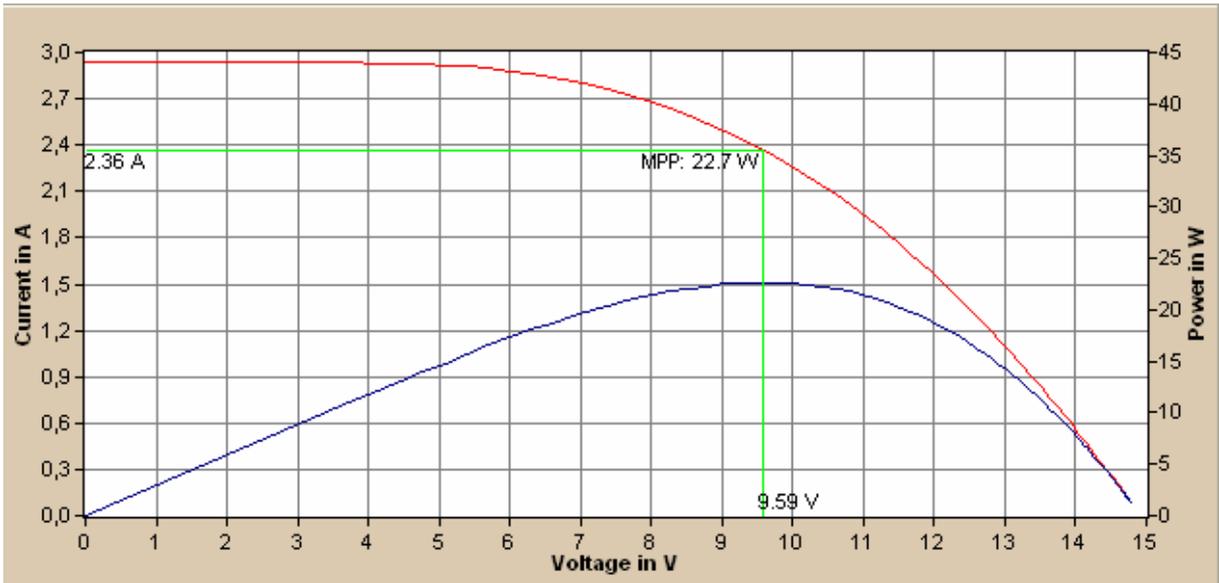


Figure 5.16 : Caractéristique I (V) du capteur isolé thermiquement et avec verre

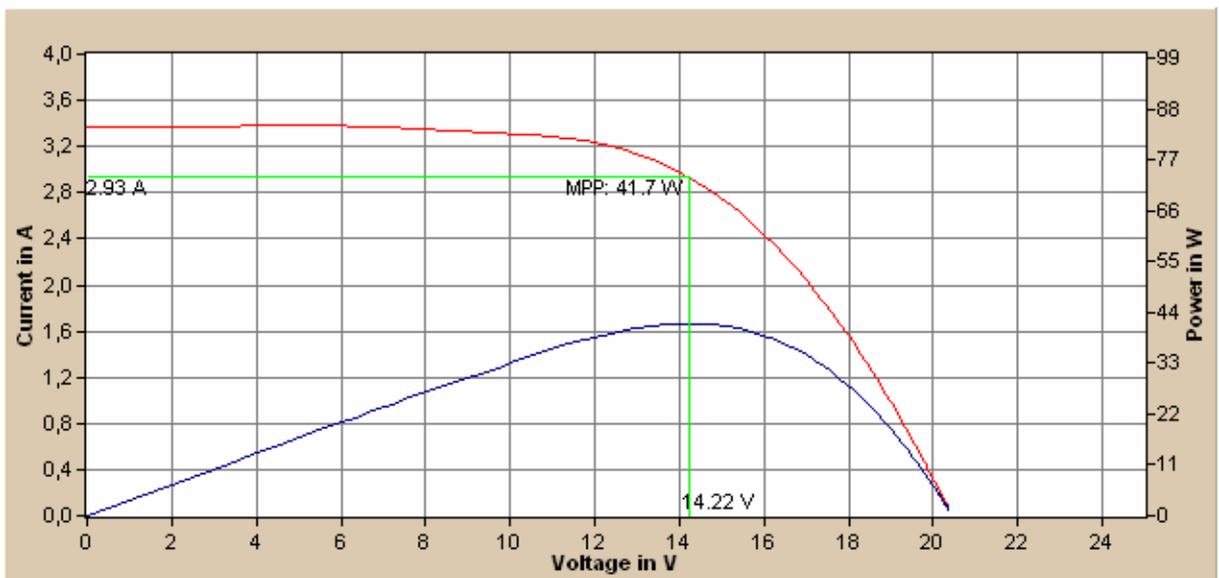


Figure 5.17 : Caractéristique I (V) du capteur laissé libre pour la deuxième configuration

Nous avons porté sur les tableaux 5.8 et 5.9 les paramètres électriques des deux capteurs pour cette deuxième configuration.

Tableau 5.8 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement et avec vitre

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : RS	3.5 Ohm
Résistance parallèle : Rp	0.13 kOhm
Eclairement : G	1202 W/m ²
Fill factor : FF	0.521
Courant de court circuit : Isc	2.94 A
Tension de circuit ouvert : Uoc	14.8 V
Courant maximum : I _{pmax}	2.36 A
Tension maximum : U _{pmax}	9.6 V
Puissance maximum : P _{max}	22.7W

Tableau 5.9 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque laissé sans isolation pour la deuxième configuration

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : RS	2.0 Ohm
Résistance parallèle : Rp	0.30 kOhm
Eclairement : G	1213 W/m ²
Fill factor : FF	0.603
Courant de court circuit : Isc	3.37 A
Tension de circuit ouvert : Uoc	20.4 V
Courant maximum : I _{pmax}	2.93 A
Tension maximum : U _{pmax}	14.2 V

Puissance maximum : Pmax	41.7W
--------------------------	-------

5.8 Performances thermiques et électriques du capteur hybride non couvert

Pour cette configuration nous avons ajouté un échangeur de chaleur au capteur isolé thermiquement, nous avons étudié le cas du capteur non couvert d'une vitre supplémentaire

L'échangeur de chaleur est constitué d'un serpentin en cuivre soudé sur une plaque en cuivre aussi servant comme un deuxième absorbeur (voir figure 5.18) et nous avons placé cet échangeur sur la face arrière du panneau photovoltaïque.

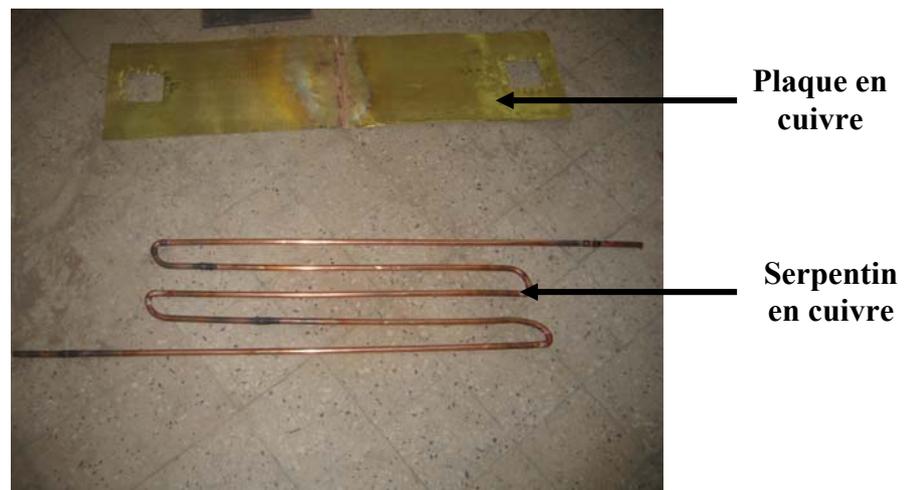


Figure 5.18 : Plaque en cuivre

Les dimensions du serpentin que nous avons utilisé sont les suivantes :

Diamètre extérieur : 10 mm

Diamètre intérieur : 8 mm

Espacement entre les tubes : 60 mm

Longueur totale du tube : 7000 mm

La figure 5.19 montre les deux faces du serpentin soudé sur la plaque en cuivre.



A : Face arrière



B : Face avant

Figure 5.19 : Ensemble de tube soudé à la plaque en cuivre

Notons enfin que la face avant de l'échangeur est peinte avec une couleur noire. Le fluide caloporteur que nous avons utilisé est l'eau.

5.8.1 Distribution de la température

Nous avons relevé en plus de la température ambiante et de l'éclairement global les températures de chaque face du capteur, les températures d'entrée et de sortie du fluide. Nous avons porté sur le tableau 5.10 les différentes températures mesurées sur les deux faces du capteur vitré pour un débit de l'eau de 0.025 kg/s.

Tableau 5.10 : Distribution de la température dans le capteur hybride non couvert

Temps (hh :mn)	T _{av} PVT (°C)	T _{cell} PVT (°C)	T _{ar} PVT (°C)	T _{av} PV (°C)	T _{cell} PV (°C)	G (W/m ²)	T _{in} (°C)	T _{out} (°C)	T _a (°C)
08:07	18,684	20,909	20,495	27,427	16,454	133,58206	21,03	20,786	15,75
08:17	21,213	22,132	21,039	25,749	16,933	284,35449	21,148	20,905	16,06
08:27	22,637	24,346	24,036	25,321	19,008	331,37856	21,144	20,921	16,36
08:37	23,997	25,869	25,875	24,818	20,573	377,24289	21,107	20,884	16,68
08:47	25,869	27,126	27,301	24,001	22,352	425,40481	21,564	21,544	16,98
08:57	27,055	28,124	28,481	23,619	23,207	468,40263	21,77	21,628	17,41
09:07	28,461	29,207	29,629	23,139	24,437	508,53392	22,019	21,938	17,74

09:17	29,564	30,316	30,946	22,318	25,214	561,85996	22,008	21,724	17,9
09:27	30,985	31,277	31,939	22,041	26,115	601,40044	22,096	21,934	18,13
09:37	32,257	32,64	33,445	21,595	27,398	634,66083	22,298	22,196	18,48
09:47	33,334	33,542	34,445	21,301	28,137	682,25383	22,49	22,389	18,75
09:57	35,341	34,919	35,985	20,236	29,473	716,06127	23,107	22,884	19,16
10:07	35,952	35,575	36,68	20,513	29,901	751,61926	23,405	23,162	19,41
10:17	37,044	36,55	37,766	19,837	31,024	782,58206	23,418	23,297	19,66
10:27	38,54	37,688	39,034	19,398	32,088	815,25164	24,094	23,628	20,1
10:37	39,476	38,689	40,088	18,794	32,893	844,48578	24,078	23,633	20,31
10:47	40,094	39,288	40,856	18,698	33,315	870,28446	23,983	23,558	20,63
10:57	42,828	41,09	42,639	17,341	35,809	904,11379	24,797	24,594	20,84
11:07	42,203	40,921	42,522	17,837	35,108	926,47702	24,522	24,259	21,29
11:17	43,486	41,891	43,596	17,246	35,874	954,00438	24,703	24,46	21,39
11:27	44,469	42,939	44,828	16,774	36,849	964,87965	24,799	24,435	21,95
11:37	45,733	43,694	45,453	15,878	37,896	992,407	24,962	24,618	21,93
11:47	45,87	43,779	45,662	16,363	37,928	1002,73523	25,099	24,896	22,23
11:57	47,826	45,57	47,513	14,542	40,029	1013,63239	25,254	25,152	22,83
12:07	47,037	45,004	47,031	16,081	38,793	1031,40044	25,163	25,021	22,89
12:17	46,744	45,232	47,304	16,112	39,112	1035,40481	25,294	25,355	23,41
12:27	47,767	46,014	48,146	15,112	40,179	1037,70241	25,394	25,435	23,73
12:37	47,911	45,955	48,054	15,551	40,166	1049,16849	25,648	25,809	24
12:47	48,778	46,92	49,059	14,714	41,331	1049,16849	26,333	26,333	23,97
12:57	47,643	46,079	48,309	16,113	39,945	1056,03939	25,841	25,841	24,03
13:07	49,672	47,226	49,339	14,102	41,903	1053,17287	26,172	26,555	24,52
13:17	50,383	47,996	50,135	13,469	42,88	1041,13786	26,353	26,676	24,99
13:27	49,933	47,826	50,05	14,329	43,03	1035,97374	26,679	27,083	25,07
13:37	49,587	47,33	49,587	14,281	42,288	1027,37418	26,55	26,833	25,39
13:47	49,913	47,8	50,011	14,314	43,447	1011,90372	27,31	27,532	25,84
13:57	49,959	47,859	50,031	13,768	43,251	990,70022	27,476	27,678	25,89
14:07	48,948	47,448	49,457	14,749	42,88	982,10066	27,7	28,023	26,15
14:17	46,978	46,509	48,641	16,202	41,936	966,60832	27,101	27,485	25,97
14:27	48,309	46,789	48,837	14,673	42,698	944,814	27,584	28,109	26,51
14:37	47,832	46,744	48,517	15,074	42,522	926,47702	26,953	27,538	26,72
14:47	48,132	46,9	48,765	14,205	43,154	909,84683	27,364	28,07	26,95
14:51	47,552	46,978	48,902	14,47	43,46	893,21663	27,06	27,626	27,2
15:02	47,663	46,548	48,361	14,314	43,453	855,38293	28,017	28,783	27,39
15:12	46,418	45,414	47,128	15,328	42,502	823,8512	28,555	29,321	27,43
15:22	43,935	44,437	46,066	17,11	41,344	786,58643	28,465	29,251	27,34
15:32	41,682	43,29	44,821	18,243	40,218	751,61926	28,156	29,527	27,37
15:42	41,923	43,089	44,411	18,006	40,797	737,28665	28,486	30,622	27,34
15:52	40,511	42,255	43,609	18,285	39,938	678,7965	28,259	30,435	27,33
16:02	39,587	41,734	43,062	19,53	39,808	653,39168	28,567	30,804	27,62
16:12	38,767	40,641	41,747	20,026	38,657	618,59956	28,415	30,572	27,43
16:22	36,583	38,878	39,977	22,021	36,589	571,02845	28,302	30,277	26,99
16:32	35,348	36,791	37,655	23,031	34,984	527,43982	29,045	30,858	27
16:42	33,808	36,05	36,856	23,553	34,439	481,00656	28,88	30,874	26,68
16:52	32,757	34,374	35,166	24,867	33,029	174,28884	28,416	29,484	26,81
17:02	32,484	35,056	35,725	23,597	33,653	406,47702	28,561	30,576	26,82

17:12	31,588	34,068	34,581	24,305	32,627	365,20788	28,258	30,273	26,93
17:22	30,894	33,192	33,627	25,239	31,939	311,31291	28,686	30,741	26,96
17:32	29,369	31,439	31,699	26,62	29,836	264,87965	27,988	29,158	26,35
17:42	28,669	31,303	31,432	26,984	29,09	225,31729	27,262	28,21	26,11
17:52	27,891	30,316	30,42	27,703	28,189	185,75492	28,102	28,405	26,04
18:02	27,152	29,214	29,253	28,543	27,301	146,19475	28,68	29,385	25,59
18:12	26,426	28,105	28,066	28,894	26,543	110,07659	28,931	29,334	25,44
18:22	25,83	27,204	27,139	29,416	26,037	62,49234	28,868	29,009	24,99
18:32	25,091	26,296	26,219	29,839	25,448	47,01094	29,13	29,09	24,72
18:42	24,275	25,163	25,059	30,021	24,677	22,93217	29,353	29,131	24,47
18:52	23,479	24,23	24,113	30,344	24,113	11,4663	29,515	29,313	24,2
19:02	22,721	23,33	23,213	30,643	23,537	0,57333	29,673	29,452	23,94
19:12	22,055	22,553	22,436	30,899	23,155	-1,71996	29,828	29,607	23,78
19:22	21,647	21,97	21,847	30,776	22,902	-3,43982	29,846	29,705	23,5
19:32	21,621	21,737	21,634	30,468	22,851	-2,86652	29,84	29,82	23,38
19:42	21,737	21,712	21,627	30,159	22,896	-2,29322	29,834	29,773	23,3
19:52	21,388	21,472	21,382	30,359	22,669	-2,86652	29,751	29,61	23,1
20:02	20,896	20,961	20,851	30,594	22,21	-3,43982	29,745	29,644	22,83
21:02	19,719	19,809	19,751	30,638	21,42	-3,43982	29,748	29,748	21,97
22:02	18,432	18,432	18,4	30,42	20,029	-3,43982	29,651	29,832	20,55
23:02	16,861	16,861	16,816	30,454	18,38	-3,43982	29,645	--	18,95

Avec :

T_{av} PVT : Température de la face avant du capteur hybride photovoltaïque thermique.

T_{cell} PVT : Température de la cellule du capteur hybride photovoltaïque thermique.

T_{ar} PVT : Température sur la face arrière du capteur hybride photovoltaïque thermique

T_{av} PV : Température de la face avant du capteur photovoltaïque de référence.

T_{cell} PV : Température de la cellule du capteur photovoltaïque de référence.

T_{ar} PV : Température de la face arrière du capteur photovoltaïque de référence.

T_{in} : Température d'entrée du fluide.

T_{out} : Température de sortie du fluide.

G : Eclairement global sur le plan du capteur.

5.8.3 Tracé de la caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert et du capteur photovoltaïque libre

L'influence de l'ajout de l'échangeur de chaleur sur le capteur non recouvert, sur ses performances électriques peut être remarquée en traçant les caractéristiques I(V) du capteur hybride et du capteur laissé libre (figure 5.20 et figure 5.21) respectivement..

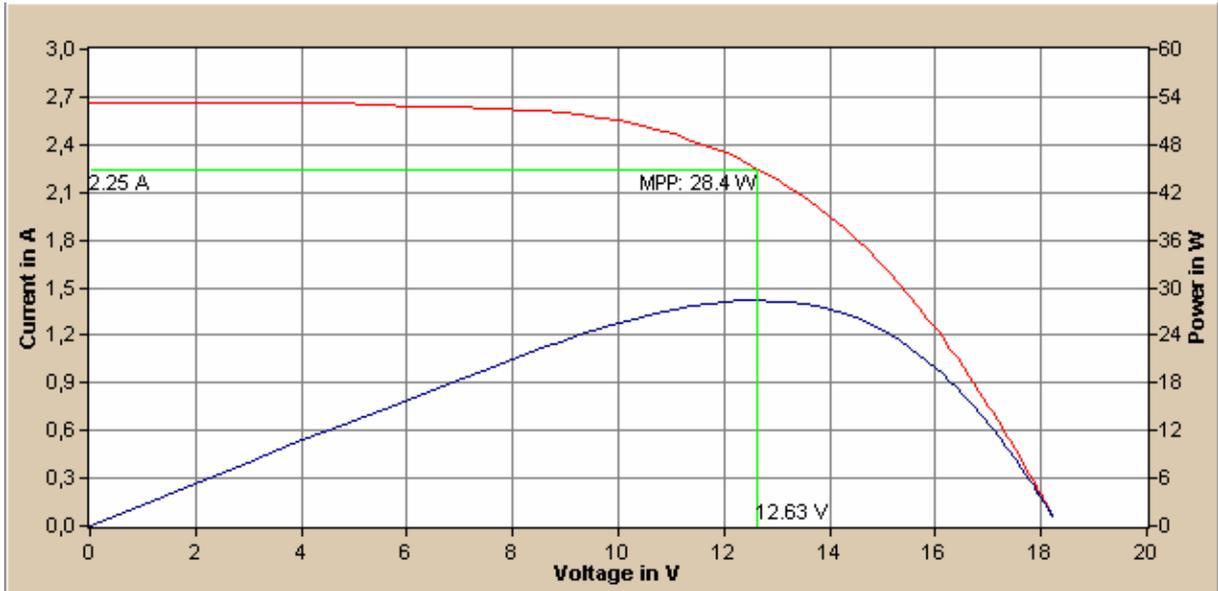


Figure 5.20 : Caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert

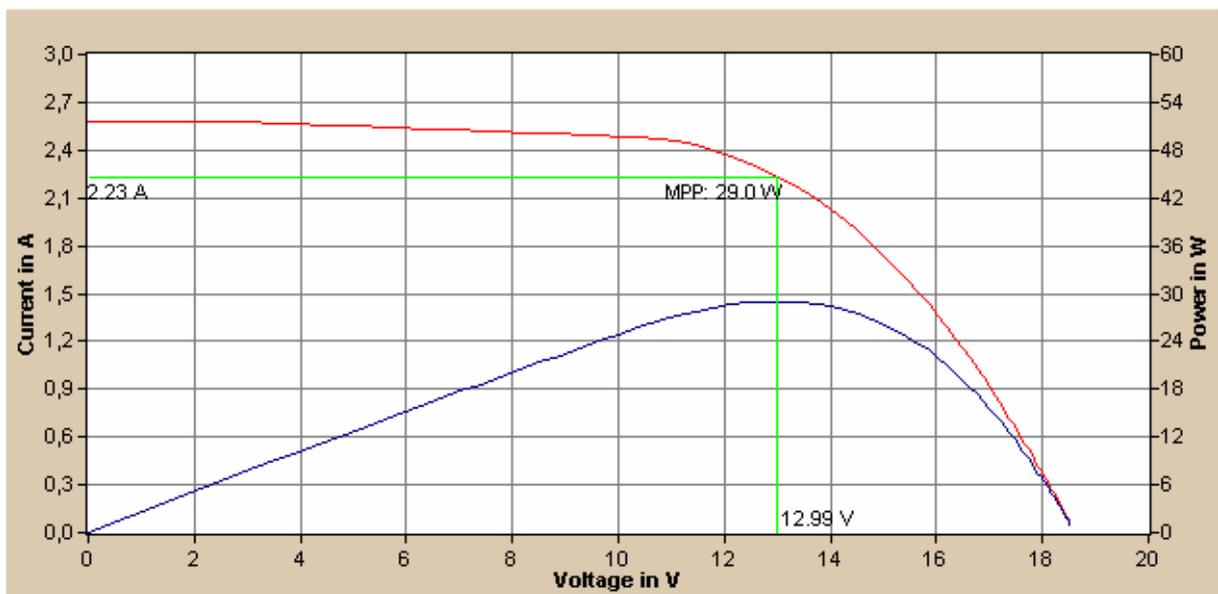


Figure 5.21 : Caractéristique I (V) du capteur laissé libre pour la troisième configuration

Nous avons porté sur les tableaux 5.11 et 5.12 les paramètres électriques des deux capteurs pour cette troisième configuration.

Tableau 5.11 : Paramètres électriques du capteur hybride non couvert

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : R_S	3.2 Ohm
Résistance parallèle : R_p	0.26 kOhm
Eclairement : G	940W/m ²
Fill factor : FF	0.583
Courant de court circuit : I_{sc}	2.67A
Tension de circuit ouvert : U_{oc}	18.2V
Courant maximum : I_{pmax}	2.25A
Tension maximum : U_{pmax}	12.6V
Puissance maximum : P_{max}	28.4W

Tableau 5.12 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque témoin

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : R_S	2.5 Ohm
Résistance parallèle : R_p	0.33 kOhm
Eclairement : G	939 W/m ²
Fill factor : FF	0.607
Courant de court circuit : I_{sc}	2.58A
Tension de circuit ouvert : U_{oc}	18.6V

Courant maximum : I_{pmax}	2.23 A
Tension maximum : U_{pmax}	13.0V
Puissance maximum : P_{max}	29.0W

5.9 Performances thermiques et électriques du capteur hybride couvert

Afin d'améliorer le rendement thermique du capteur hybride nous avons ajouté une vitre supplémentaire au capteur et nous avons comparé les performances électrique par rapport au capteur photovoltaïque classique.

La figure 5.22 montre une photo du capteur hybride avec le capteur photovoltaïque témoin.

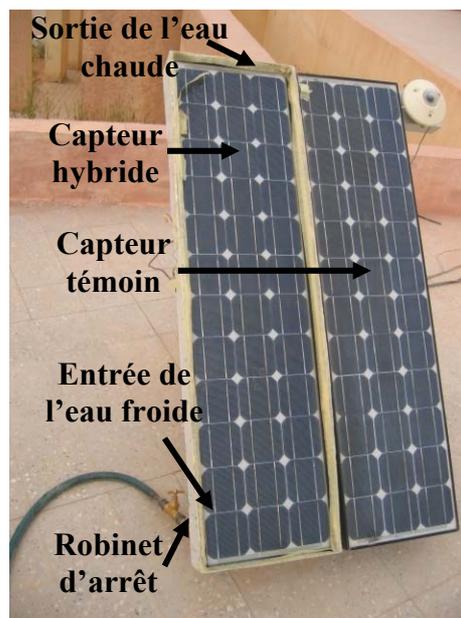


Figure 5.22 : Photo de capteur hybride et du capteur témoin

5.9.1 Distribution de la température

Nous avons porté sur le tableau 5.13 les différentes températures mesurées sur les deux faces du capteur vitré pour un débit de l'eau de 0.025 kg/s et une vitesse de vent de 1.5m/s ainsi que la température ambiante et le rayonnement solaire sur le plan du capteur.

Tableau 5.13 : Distribution de la température dans le capteur hybride couvert

Temps (hh :mn)	T_{av} PVT (°C)	T_{cell} PVT (°C)	T_{ar} PVT (°C)	T_{av} PV (°C)	T_{cell} PV (°C)	T_{out} (°C)	T_{in} (°C)	G (W/m²)	T_a (°C)
07:52	15,782	19,661	19,389	20,221	10,793	17,373	15,749	61,91904	15,69
08:02	20,709	20,016	19,758	23,918	11,322	18,068	17,005	278,05252	16,33
08:12	26,128	23,55	22,184	27,189	12,109	19,391	18,577	323,91685	16,72
08:22	30,796	26,711	26,445	29,217	19,15	20,126	19,081	366,91466	16,66
08:32	35,01	29,123	29,382	31,269	23,783	19,843	19,08	397,87746	16,51
08:42	38,78	31,27	31,887	33,474	26,841	19,694	19,079	443,74179	16,58
08:52	42,529	33,373	34,328	35,55	29,343	19,619	19,075	496,49891	17,12
09:02	46,014	35,393	36,622	36,475	30,68	19,556	19,002	533,76368	17,92
09:12	49,209	37,207	38,65	38,838	32,945	19,472	18,939	573,32604	18,15
09:22	52,263	39,125	40,804	38,154	33,016	19,497	18,87	618,59956	18,15
09:32	54,902	40,791	42,613	39,77	33,802	19,424	18,787	652,99781	17,64
09:42	57,497	42,424	44,489	39,77	33,646	19,456	18,664	666,76149	18,46
09:52	59,748	43,877	46,046	39,165	34,549	19,473	18,656	737,28665	18,15
10:02	61,862	45,388	47,709	40,034	32,744	19,598	18,572	770,54705	18,88
10:12	63,919	46,854	49,313	41,921	37,012	19,374	18,492	800,35011	19,17
10:22	65,833	48,25	50,853	42,22	35,452	19,455	18,4	839,34354	19,33
10:32	67,433	49,417	52,172	39,593	36,284	19,477	18,316	861,11597	19,48
10:42	68,797	50,416	53,295	38,867	35,907	19,536	18,258	896,08315	19,23
10:52	70,018	51,441	54,373	38,405	35,575	19,574	18,201	928,20569	19,33
11:02	71,292	52,629	55,732	39,801	36,459	19,506	18,132	950,54705	19,58
11:12	71,896	53,158	56,327	40,172	37,954	19,396	18,055	916,73961	19,76
11:22	73,045	54,138	57,38	38,884	36,622	19,558	18,053	992,407	19,91
11:32	73,689	54,758	58,112	39,444	37,239	19,44	17,989	969,47484	20,26
11:42	74,333	55,464	58,845	38,637	37,987	19,501	17,972	1021,64114	20,98
11:52	74,905	56,177	59,663	38,259	39,249	19,416	17,927	1037,70241	20,94
12:02	75,247	56,687	60,212	38,5	38,351	19,461	17,889	1046,30197	20,89
12:12	75,727	57,36	60,952	40,009	39,346	19,419	17,84	1057,19912	21,64
12:22	76,279	57,909	61,594	42,039	39,997	19,285	17,792	1063,50109	21,51
12:32	76,509	58,302	62	39,408	39,756	19,342	17,755	1064,63895	21,75
12:42	76,503	58,57	62,353	37,458	39,262	19,477	17,73	1062,93217	22,17
12:52	76,135	58,635	62,386	36,309	39,476	19,454	17,726	1060,06565	22,45
13:02	75,76	58,603	62,334	36,139	39,34	19,478	17,732	1061,77243	22,46
13:12	75,313	58,629	62,347	40,702	41,975	19,192	17,725	1052,60394	22,8
13:22	74,905	58,74	62,438	36,043	39,645	19,43	17,714	1044,5733	23,14
13:32	74,136	58,753	62,406	35,806	39,216	19,468	17,713	1034,26696	23,17
13:42	73,249	59,093	62,641	36,338	39,808	19,379	17,695	1022,23195	23,35
13:52	72,382	58,995	62,451	36,878	39,281	19,393	17,692	1003,87309	23,45
14:02	71,068	58,557	61,921	36,621	38,312	19,435	17,708	986,67396	23,45
14:12	69,598	58,073	61,371	37,825	37,909	19,412	17,734	963,74179	23,97
14:22	68,246	57,694	60,919	40,636	39,262	19,175	17,744	952,27571	24,28
14:32	66,849	57,151	60,278	36,721	39,066	19,312	17,762	928,20569	24,3
14:42	65,918	57,157	60,232	35,337	38,826	19,308	17,738	901,24726	24,74
14:52	64,692	56,562	59,538	36,534	39,086	19,209	17,756	878,3151	24,8
15:02	63,441	56,268	59,054	33,323	37,545	19,36	17,759	854,24508	24,68

15:12	62,111	55,641	58,328	33,93	37,987	19,236	17,772	827,87746	25,02
15:22	60,651	54,843	57,419	33,583	37,07	19,295	17,792	796,34573	25,07
15:32	59,12	53,863	56,248	35,041	36,511	19,38	17,829	768,81838	25,29
15:42	57,118	52,524	54,837	32,28	34,854	19,461	17,878	736,71772	25,79
15:52	55,17	51,29	53,4	30,683	33,77	19,453	17,918	703,45733	25,03
16:02	53,38	50,409	52,361	31,234	33,328	19,39	17,918	663,89497	25,45
16:12	51,813	49,855	51,604	30,227	33,068	19,303	17,798	584,20131	25,52
16:22	50,462	49,294	50,944	30,284	32,549	19,44	17,929	623,76368	25,83
16:32	49	48,524	49,985	28,474	31,841	19,272	17,77	536,06127	26,39
16:42	47,265	47,311	48,556	28,321	30,855	19,269	17,771	509,67177	25,71
16:52	45,499	45,988	47,076	27,96	29,24	19,207	17,647	442,60394	25,97
17:02	42,743	41,435	42,183	25,719	27,657	18,647	17,22	214,99344	25,19
17:12	40,758	39,431	39,847	25,278	27,197	19,185	17,805	286,65208	24,97
17:22	38,956	38,806	38,917	25,234	26,737	18,168	16,893	138,74179	24,7
17:32	37,538	38,377	38,377	24,722	26,141	18,029	16,757	117,52954	24,49
17:42	36,167	37,506	37,467	24,408	25,726	17,724	16,515	91,15755	24,33
17:52	34,406	36,076	35,978	23,919	24,929	16,725	15,564	53,89278	24,08
18:02	33,042	34,874	34,789	23,844	24,69	16,862	15,807	56,7593	23,85
18:12	31,848	33,744	33,692	23,886	24,554	16,483	15,484	48,73085	23,82
18:22	30,926	32,802	32,809	23,892	24,469	15,988	15,064	42,99781	23,8
18:32	29,817	31,614	31,66	23,824	24,23	14,955	14,066	30,95842	23,76
18:42	28,85	30,595	30,693	23,639	24,068	14,393	13,536	25,79869	23,73
18:52	27,832	29,48	29,622	23,533	23,653	12,72	12,029	16,05295	23,58
19:02	26,925	28,435	28,598	23,366	23,485	11,152	10,562	10,31969	23,46
19:12	26,07	27,456	27,599	23,203	23,362	4,8303	4,3158	0,57333	23,35
19:22	25,299	26,523	26,672	23,325	23,116	1,5443	1,3012	-1,14663	23,28
19:32	24,541	25,668	25,804	22,865	22,715	0,16348	0,13177	-2,86652	23,04
19:42	23,912	24,936	25,046	23,154	22,637	0,01861	0,0151	-2,29322	22,83
19:52	23,297	24,243	24,333	22,938	22,042	0,00414	0,00349	-3,43982	22,63
20:02	22,682	23,537	23,634	22,68	21,504	0,0028	0,00245	-3,43982	22,26
21:02	19,758	20,314	20,405	22,261	19,693	0,00247	0,00222	-3,43982	20,77
22:02	17,715	18,096	18,193	22,337	18,232	0,0031	0,00261	-2,86652	19,36

5.9.3 Tracé de la caractéristique I (V) du capteur hybride couvert et du capteur photovoltaïque libre

Les figures 5.23 et 5.24 montrent les caractéristiques I(V) du capteur hybride couvert et du capteur photovoltaïque témoin respectivement.

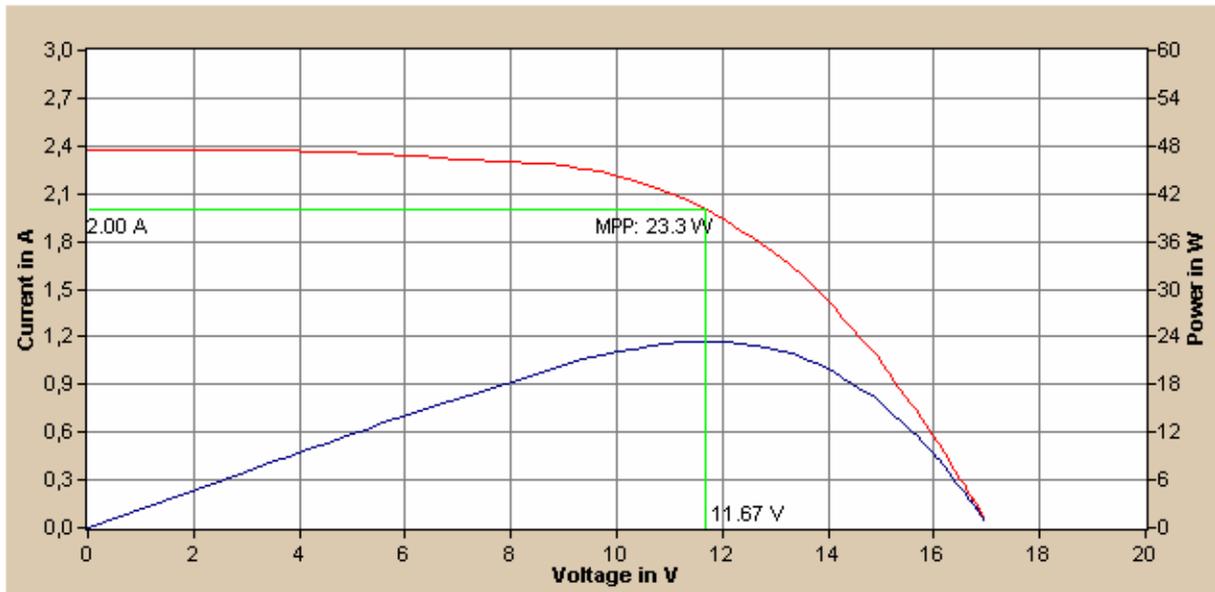


Figure 5.23 : Caractéristique I (V) du capteur hybride couvert

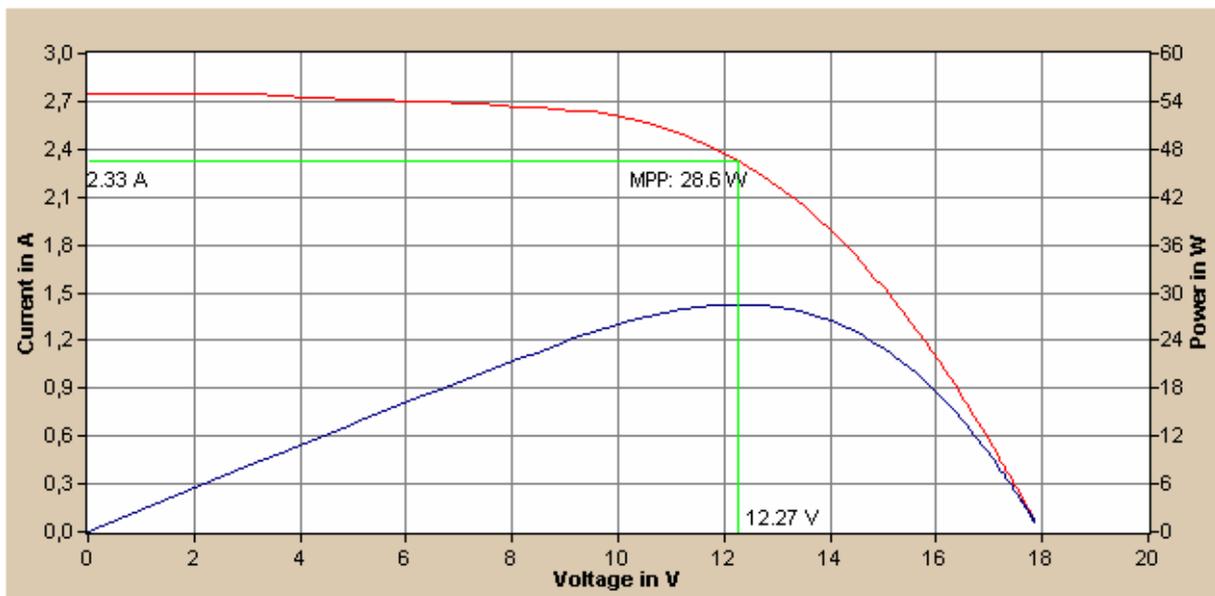


Figure 5.24 : Caractéristique I (V) du capteur photovoltaïque témoin

Nous avons porté sur les tableaux 5.14 et 5.15 les paramètres électriques des deux capteurs pour cette dernière configuration.

Tableau 5.14 : Paramètres électriques du capteur hybride couvert

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
-------------------	---------------

Résistance série : R_S	3.4 Ohm
Résistance parallèle : R_p	0.27 kOhm
Eclairement : G	987 W/m ²
Fill factor : FF	0.580
Courant de court circuit : I_{sc}	2.37 A
Tension de circuit ouvert : U_{oc}	14.8 V
Courant maximum : I_{pmax}	2.00 A
Tension maximum : U_{pmax}	11.7V
Puissance maximum : P_{max}	23.3W

Tableau 5.15 : Paramètres électriques du capteur photovoltaïque témoin pour la quatrième configuration

<u>Paramètres</u>	<u>Valeur</u>
Résistance série : R_S	2.9 Ohm
Résistance parallèle : R_p	0.26 kOhm
Eclairement : G	987W/m ²
Fill factor : FF	0.583
Courant de court circuit : I_{sc}	2.74 A
Tension de circuit ouvert : U_{oc}	17.9V
Courant maximum : I_{pmax}	2.33A
Tension maximum : U_{pmax}	12.3V
Puissance maximum : P_{max}	28.6W

Chapitre 6

Résultats et discussions

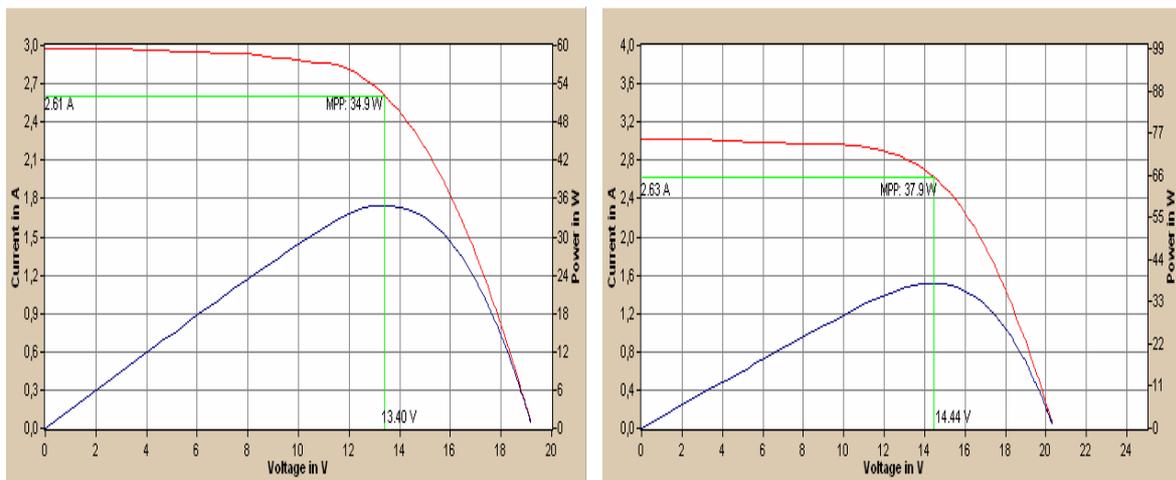
6.1 Introduction

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale et analyserons les données recueillies puis nous comparerons les résultats pratiques avec la théorie.

Les performances électriques du capteur hybride sont comparées aux performances du capteur photovoltaïque classique tandis que les performances thermiques seront comparées aux performances du capteur thermique plan.

6.2 Performances électriques du capteur photovoltaïque isolé thermiquement et sans vitre

On voit sur la figure 6.1 une comparaison entre les deux caractéristiques dans une configuration où le capteur est isolé et sans vitre (PVT). Nous remarquons que le rendement est plus faible pour le capteur avec isolation que pour le capteur libre (PV). Il a chuté de 8%.



a- Capteur isolé thermiquement et non recouvert

b- Capteur photovoltaïque libre témoin

Figure 6.1 : Comparaison des caractéristiques I (V) des deux graphes pour la première configuration

Le fait d'isoler thermiquement le capteur photovoltaïque a fait chuter le rendement électrique du capteur c'est-à-dire que la production électrique du capteur a diminué par rapport à celle du capteur photovoltaïque laissé libre et non isolé. Ceci est dû au fait que ce dernier est ventilé naturellement.

6.3 Distribution de la température dans le capteur photovoltaïque isolé

Dans cette configuration le capteur photovoltaïque étant isolé thermiquement, nous avons mesuré la température au niveau de chaque couche du capteur.

La figure 6.2 montre la distribution de la température en fonction du temps pour une variation d'éclairement G donné sur la même figure.

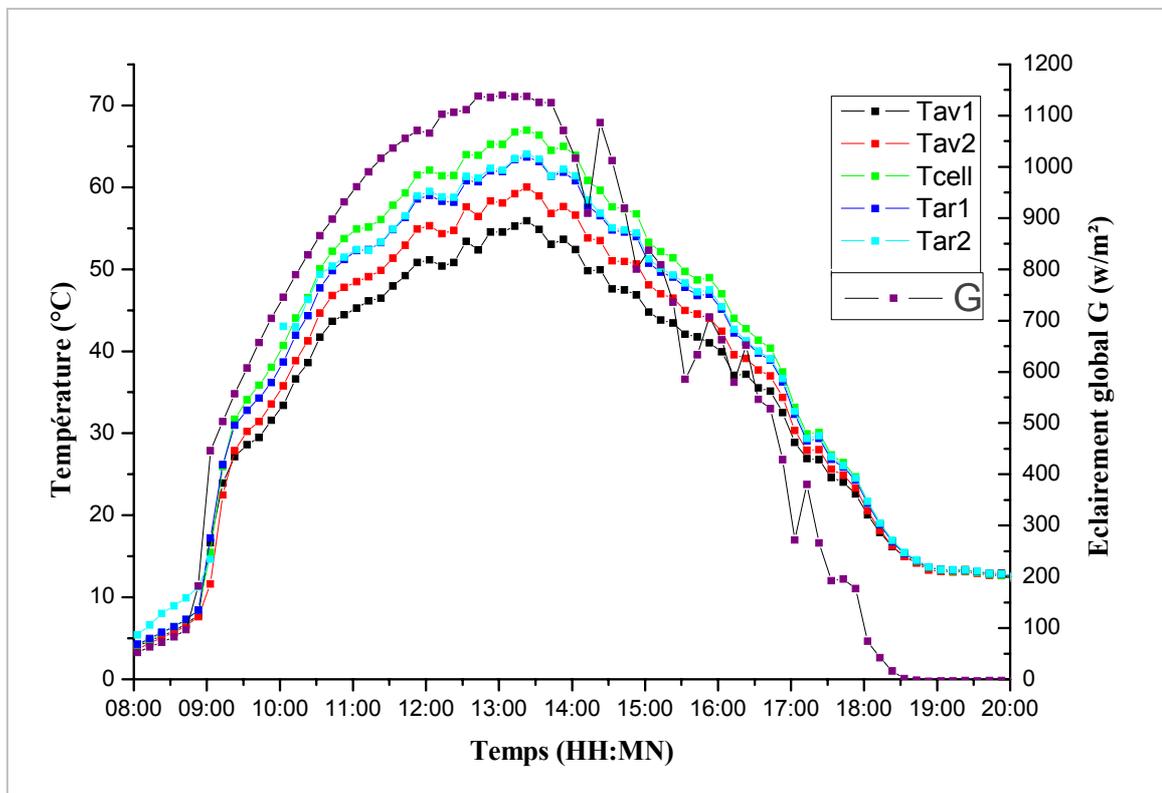


Figure 6.2 : Températures sur les trois faces du capteur isolé

Nous remarquons que les températures sont presque homogènes sur une même face du capteur, sur la face avant et sur la face arrière. Ce qui était prévu par la théorie. Cela est dû au fait que chaque couche est constituée de la même matière (le verre pour la face avant et le tedlar pour la face arrière).

Les résultats obtenus sont identiques à ce qu'on a observé en simulation. En effet la température de la cellule photovoltaïque est supérieure à la température dans la couche du vitrage protecteur et à celle de la couche du tedlar. Ceci s'explique par le fait que la cellule photovoltaïque est un générateur thermique, qui convertit le rayonnement solaire reçu en électricité et en chaleur.

6.4 Comparaison des températures des deux capteurs

Nous avons relevé la température de la cellule des deux capteurs (figure 6.3) et on remarque qu'elle est plus faible pour le capteur photovoltaïque libre.

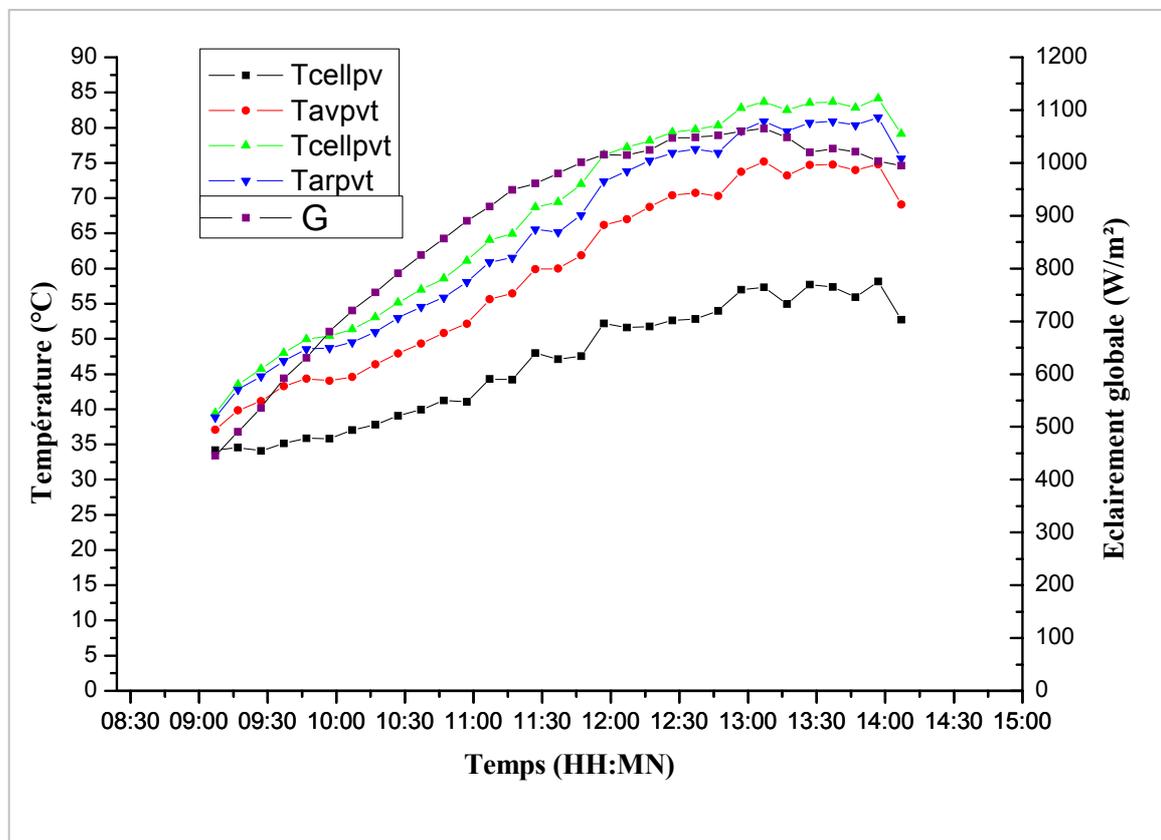


Figure 6.3 : Comparaison des températures des deux capteurs

La distribution de la température dans le capteur isolé thermiquement est la même que celle trouvée dans le paragraphe précédent à savoir : $T_{cell} > T_{ar} > T_{av}$.

La température de la cellule du capteur photovoltaïque libre est inférieure à la température de la cellule du capteur isolé thermiquement, ceci étant du à l'aération du capteur photovoltaïque.

6.5 Effet de l'ajout d'une vitre sur le capteur isolé thermiquement

6.5.1 Température du capteur

La figure 6.4 montre l'effet de l'ajout d'une vitre supplémentaire au dessus du capteur isolé thermiquement.

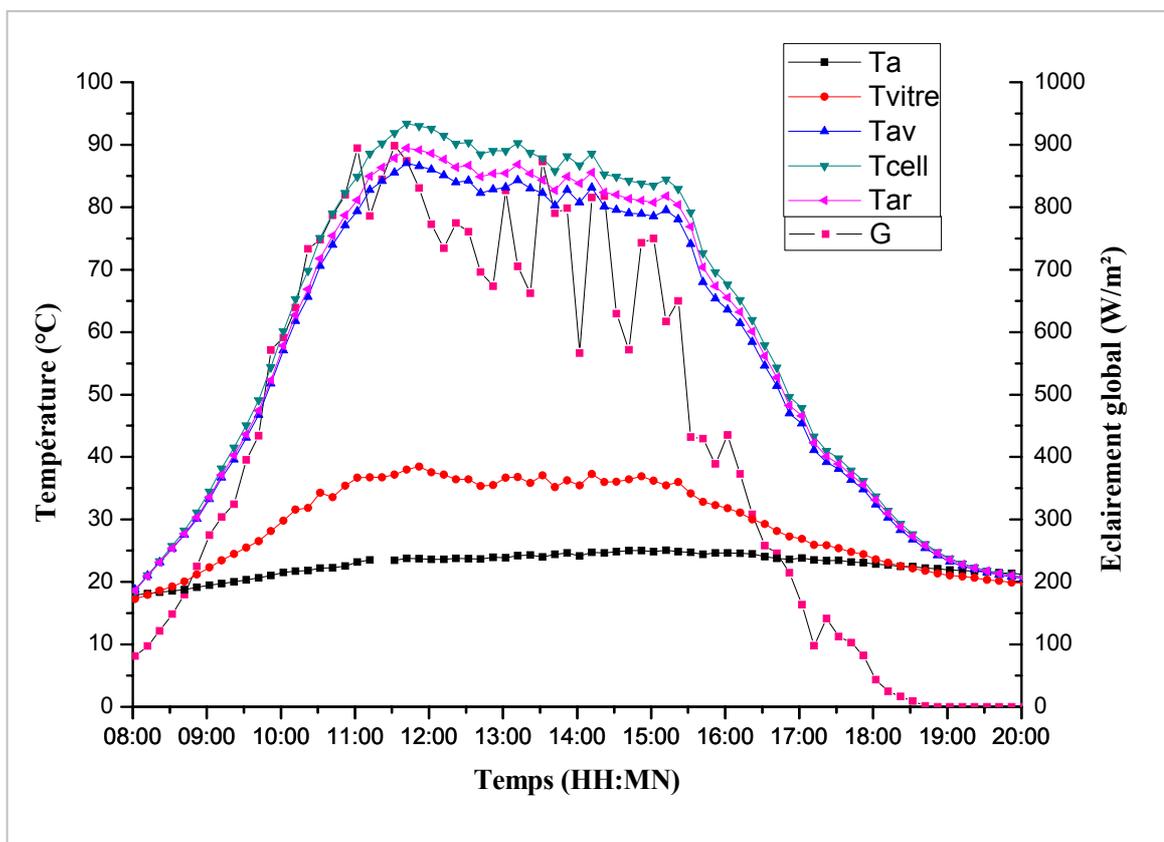


Figure 6.4 : Effet de l'ajout d'une vitre au dessus du capteur isolé thermiquement

L'ajout d'une vitre supplémentaire au dessus du capteur a provoqué une augmentation de la température sur toutes ses couches. Elle a atteint 87°C sur la face avant, 93°C sur la couche de la cellule et 89°C sur la face arrière du capteur.

L'augmentation de ces températures concorde avec ce qui a été prévu dans la simulation théorique car la vitre ajoutée a provoqué un effet de serre et donc les rayons solaire sont

piégés entre la vitre et la face avant du capteur isolé thermiquement ce qui a eu pour effet l'augmentation des températures.

La température de la vitre (face extérieure) est restée relativement faible et proche de la température ambiante (voir figure 6.4).

6.5.2 Comparaison avec le capteur photovoltaïque libre

Nous avons relevé les températures des capteurs dans un laps de temps court (entre 09 :00 et 14 :00) à cause des températures élevés obtenues.

La figure 6.5 montre la différence des températures des cellules du capteur photovoltaïque isolé thermiquement avec une vitre supplémentaire au dessus et le capteur photovoltaïque laissé libre et donc aéré naturellement.

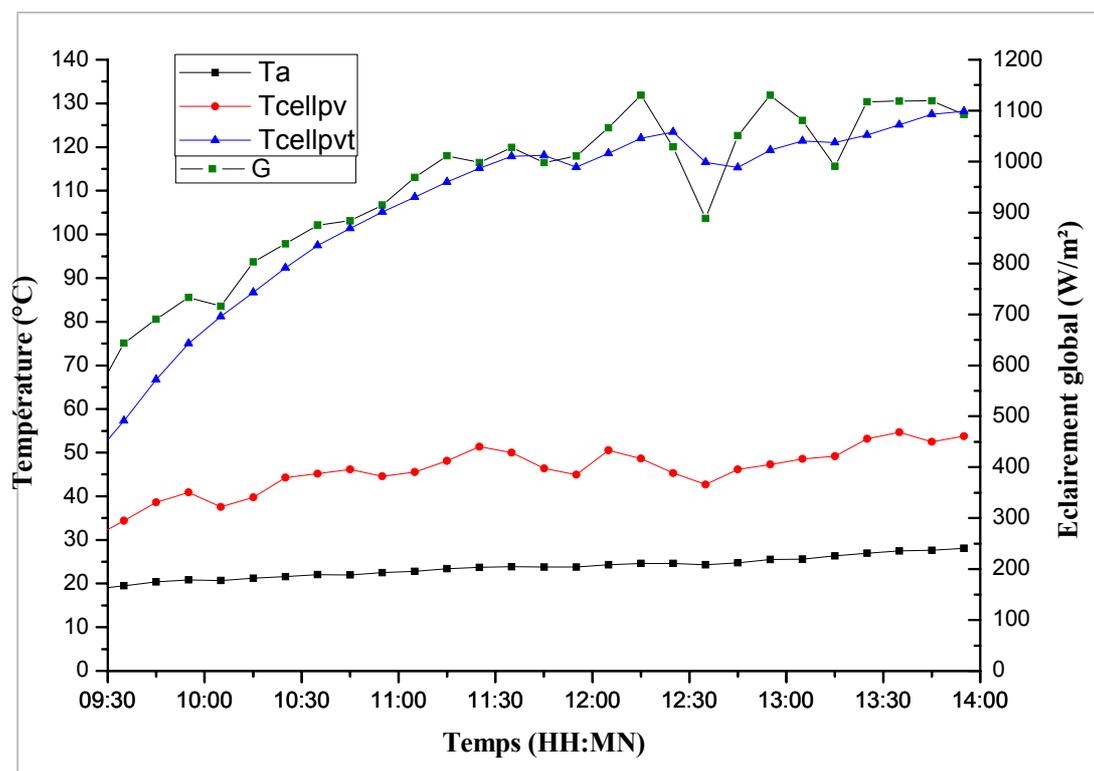


Figure 6.5 : Comparaison des températures de cellules des deux capteurs

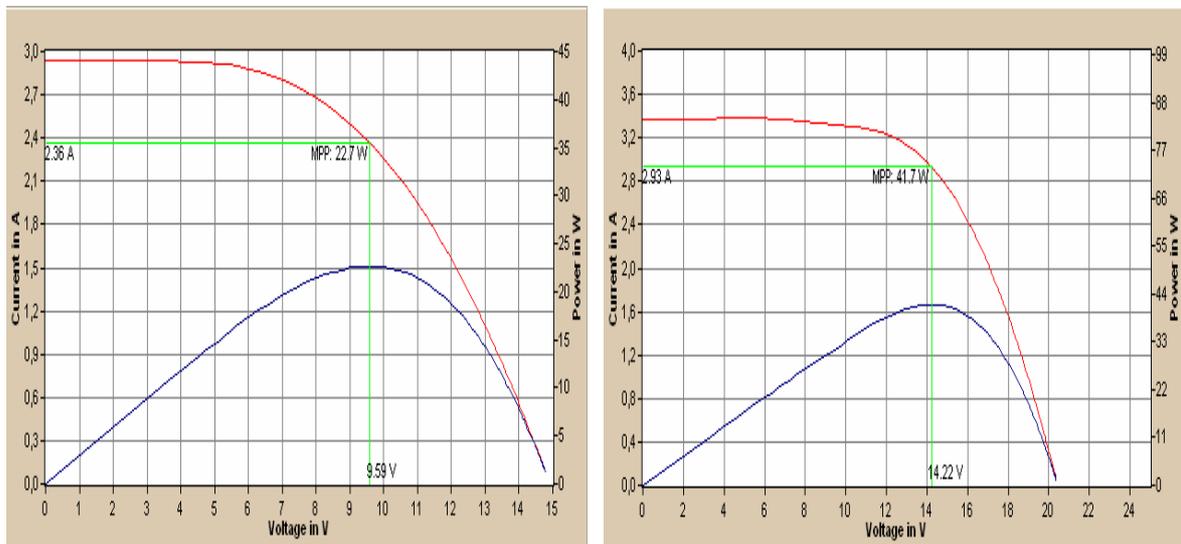
L'effet de la vitre supplémentaire est d'augmenter les performances thermiques du capteur, nous remarquons dans la figure 6.5 que la température de la cellule du capteur isolé thermiquement et vitré a atteint les 120°C.

6.5.3 Performances électriques du capteur isolé thermiquement et recouvert d'une vitre

Pour voir l'influence de la vitre supplémentaire sur les performances électriques du capteur isolé thermiquement, nous avons relevé la caractéristique I (V) du capteur isolé (figure 6.6.a) et la caractéristique du capteur photovoltaïque libre témoin (figure 6.6.b).

La puissance maximum du capteur isolé thermiquement a chuté de 41.7W à 22.7 W pour un éclairement de 1200 W/m², ce qui est très important.

Le rendement électrique de la cellule dépend directement de la température de fonctionnement ce qui a été démontré théoriquement.



a- Capteur isolé thermiquement et recouvert d'une vitre

b- Capteur photovoltaïque libre témoin

Figure 6.6 : Caractéristique I (V) des deux capteurs

L'ajout de la vitre supplémentaire a provoqué une chute du rendement électrique de 45% par rapport au capteur photovoltaïque non isolé. Donc l'inconvénient de la vitre supplémentaire est la chute des performances électriques.

6.6 Résultats de l'expérimentation sur le capteur avec échangeur de chaleur

Nous avons intégré dans le capteur isolé thermiquement et non recouvert un échangeur de chaleur constitué d'une plaque en cuivre et d'un serpentin en cuivre pour faire circuler de

l'eau. Nous appelons ce capteur ainsi réalisé de capteur hybride puisqu'il produit simultanément de l'électricité et de la chaleur.

6.6.1 Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert

La figure 6.7 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.

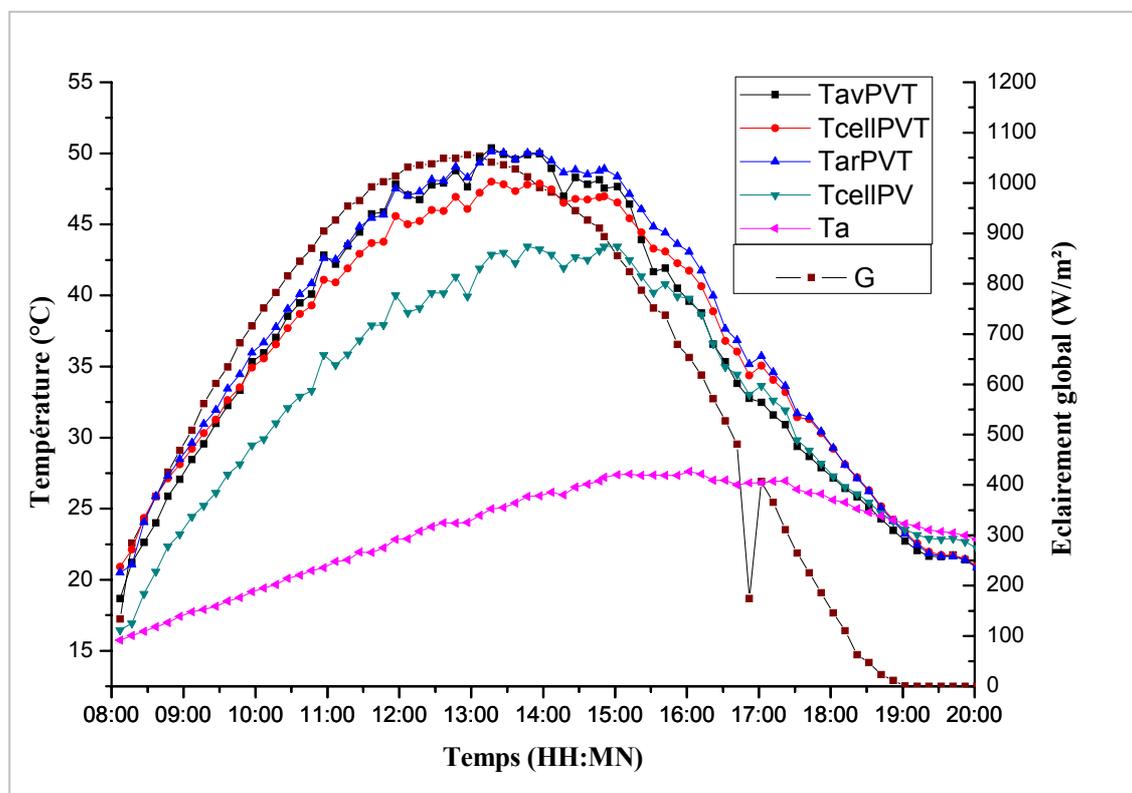


Figure 6.7 : Distribution de la température dans le capteur hybride non recouvert

Ces résultats confirment ceux de la théorie. En effet le fluide caloporteur qui est l'eau dans notre cas avec un débit relativement faible diminue la température des cellules du capteur hybride.

6.6.2 Rendement thermique du capteur hybride non recouvert

Afin de calculer les performances thermiques de notre capteur hybride, nous l'avons comparé aux performances des capteurs thermiques classiques à travers la détermination de son rendement thermique.

La figure 6.8 montre le rendement thermique du capteur hybride sans vitre supplémentaire, il est égal à 62% lorsque la température d'entrée du fluide est égale à la température ambiante.

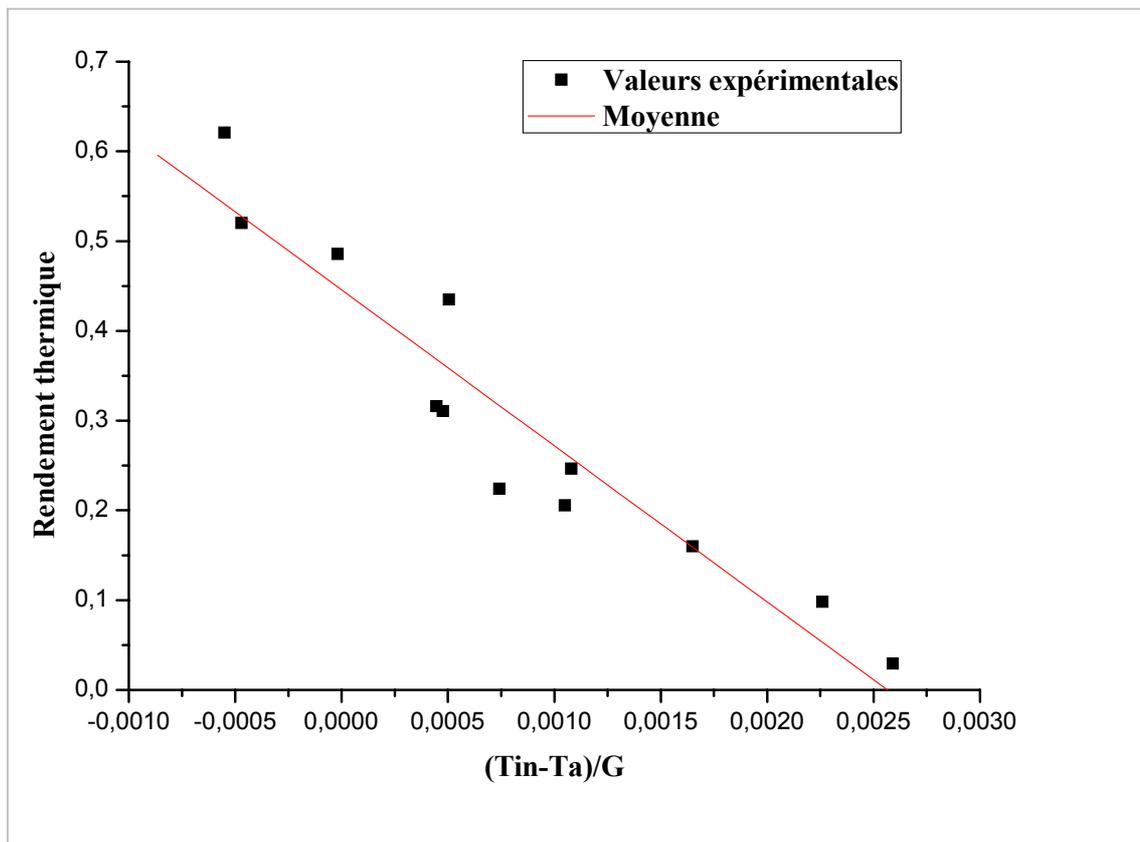


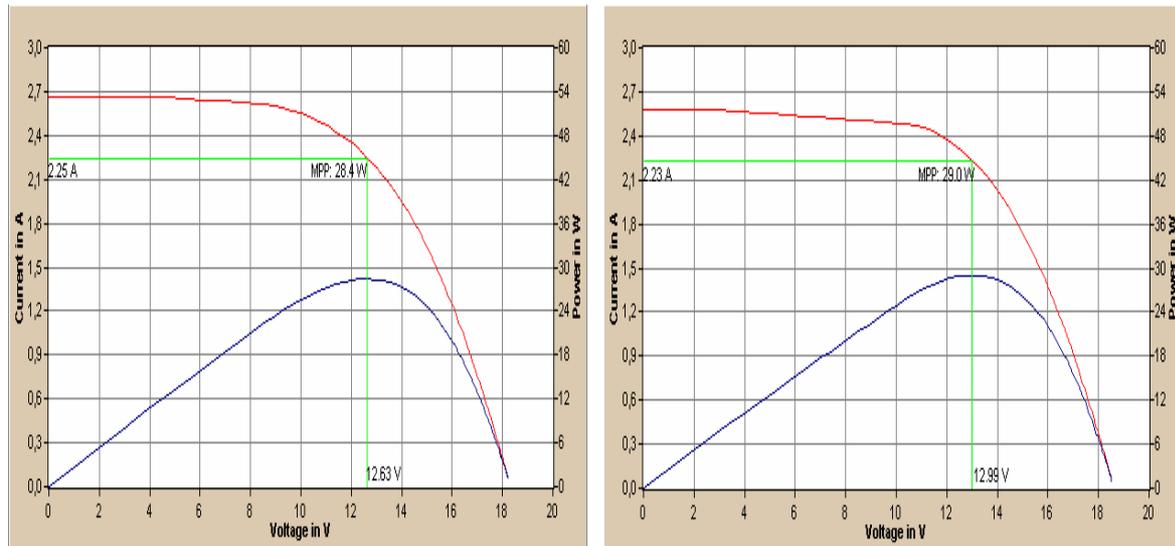
Figure 6.8 : Rendement thermique du capteur hybride non recouvert

$(T_{in}-T_{out})/G$ est en $K.m^2/W$.

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 (voir chapitre 2 de ce document).

6.6.3 Performances électriques du capteur hybride non recouvert

Les performances électriques du capteur hybride sont présentées sur la figure 6.9 (a). Nous remarquons que le courant maximum pour le capteur hybride (2.25A) est supérieur à celui du capteur photovoltaïque libre (2.23A) (figure 6.9 (b)) et que le rendement électrique est presque égal pour les deux capteurs.



a- Capteur isolé thermiquement et non recouvert d'une vitre

b- Capteur photovoltaïque libre témoin

Figure 6.9 : Caractéristique I (V) du capteur hybride non recouvert et du capteur libre

L'intégration de l'échangeur de chaleur a provoqué la diminution de la température du capteur ce qui va augmenter son rendement électrique.

6.7 Effet de l'ajout d'une vitre supplémentaire au capteur hybride

Pour augmenter d'avantage les performances thermiques du capteur hybride, nous avons étudié l'effet de l'ajout de la vitre supplémentaire.

6.7.1 Distribution de la température dans le capteur hybride recouvert

La température maximum de la cellule du capteur hybride obtenu avec l'ajout de la vitre est de 59°C. Elle était de 93°C sans échangeur de chaleur.

La figure 6.10 montre la distribution de la température dans le capteur hybride recouvert d'une vitre supplémentaire.

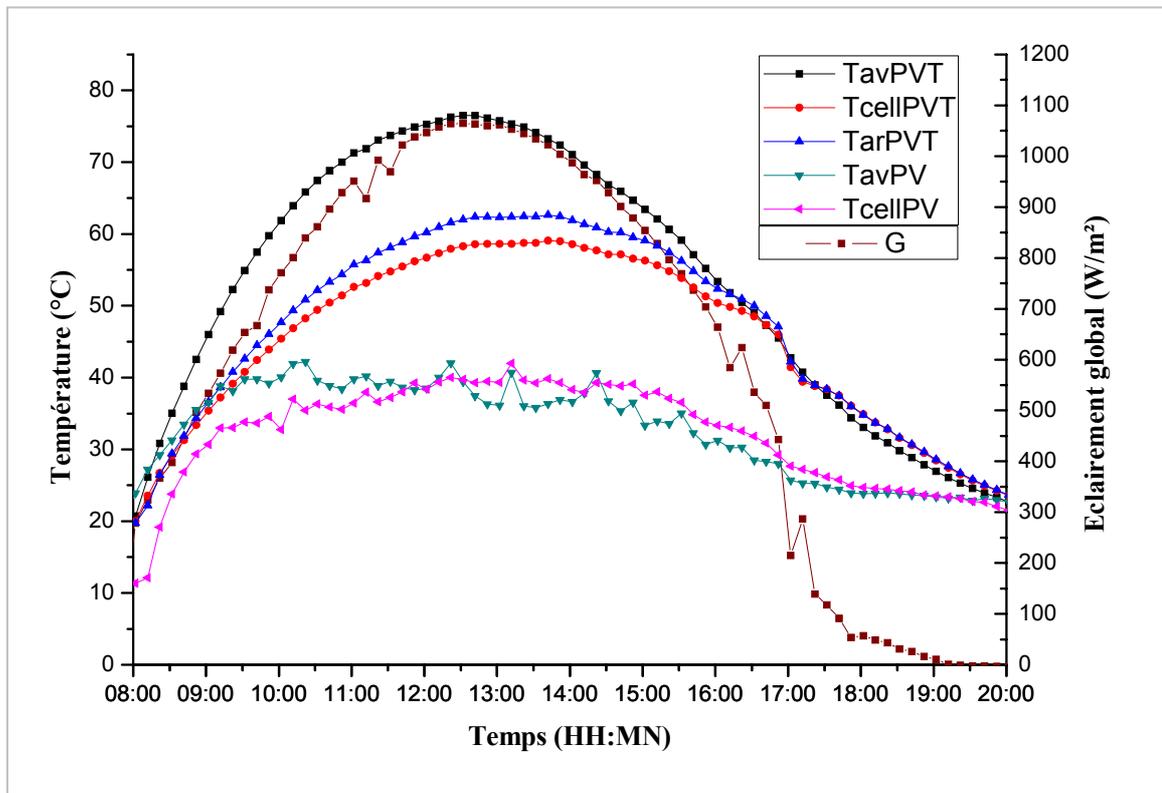


Figure 6.10 : Distribution de températures dans le capteur hybride recouvert

Les résultats que nous avons trouvés expérimentalement confirment les résultats théoriques, en effet l'ajout de la vitre augmente le niveau des températures mais à cause de la présence d'un échangeur de chaleur ces températures n'atteignent pas les valeurs obtenues dans la deuxième configuration.

6.7.2 Rendement thermique du capteur hybride recouvert

L'allure du rendement thermique du capteur hybride recouvert est représentée sur la figure 6.11, on remarque que les valeurs de la température réduite $(T_{in} - T_a)/G$ sont toutes négatives, ceci s'explique par le fait que la température d'entrée du fluide durant les tests était inférieure à la température ambiante.

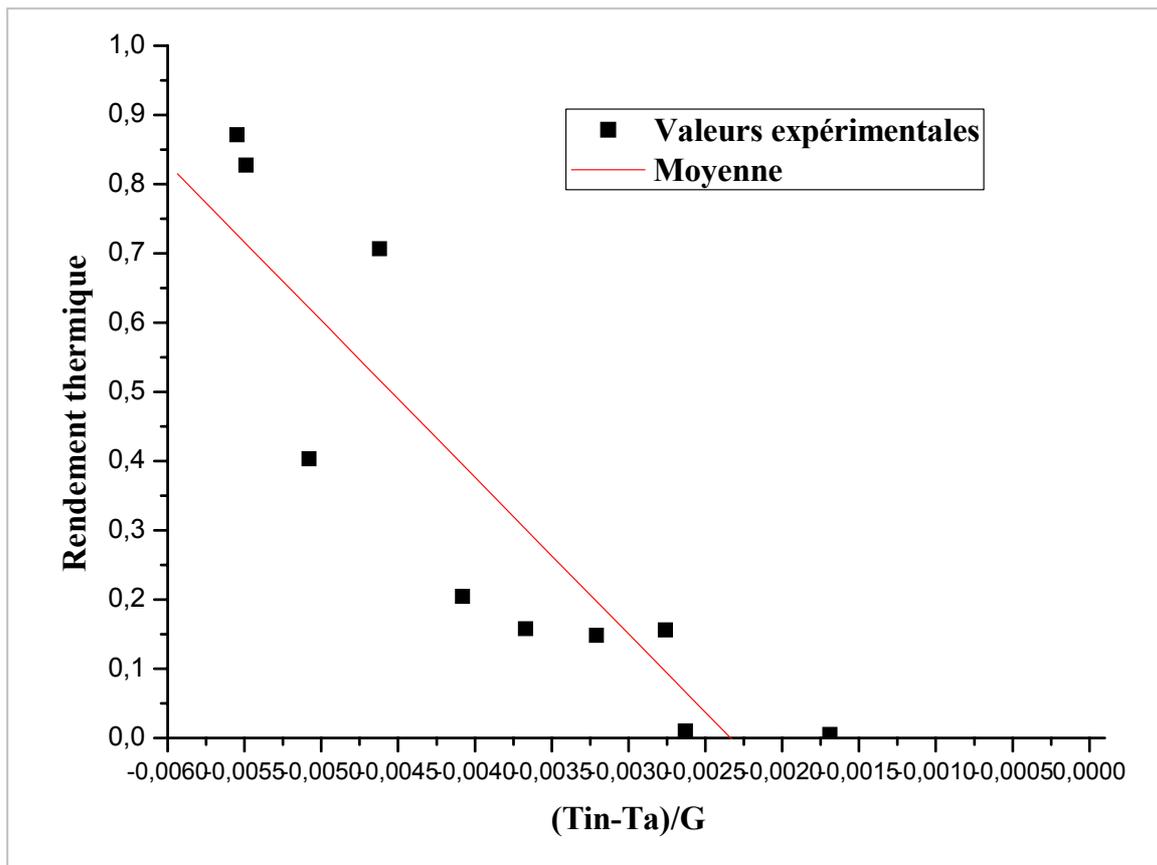


Figure 6.11 : Rendement thermique du capteur hybride recouvert

$(T_{in}-T_{out})/G$ est en $K.m^2/W$.

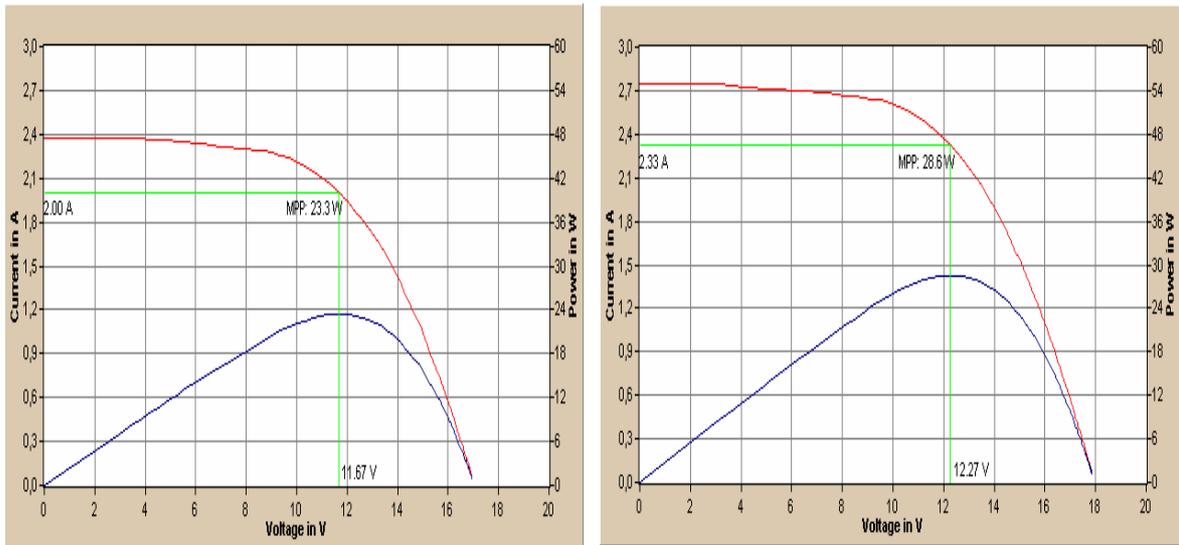
Le rendement thermique du capteur hybride recouvert est supérieur à celui du capteur non recouvert à cause de l'augmentation des températures.

6.6.3 Performances électrique du capteur hybride recouvert

Les performances électriques du capteur hybride couvert sont montrées sur la figure 6.12 (a) et celles du capteur photovoltaïque laissé libre sont montrées sur la figure 6.12 (b).

Nous remarquons que le rendement électrique du capteur hybride recouvert a chuté de 18% par rapport au rendement du capteur témoin.

Le courant maximum délivré par le capteur hybride vaut 2.00A et dans les mêmes conditions de rayonnement incident et de vitesse de vent, le capteur photovoltaïque a délivré 2.33A.



a- Capteur isolé thermiquement et recouvert d'une vitre

b- Capteur photovoltaïque témoin

Figure 6.12 : Caractéristique I (V) du capteur hybride recouvert et du capteur libre

Nous pouvons dire que la présence de la vitre augmente les performances thermiques du capteur hybride et influe négativement sur ses performances électriques.

Conclusion générale

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.

Nous avons 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 et la cartographie de la température pour quatre configurations, à savoir le capteur photovoltaïque isolé thermiquement avec ou sans échangeur de chaleur et avec ou sans vitre.

Nous avons ensuite étudié le capteur hybride expérimentalement à travers le prototype réalisé au sein de l'Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables de Ghardaïa.

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 obtenu un rendement thermique égal à 60% du capteur hybride sans vitre et de 70% pour le capteur hybride avec vitre.

Le rendement électrique a été amélioré pour le capteur non couvert par rapport au capteur témoin, par contre pour le capteur couvert il a été diminué de 18% par rapport au capteur témoin.

Les résultats expérimentaux confirment ceux de la théorie et on peut dire que les performances thermiques du capteur hybride peuvent être améliorées en ajoutant une vitre mais au prix d'une diminution des performances électriques. Donc pour les applications où nous intéressons à la production thermique nous utiliserons le capteur hybride recouvert et pour les applications où la production électrique est primordial nous utiliserons le capteur hybride sans vitre supplémentaire.

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 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.

Comme perspectives à notre travail, il conviendrait sans doute de mener 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.

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.

Bibliographie

[1] B.Equer, Physique et technologie de la conversion photovoltaïque, volume 1. Ellipses, (1993).

[2] <http://www.cerdecam.be> , (2005).

[3] E.Buchet, Etude du dimensionnement et développement d'un logiciel d'aide a la conception de système de production d'énergie utilisant la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. Thèse de Doctorat, faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, Marseille, France (1988).

[4] C. Honsberg, S. Bowden, photovoltaics: devices, systems and applications, pvcdrum 1.0 photovoltaics special research centre, university of New South Wales, (1998).

[5] M.A. de Blas, J.L. Torres, E. Prieto, A. Garcya, Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices. Renewable Energy, N°. 25 371–380, (2002).

[6] I. Hadj Mahammed, Modélisation du générateur photovoltaïque. Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, (Novembre 2002).

[7] A. Hoque, K.A. Wahid, New mathematical model of a photovoltaic generator (pvg). Journal of Electrical Engineering Vol. EE 28, No. 1, (June 2000).

[8] K.Sobaihi, Etude et réalisation d'un hacheur de Tracking du Point de Puissance Maximale (MPPT) à contre réaction de tension. Thèse de Magister Ecole Nationale Polytechnique, (Décembre 2003).

[9] H. Knopf, Analysis, simulation, and evaluation of maximum power point tracking (MPPT) methods for a solar powered vehicle. Master thesis, Portland State University (1999).

[10] F.Lasnier and T.G.Ang, Photovoltaic Engineering Handbook. Adam Hilger, Bristol and New York, (1990).

[11] J. J .Wysocki and P. Rappaport, Effect of temperature on photovoltaic solar energy conversion. *J. Appl .Phys* .31, 571–578. (1960).

[12] M. S.Saidov, Z. M.Abdul'nabi, R. R.Bilyalov and A.S. Saidov, Temperature characteristics of silicon solar cells. *Appl. Solar Energy* 31(6), 84–88, (1995).

[13] K. Emery, J. Burdick, Y. Caiyem, D. Dunlavy, H. Field, B. Kroposki and T. Moriarty. Temperature Dependence of Photovoltaic Cells, Modules, and Systems. Proceedings of the 25th IEEE PV Specialists Conference, May 13-19, Washington DC, USA, pp. 1275-1278, (1996).

[14] Stefan Krauter, Mohammed J. Salhi, Sandra Schroer, Rolf Hanitsch, New façade system consisting of combined photovoltaic and solar thermal generators with building insulation. Seventh International IBPSA Conference Rio de Janeiro, Brazil August 13-15, (2001).

[15]<http://entreprises.ademe.fr/paca/2000dr01/2300dr01/2320dr01/2323dr01/2323pc02.asp> (2004).

[16] Duffie, J. A. and Beckman W. A, Solar Engineering of Thermal Processes, 2nd Edition, John Wiley & Sons, New York, (1991).

[17]<http://www.prochauffage.com/pageLibre000100f1.html?PHPSESSID=44b72a97d03383b735e0ce063622f084> (2005).

[18] http://www.canren.gc.ca/prod_serv/index_f.asp?CaId=141&PgId=751 (2005).

[19] http://www.cyber.uhp-nancy.fr/demos/CH-TCHAL/cha_2/index.html (2005).

[20] Ashley B. Abbott, Analysis of Thermal Energy Collection from Precast Concrete Roof Assemblies. Master of Science In Mechanical Engineering, faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, USA, (juillet 2004).

[21] J.M. Koo, development of a flat-plate solar collector design program. Master of science (mechanical engineering), university of wisconsin-madison, USA,(1999).

[22] Duffie, J. A. and Beckman W. A, Solar Energy Thermal Process. Wiley-Interscience, New York, (1974).

[23] ASHRAE Standard 93-86, Methods of Testing to Determine the Thermal Performance of Solar Collectors, American Society of Heating, Refrigeration, and Air Conditioning Engineers, (1986).

[24] SRCC Document RM-1, Methodology for Determining the Thermal Performance Rating for Solar Collectors. Solar Rating and Certification Corporation, Florida, (1994).

[25] K. G. T Hollands, T. E .Unny. G. D .Raithby and L. Lonicek., Free Convection Heat Transfer Across Inclined Air Layers. Transactions of ASME Journal of Heat Transfer, Vol. 98, pp. 189, (1976).

[26] Y.Yiqin, K. G. T .Hollands, A. P .Brunger, Measured Top Heat Loss Coefficients for Flat Plate Collectors with Inner Teflon Covers. Proceedings of the Biennial Congress of the International Solar Energy Society, Denver, Colorado, USA, August 19-23, pp. 1200, (1991).

[27] Suzuki A. and Kitamura S, Combined photovoltaic and thermal hybrid collector. Proceedings of the 1st photovoltaic science and engineering conference in Japan, Japanese journal of applied physics, Volume 19 (1980) supplement 19-2, p79-83, (1979).

[28] Russell T. E.A, Combined photovoltaic/thermal collector panels of improved design. p990- 996, IEEE Photovoltaic Specialists Conference, p990-996, (1981).

- [29] Tscharnner R. et al., Low temperature liquid PV/T collector, 5th Photovoltaic Solar Energy Conference. (CEC), p560-564, (1983).
- [30] Lalovic B. et al., The application of hybrid a-Si:H PV and Thermal collectors for different usages. 8th Photovoltaic solar energy conference, (CEC), p280-283, (1988).
- [31] Sudhakar S.V. and Sharon M, Fabrication and performance evaluation of a photovoltaic/thermal hybrid system. SESI Journal 4(1): p1-7, (1994).
- [32] Florschuetz L.W, Extension of the Hottel-Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors. Solar Energy, Vol 22, p361-366, (1979).
- [33] Takashima T, New proposal for photovoltaic/thermal solar energy utilization method. Solar Energy, Vol. 52, p241-245, (1994).
- [34] Bergene T. and Lovvik O.M, Model calculations on a flat-plate solar heat collector with integrated solar cells. Solar Energy, Vol. 55, p453-462, (1995).
- [35] Hendrie S.D, Photovoltaic/thermal collector development program - final report, Lexington, Massachusetts, Massachusetts Institute of Technology, Lincoln Laboratory, (1982).
- [36] Kern Jr. E.C. and Russell M. C., Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems. In Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists, Washington DC, USA, p1153 - 1157. (1978).
- [37] Hendrie S. D, Evaluation of combined photovoltaic / thermal collectors. In Proc. ISES Int. Congress, Atlanta, USA, Vol. 3, p1865 – 1869, (1979).
- [38] Bhargava A. K, Garg H. P. and Agarwal R. K., Study of a hybrid solar system - solar air heater combined with solar cells. Energy Convers. Mgmt 31, 471 - 479. (1991).

- [39] Prakash J, Transient analysis of a photovoltaic / thermal solar collector for cogeneration of electricity and hot air / water. *Energy Convers. Mgmt* 35,p 967 – 972, (1994).
- [40] Sopian K., Liu H. T., Yigit K. S., Kakac S. and Veziroglu T. N., An investigation into the performance of a double pass photovoltaic thermal solar collector. In Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exhibition, San Francisco, USA, AES Vol. 35, p 89 – 94. (1995).
- [41] Brinkworth B. J, Cross B. M., Marshall R. H. and Hongxing Yang , Thermal regulation of photovoltaic cladding. *Solar Energy* 61, p169-178, (1997).
- [42] Garg H. P. and Adhikari R. S, Performance analysis of a hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector with integrated CPC troughs. *Int. J. Energy Res.*23, p1295 – 1304, (1999).
- [43] Hauser T., Rogash H, Latent heat storage on photovoltaics. In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol III, p2265 – 2267, (2000).
- [44] Huang B.J, Lin T.H., Hung W.C. and Sun F.S., Performance evaluation of solar photovoltaic / thermal systems. *Solar Energy* 70, p443 – 448, (2001).
- [45] Zondag H. A., De Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C., Van Steenhoven A.A, The thermal and electrical yield of a PV-Thermal collector. *Solar Energy* Vol. 72, No. 2, p113–128, (2002).
- [46] Zondag H. A., de Vries D.W., Van Helden W.G.J., Van Zolingen R.J.C., Van Steenhoven A.A, The yield of different combined PV-thermal collector designs. *Solar Energy*, 74, p235-269. (2003).
- [47] B. SANDNES and J. REKSTAD, A photovoltaic/thermal (pv/t) collector with a polymer absorber plate. Experimental study and analytical model. *Solar Energy* Vol. 72, No. 1, p63–73, (2002).

- [48] Tripanagnostopoulos Y., Yianoulis P. and Patrikios D, Hybrid PV - TC solar systems. In Proc. of Int. Conf. WREC IV, Denver, USA, p505 – 508, (1996).
- [49] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M, Hybrid PV - ICS systems. In Proc. of Int. Conf. WREC V, Florence, Italy, p1788 – 1791, (1998).
- [50] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th. and Souliotis M, Low cost improvements to building integrated air cooled hybrid PV – Thermal systems. In Proc. 16th European PV Solar Energy Conf. Glasgow, U.K. Vol II, p1874 – 1877, (2000).
- [51] Tripanagnostopoulos Y., Tzavellas D., Zoulia I. and Chortatou M, Hybrid PV/T systems with dual heat extraction operation. In Proc. 17th PV Solar Energy Conference, Munich, Germany, 22-26 Oct, p2515-2518, (2001).
- [52] Tripanagnostopoulos Y., Nousia Th., Souliotis M. and Yianoulis P, Hybrid Photovoltaic/Thermal solar systems. *Solar Energy*, 72,p 217-234, (2002).
- [53] Christophe Ménézo, Intégration de capteurs hybrides photovoltaïques thermiques au bâti. Projet de recherche intégré 6.2. Rapport final. Centre de Thermique de Lyon, (juillet 2004).
- [54] G. Fraisse, C.Viardot, O. Lafabrie and G. Achard. Development of a simplified and accurate building model based on electrical analogy. *Energy and Building* 1430, p1-14, (2002).
- [55] M.J.M. Jong, System studied on combined PV/Thermal panels. Elfes symposium thermische Solarenergie, 9-11 May , Kloster Banz, Staffelstein, Germany, (2001).
- [56] M.J.M. Jong, H.A., Zondag. System studies on combined PV thermal panels. 9th International Conference on solar Energy in High latitudes, Northsun 2001, 6-8 May, The Netherlands, (2001).
- [57] M. Bakker, K.J. Strootman, M.J.M. Jong, PVT panels: fully renewable and competitive, ISES SWC Göteborg, Germany, (2003).

[58] H.A.Zondag, W.G.J. van Helden, PV-Thermal domestic systems. 3rd World Conference on Photovoltaic energy Conversion, Osaka, Japan, May 11-18, (2003).

[59] Adel A. Ghoneim , Ahmad Y. Al-Hasan, Ali H. Abdullah, A economic analysis of photovoltaic-powered solar domestic hot water systems in Kuwait. Renewable Energy 25, p 81–100, (2002).

[60] W.G.J. van Helden, H.A. Zondag, M.Bakker, M.J. Elswijk, M.J.M.Jong, K.J.Strootman, PVT panels and PVT collectors: pathways to distributed solar cogeneration. European solar Energy conference (ESTEC), 26-27 June, (2003).

[61] K.adamoto, P. Supanich, T.Nualboonrueng, P.Sichanugrist, A-Si Hybrid solar collector. 3rd World Conference on photovoltaic Energy Conversion may 11-18, Osaka, japan, (2003).

[62] M.J. Elswijk, M.J.M. Jong, K.J. Strootman, J.N.C. Braakman, E.T.N. de Lange, W.F. Smit. Photovoltaic/thermal collectors in large solar thermal systems.19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11, Paris, France, (Juin 2004).

[63] M.Bakker, M.J. Elswijk, H.A. Zondag, M.T.N. Ottenbros, W.G.J. van Helden, Outdoor performance of uncovered pv/thermal panels. 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition. 7-11, Paris, France, (Juin 2004).

[64] H.A. Zondag, M.J. Elswijk, M. Bakker, PV-Thermal collector development – an overview of the lessons learnt. 19th European PV Solar Energy Conference and Exhibition, 7-11 June , Paris, France (juin 2004).

[65] Y. Tripanagnostopoulos, Low concentration hybrid photovoltaic/thermal (pv/t) solar energy systems. IP programme: “ICT Tools: PV systems Teaching and Learning Patra 1st July-10th July, (juillet 2004).

[66] E. Geslain-Vertut, H. Demasles, D. Blanquet, Y. Lausenaz, Y. Jautard, E. Beluche and Y. Bouzidi, Optimisation of the design of a semi-transparent photovoltaic roof

(PV/Thermal modules), 19th European Photovoltaic and Solar Energy Conference and Exhibition, Paris,(juin 2004).

[67] W. R. Anis, R. P. Mertens and R. Van Overstraeten, Calculation of solar cell operating temperature in a flat plate PV array. In *5th E .C . PV Solar Energy Conference*, p520–524, (1983).

[68] M. K .Fuentes, Thermal model of residential photovoltaic arrays. In *17th IEEE PV Specialists Conference*, p1341–1346, (1984).

[69] T. Schott, Operational temperatures of PV modules. In *6th PV Solar Energy Conference*, p392–396, (1985).

[70] A. D. Jones and C. P. Underwood, A thermal model for photovoltaic systems. *Solar Energy Vol. 70, No. 4*, p349–359, (2001).

[71] U.P. Merrigan, *Sunlight to Electricity*. MIT Press, (1982).

[72] J. P. Holman, *Heat Transfer*. McGraw-Hill. (1992).

[73] Coventry, J., Kreetz, H., and Dennis, M., 2001: Technical manual - TRNSYS Components developed at the ANU, (2001).

[74] Bejan A. *Heat Transfer*, Wiley, New York, (1993).

[75] M. Merzouk, *Les capteurs sous-vide et leurs performances instantanées : Simulation et expérimentations*. Thèse de Magister, CDER, Alger, (1986).

[76] D.W. de Vries, W.G.J. van Helden, A.A. van Steenhoven, R.J.C. van Zolingen, P.T. Smulders, *Design of a Photovoltaic/Thermal Hybrid Panel: Design Considerations and Preliminary Model*. EuroSun'96, (1996).