

# Optimisation de la conversion solaire grâce au concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique

Patrick DUPEYRAT<sup>1,2\*</sup>, Hervé PABIOU<sup>2</sup>, Gérald KWIATKOWSKI<sup>3</sup> et Christophe MENEZO<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Germany

<sup>2</sup>CETHIL UMR 5008, CNRS/INSA/UCB Lyon1, France

<sup>3</sup>EDF R&D - EnerBAT, France

<sup>4</sup>LOCIE FRE CNRS 3220, CNRS/Université de Savoie, Savoie Technolac, France

\* (auteur correspondant : [patrick.dupeyrat@ise.fraunhofer.de](mailto:patrick.dupeyrat@ise.fraunhofer.de))

**Résumé** - L'intérêt grandissant pour le développement de bâtiments à haute efficacité énergétique nécessite le développement de nouveaux types d'enveloppe active et multifonctionnelle pouvant couvrir une partie des besoins énergétiques du bâtiment. Dans cet article, le concept de capteur hybride Photovoltaïque-Thermique est présenté. Les performances thermiques et électriques du prototype ont été analysées grâce aux expérimentations menées en ambiance contrôlée (ensoleillement, vent) dans les installations du Fraunhofer ISE. Les valeurs obtenues montrent une amélioration très importante des performances globales comparées aux capteurs hybrides référencés dans la littérature scientifique.

## Nomenclature

$G$	rayonnement solaire incident, $W.m^{-2}$	$\varepsilon$	Emissivité
$T_m$	température fluide moyenne, $K$	$\alpha$	Coefficient d'absorption
$T_a$	température ambiante, $K$	$\tau$	Transmittance

## 1. Introduction

L'intérêt grandissant pour le développement de bâtiments à haute efficacité énergétique est fortement lié aux efforts récents concernant la réduction des émissions de gaz à effet de serre et aux réserves limitées en ressources énergétiques fossiles ou fissiles. Dans ce contexte, l'intégration à grande échelle de composants solaires tels que les modules photovoltaïques et les capteurs solaires thermiques dans l'enveloppe du bâtiment est l'une des directions privilégiées devant conduire à une production locale d'énergie. Néanmoins, la surface de toit avec une bonne orientation disponible pour l'installation de composants solaires est de façon générale limitée, ce qui à court ou moyen terme peut conduire à un conflit entre son utilisation pour la production de chaleur solaire ou bien d'électricité.

Un module photovoltaïque (PV) classique de technologie silicium cristallin convertit entre 12 et 18 % de l'énergie solaire incidente. Pour arriver à ce résultat, un module PV absorbe en réalité entre 80 et 90% du rayonnement incident, dont la majeure partie est dissipée sous forme de chaleur, augmentant ainsi la température interne du module. Cette augmentation de la température réduit sensiblement les performances électriques du module. Dans ce contexte, l'utilisation de capteur multi énergie et multi fonctionnel photovoltaïque thermique (PV-T) permet à la fois de convertir l'énergie solaire captée en électricité mais aussi de valoriser l'autre part, habituellement perdue, en chaleur. Cela permettrait une utilisation optimale de la surface de toit disponible grâce à une double production énergétique tout en assurant une meilleure homogénéité visuelle.

## 2. Concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique

Le concept de capteur hybride photovoltaïque-thermique consiste à superposer les deux fonctions énergétiques électrique et thermique. Dans ce type de composant hybride, les cellules PV fonctionnent comme absorbeur thermique et sont refroidies grâce à la circulation d'un fluide caloporteur en face arrière [1,2]. La figure 1 présente une description d'un capteur PV-T plan vitré utilisant de l'eau comme fluide caloporteur. La présence du vitrage (optionnel) dans la partie supérieure du capteur est directement liée au type de système thermique dans lequel le capteur PV-T est intégré.

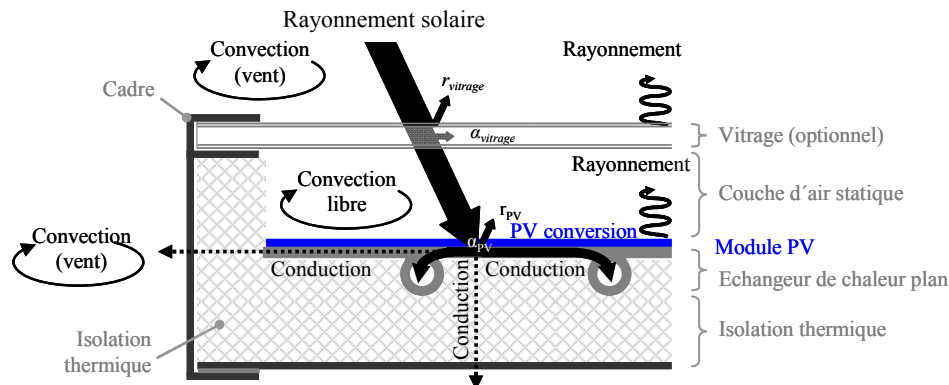


Figure 1 : Représentation schématique d'un capteur PV-Thermique plan et vitré.

L'une des applications les plus prometteuses concerne le développement de capteurs PV-T spécifiques pour le couplage avec un système d'eau chaude sanitaire [3]. En effet, bien qu'en relatif les besoins énergétiques pour l'eau chaude sanitaire soient relativement faibles pour des habitations standards (15 à 20% des besoins en chaleur) ils ne vont qu'augmenter les prochaines années avec l'amélioration de l'isolation thermique et de l'étanchéité à l'air des bâtiments limitant les besoins en chauffage. Les besoins en eau chaude sanitaire représentent environ 65% des besoins en chaleur d'une habitation de type *passivhaus* [4]. Pour ce type de système, le capteur PV-T doit pouvoir fournir un niveau de température d'eau chaude suffisant nécessitant la présence du vitrage entre le module et l'extérieur pour réduire les pertes thermiques. Ainsi le rendement thermique et donc le rendement global est augmenté. Cependant, la présence de la couverture engendre une diminution sensible des performances électriques du capteur en raison du coefficient de transmission du vitrage et des plus hautes températures de fonctionnement des cellules. Un capteur non-vitré peut conduire à un meilleur rendement électrique que des modules PV standards (température de fonctionnement plus basse). Cependant, la faible température de sortie de l'eau dans le collecteur permet difficilement son utilisation directe comme eau chaude sanitaire.

Comme il a été présenté précédemment [5], les performances des capteurs PV-T sont bien en deçà des performances de capteurs thermiques standards. Ces différences sont principalement liées à des verrous technologiques soulevant des problématiques scientifiques en lien avec les propriétés des matériaux et des transferts énergétiques. L'origine de ces différences de rendement est en effet reliée :

- au coefficient d'absorption des cellules PV cristallines ( $\alpha \sim 0,8$  à  $0,9$ ), plus faible que celui des revêtements hautement absorbants utilisés pour les capteurs solaires thermiques ( $\alpha \sim 0,95$ ).
- à l'émissivité des modules PV ( $\varepsilon \sim 0,9$ ) plus importante que celle de la surface sélective ( $\varepsilon \sim 0,05$ ), générant des pertes thermiques plus importantes.

- à la résistance thermique additionnelle entre la partie absorbante (cellules PV) et le fluide due aux matériaux encapsulant et aux adhésifs utilisés pour la connexion mécanique du module PV et de l'échangeur de chaleur.
- Et bien entendu au fait qu'une partie du rayonnement incident est convertie en électricité par les cellules PV et n'est donc pas disponible pour la production de chaleur.

### 3. Etude expérimentale

L'étude présentée consiste en un travail expérimental guidant la mise au point d'un nouveau concept de capteur thermique plan et vitré performant permettant l'utilisation de la chaleur des modules PV au sein d'un système thermique classique et à aboutir à la mise au point d'un prototype. La réalisation d'un tel composant est à l'intersection de deux domaines bien distincts : solaire thermique et solaire photovoltaïque. Par conséquent l'optimisation simultanée des deux fonctions « production d'électricité » et « production de chaleur » conduit à l'identification de procédés et de matériaux différents de ceux classiquement utilisés pour un composant monofonctionnel.

#### 3.1. Etude des propriétés thermiques

L'un des points clés de ce type de composant est la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique et thermique. Les recherches vont porter sur les moyens de limiter les pertes (réflexion, déperditions thermiques), augmenter l'absorption (propriétés optiques), la conversion (électrique et échangeur thermique) et la récupération de l'énergie collectée. Au sein de ce large domaine d'investigations, nous nous focalisons dans un premier temps sur les propriétés optiques et thermiques des matériaux. L'approche la plus simple pour concevoir un absorbeur PV-T est de connecter thermiquement et mécaniquement un module PV à la partie supérieure d'un échangeur de chaleur plat. Cette méthode nécessite l'utilisation d'une couche d'adhésif généralement choisi ayant de bonnes propriétés thermiques. Une autre méthode plus avancée consiste en la lamination des éléments consistants le module PV (cellules, polymères et vitrages) directement à la surface d'un échangeur de chaleur plan. L'avantage de cette méthode est de diminuer fortement la résistance de contact entre la fonction électrique et thermique en limitation des couches intermédiaires. Le Tableau 1 présente les coefficients de transfert de chaleur entre les cellules et l'échangeur de chaleur en fonction de la méthode utilisée. D'après les sources présentées, une optimisation du contact entre les fonctions thermiques et électriques permet une augmentation d'un facteur 10 du coefficient de transfert de chaleur.

Technique utilisée	Coefficient de transfert de chaleur correspondant	
Collage adhésif	45 W/(m <sup>2</sup> .K)	<i>mesuré par De Vries (1998)</i>
Collage adhésif (amélioré)	100 W/(m <sup>2</sup> .K)	<i>mesuré par Van Helden (2004)</i>
Lamination	500 W/(m <sup>2</sup> .K)	<i>calculé par Zondag (2003)</i>
Lamination (améliorée)	700 W/(m <sup>2</sup> .K)	<i>calculé par Dupeyrat (2009)</i>

*Tableau 1 : coefficients de transfert de chaleur entre cellules et échangeur. La lamination améliorée correspond à une optimisation du nombre et des propriétés thermiques de couches situées entre les cellules et l'échangeur de chaleur.*

#### 3.2. Etude des propriétés optiques

Dans le cas d'un capteur PV-T vitré (voir Figure 1), la partie électrique est protégée de l'extérieur par le vitrage additionnel. Si la technique de la « lamination directe » est utilisée et

que l'échangeur de chaleur utilisé est suffisamment rigide pour apporter une stabilité aux cellules solaire (fragiles), le verre du module PV peut être remplacé par un matériau ayant de meilleures propriétés optiques. Les films de type fluoro-polymère, ayant un indice de réfraction inférieur à celui du verre peuvent être des candidats potentiels.

Après une série de tests, deux types d'échantillons ont été préparés :

- Echantillon A : verre/polymère/cellule PV/polymère/aluminium anodisé
- Echantillon B : f-polymère/polymère/cellule PV/polymère/aluminium anodisé

Ces échantillons ont ensuite été analysés. La réflexion optique a tout d'abord été mesurée de manière spectrale sur chacun des échantillons en utilisant une sphère intégratrice (sphère d'Ulbricht). Les résultats, présentés dans la figure 2 (a) montrent que l'échantillon B a une plus faible réflectivité que l'échantillon A dans le domaine de longueur d'onde 300-1100 nm correspondant au maximum du spectre solaire. En admettant que tous les photons non réfléchis sont absorbés, le coefficient global d'absorption solaire a été calculé et était de  $\alpha \sim 0.9$  pour l'échantillon A et  $\alpha \sim 0.93$  pour l'échantillon B.

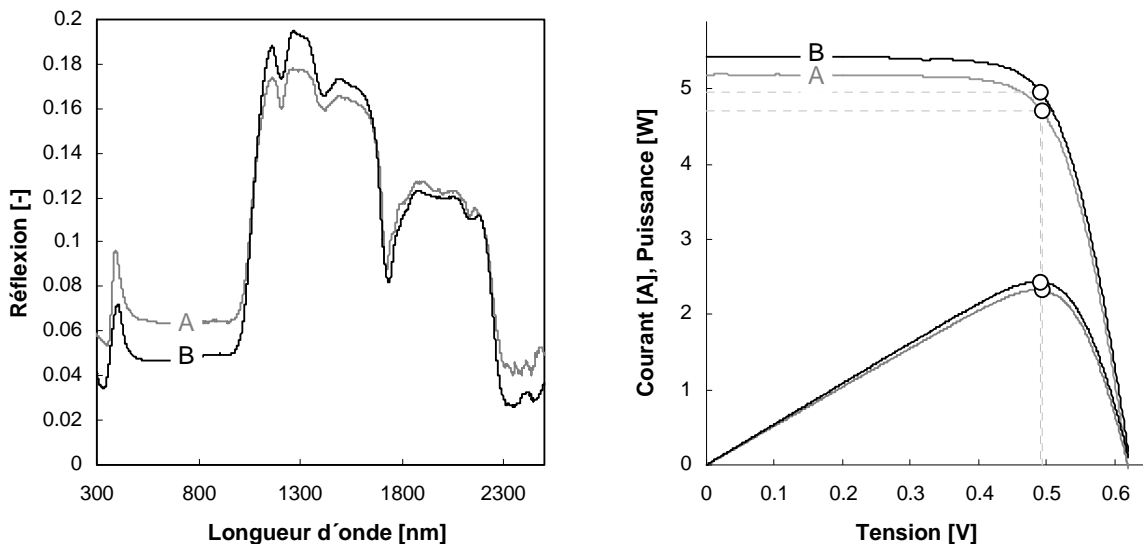


Figure 2 : Réflexion mesurée sur les échantillons A et B (gauche). Courbes I-V et P-V mesurées sur les échantillons A et B (droite).

Cependant, dans le cas des capteurs PV-T une réduction de la réflexion au niveau de l'absorbeur ne signifie pas uniquement une amélioration du coefficient d'absorption solaire, mais potentiellement une augmentation de l'intensité de photons atteignant la cellule PV par rapport à un cas conventionnel. Les courbes de courant-tension caractéristiques des cellules solaires des échantillons A et B ont été mesurées. Les résultats, présentés dans la figure 2 (b) montrent que la cellule B a un courant plus important que l'échantillon A. Le rendement de la cellule A était de 15.7% alors qu'il était de 16.4% pour la cellule B (cellules équivalentes avant lamination).

### 3.3. Bilan

Par une étude fine des propriétés optiques et thermiques de chacune des couches de matériaux traversées par le rayonnement et une adéquation des propriétés spectrales de ces matériaux avec les phénomènes de conversion du rayonnement solaire, ce travail a débouché sur un choix optimal des matériaux et des paramètres géométriques et sur un mode de conception original. Les propriétés thermo-physiques et optiques de chacun des matériaux utilisés ont été caractérisées sur des bancs de tests appropriés. Puis par une approche locale,

une étude sur les pertes d'énergie a permis d'augmenter la part convertie en électricité et la part transmise au fluide caloporteur.

## 4. Conception et étude des performances d'un prototype PV-T

### 4.1. Description du prototype

Quatre rangées de huit cellules PV monocristallines (156 x 156 x 0.2 mm) ont été préparées et connectées électriquement en série puis insérées entre deux films de polymère (Éthylène-acétate de vinyle) d'épaisseur 0.46 mm et déposées sur la surface plate d'un échangeur de chaleur de type *rollbond* (1350 x 750 mm). La géométrie de cet échangeur de chaleur était de type fractal [6]. Un film de f-polymère ayant une épaisseur de 0.13 mm a été déposé sur l'ensemble. Toutes ces couches ont alors été laminées ensemble sous des conditions de température, de pression et de vide semblables à celles utilisées pour la lamination de modules PV conventionnels. Puis comme cela est présenté dans la Figure 3, cet absorbeur PV-T a été inséré dans un cadre métallique et une couche d'isolant a été déposée au niveau de sa face inférieure. Enfin, un vitrage recouvert d'une couche antireflet ( $\tau > 0.94$ ) a été déposé sur la partie supérieure du cadre métallique. Il était séparé de l'absorbeur par une couche d'air d'environ 20 mm. Les performances thermiques et électriques du prototype ont été analysées grâce aux expérimentations menées en ambiance contrôlée (ensoleillement, vent) dans les installations du Fraunhofer ISE.

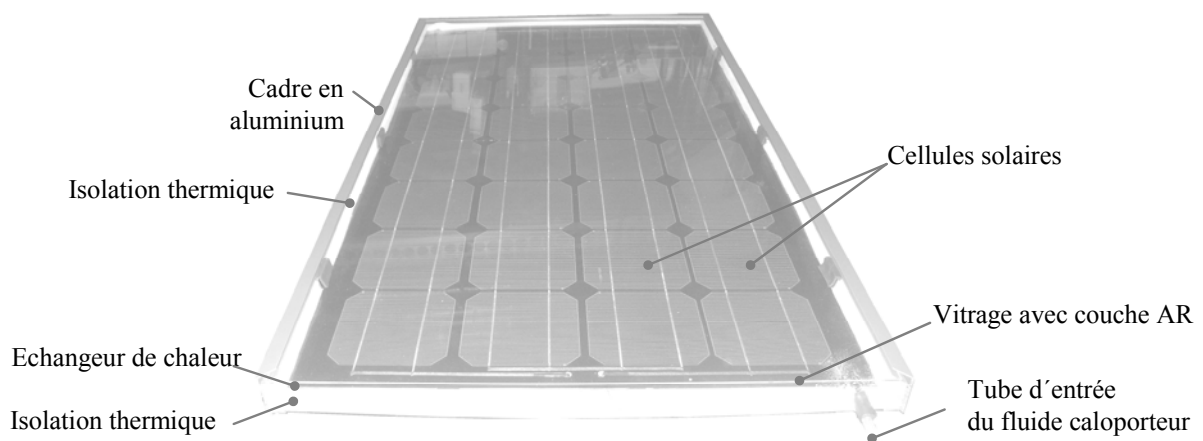


Figure 3 : Prototype développé.

### 4.2. Etude des performances électriques et thermiques

Les mesures pour déterminer les performances thermiques du capteur PV-T ont été réalisées en accord avec la norme EN12975 [7]. La Figure 4 (a) présente les courbes de rendement thermique du capteur PV-T en mode maximal power point – avec extraction de courant et en mode ouvert (open-circuit) – sans extraction de courant. La courbe d'un capteur PV-T commercial (en mode mpp-maximum power point) est également présentée (pointillés). La Figure 4 (b) présente les courbes électriques Puissance-Tension des cellules du capteur PV-T mesurée pendant les mesures thermiques mpp du capteur développé. Une large diminution de la tension du capteur est observée amenant à une importante diminution du rendement du capteur avec des températures de fluide d'entrée augmentant. Un rendement thermique de référence de 82% (open-circuit) a été obtenu dans le cas d'une utilisation purement thermique du capteur. Dans le cas d'une utilisation hybride (PV + thermique) un

rendement de référence de 72% a été obtenu pour un rendement électrique de 10.5%. Cela correspond à une augmentation de 10% pour le rendement thermique et de 1% pour le rendement électrique par rapport au meilleur capteur PV-T référencé jusque là.

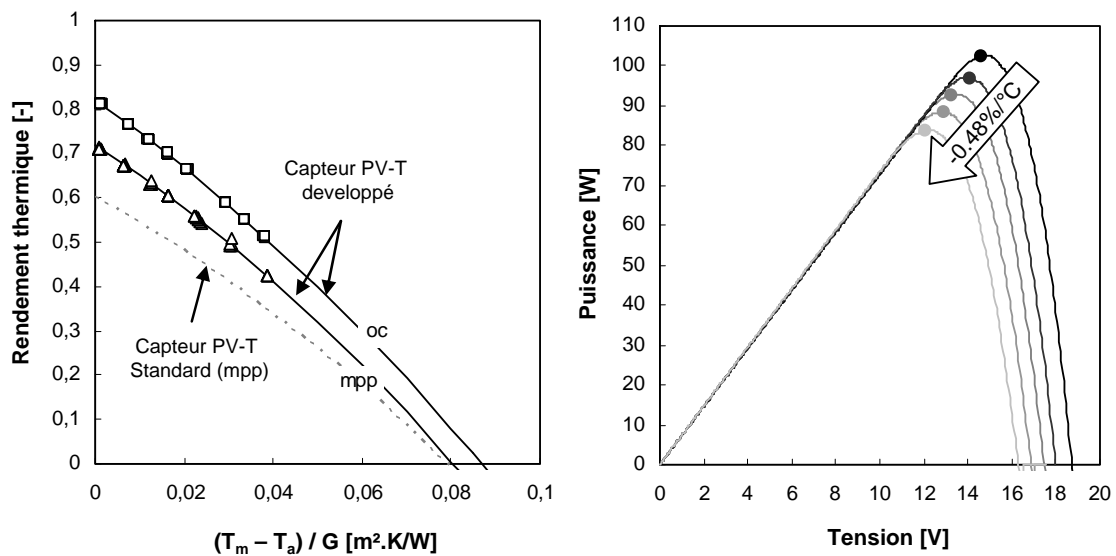


Figure 4 : courbes de rendement thermique (gauche) et électrique (droite) du prototype.

## 5. Conclusion

Un prototype de capteur hybride PV-T a été développé et testé au Fraunhofer ISE en tenant compte des normes existantes à la fois pour les capteurs solaires thermiques et les modules photovoltaïques. La première phase de mise au point de ce prototype repose sur une étude fine des propriétés optiques et thermiques des matériaux utilisés dans le domaine du solaire thermique et du photovoltaïque. Les résultats obtenus montrent une amélioration très importante des performances thermiques mais aussi électriques comparées aux capteurs hybrides référencés dans la littérature scientifique. Les perspectives de ce travail portent sur la fiabilité d'un tel composant face notamment à son vieillissement et sa tenue à des contraintes pouvant être sévères (stagnation, UV, ...) et répétitives sur la durée de vie.

## Références

- [1] H.A. Zondag. Flat-plate PV-Thermal collectors and systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Volume 12, Issue 4, Pages 891-959, 2008.
- [2] J.S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy* 78 (2005), 211–222.
- [3] PVT Roadmap – a European guide for the development and market introduction of PV-thermal technology. PVT forum: [www.pvtforum.org](http://www.pvtforum.org)., 2006
- [4] V. Quaschnig - Erneuerbare Energien und Klimaschutz. Hanser Verlag München, 2. Auflage 2009, ISBN 978-3-446-41961-2
- [5] P.Dupeyrat et al. Maximisation de la conversion électrique solaire en configuration d'intégration au bâti grâce au concept de capteur hybride Photovoltaïque-Thermique. Conférence SFT 2009.
- [6] M. Hermann. FracTherm - Fractal hydraulic structures for energy efficient solar absorbers and other heat exchangers. Conférence EUROSUN 2004.
- [7] EN 12975-1:2006 "Thermal solar systems and components. General requirements"