

# Maximisation de la conversion électrique solaire en configuration d'intégration au bâti grâce au concept de capteur hybride Photovoltaïque-Thermique

Patrick DUPEYRAT<sup>1,2\*</sup>, Christophe MENEZO<sup>2,3</sup>, Matthias ROMMEL<sup>1</sup>,  
Gerald KWIATKOWSKI<sup>4</sup> et Didier BINESTI<sup>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>LOCIE FRE CNRS 3220, CNRS/Université de Savoie, Savoie Technolac, France

<sup>4</sup>EDF R&D - EnerBAT, 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 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 modules photovoltaïques (PV) intégrés est l'une des directions privilégiée devant conduire à une production locale d'énergie. Cependant, l'intégration de tels composants directement dans le bâtiment peut conduire à des risques de surchauffe des matériaux mais aussi du composant PV lui-même. La production électrique des modules PV étant liée à leur température de fonctionnement, le risque de surchauffe peut engendrer une perte importante de rendement. Dans ce contexte particulier, l'utilisation de capteurs hybrides Photovoltaïque-Thermique (PV-T) peut permettre l'évacuation et la valorisation de la chaleur résiduelle. Dans cet article, le concept de capteur PV-T est présenté. Un capteur PV-T en phase de pré-industrialisation a été testé selon les normes relatives aux composants solaires thermiques et aux composants solaires photovoltaïques. Les résultats de ces tests ont été utilisés pour évaluer les performances énergétiques d'installations PV-T au sein de l'environnement de simulation TRNSYS<sup>®</sup> afin de montrer l'intérêt de ce type de capteur pour les besoins du bâtiment.

## Nomenclature

$G$	rayonnement solaire incident, $W.m^{-2}$	<i>Symboles grec</i>	
$T_m$	température fluide moyenne, $K$	$\beta$	coefficient de température, $\%.K^{-1}$
$T_a$	température ambiante, $K$	$\eta_{th}$	rendement thermique
$T_{ref}$	température de référence, $K$	$\eta_{elec}$	rendement électrique
$T_{PV}$	température des cellules PV, $K$	$\alpha$	Coefficient d'absorption
$r_c$	PV packing factor	$\tau$	transmittance

## 1. Introduction

Un capteur photovoltaïque thermique (PV-T) est un capteur solaire hybride permettant de convertir une partie de l'énergie solaire captée en électricité et de valoriser l'autre, habituellement perdue, en chaleur. Le concept 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. Plusieurs configurations de capteur existent et varient principalement selon la nature du fluide utilisé (eau [1,2], air [3] ou bi-fluide [4]) et selon le type d'absorbeur (plan [1], concentrateur [2], bi-faciale [5]...).

Dans le cadre du développement au Fraunhofer ISE de capteur PV-T compact à fonctions superposées, les travaux de Zondag et al. sont particulièrement intéressants. Différents concepts de capteurs PV-T plans basés sur la circulation d'eau comme fluide caloporteur sont détaillés dans leurs travaux et notamment le concept de *Sheet-and-tube*, (voir Figure 1). Dans ce type de capteurs, les cellules PV, collées sur une plaque métallique, sont refroidies par la circulation d'eau dans des tubes en cuivre situés sur leur face arrière [1,6].

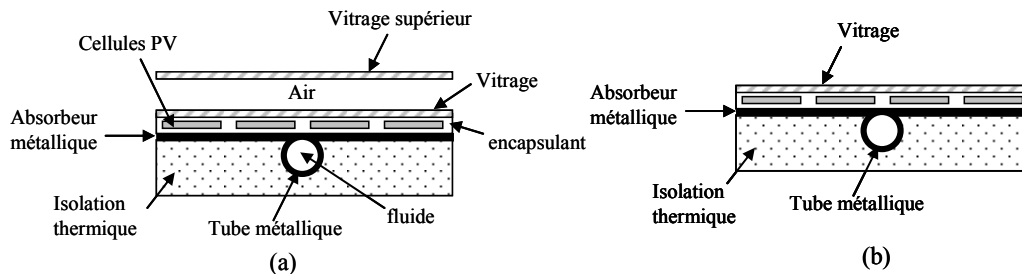


Figure 1 : Capteur hybride PV-T plan de type *Sheet-and-tube* utilisant l'eau comme fluide caloporteur. Configuration vitré (a) et non-vitré (b).

La présence d'un vitrage supplémentaire dans la partie supérieure du capteur (voir Figure 1a) permet d'augmenter fortement les performances thermiques du capteur (isolation plus effet de serre). Ainsi le rendement thermique et donc 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 photosensibles.

Un capteur non-vitré (voir Figure 1b) peut conduire à un meilleur rendement thermique 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.

## 2. Performances électriques et thermiques d'un capteur PV-T

L'objectif de notre travail consiste à mettre au point un nouveau concept de capteur hybride. Afin de bien cerner les problèmes liés aux différents domaines concernés par ce type de capteur (thermique, photovoltaïque, matériaux), un capteur PV-T plan vitré en phase de pré-industrialisation a été étudié. Ce capteur est fait de cellules monocristallines collées sur un absorbeur en cuivre de type *Sheet-and-tube*. La caractérisation des performances électriques et thermiques de ce capteur a été réalisée au centre de test du Fraunhofer ISE à Freiburg (Allemagne).

### 2.1. Performances électriques

Les mesures pour déterminer la puissance maximale du module (*maximal power point* ou *mpp*), ont été réalisées au laboratoire CALLAB du Fraunhofer utilisant un simulateur solaire à impulsion de large surface. Ce type de mesure est conforme pour le simulateur solaire au critère de classe A de la norme IEC 60904-9 [7]. Les résultats sont comparés avec ceux d'un module PV (mono-Si) standard dans le Tableau 1.

	$\eta_{elec}$	$r_c$
Capteur PV-T	9.56 %	0.78
Module PV standard	14 %	0.85

Tableau 1 : Rendement nominal et packing factor du capteur PV-T comparés aux valeurs d'un modules PV standard.

Le rendement  $\eta_{elec}$  a été mesuré pour une température de module maintenue à 25°C sous 1000 W/m<sup>2</sup> et se retrouve dans l'équation (1).

$$\eta_{elec} = \eta_{ref} \cdot r_c \cdot (1 - \beta(T_{PV} - T_{ref})) \quad (1)$$

où  $r_c$  est le rapport de la surface totale des cellules PV sur la surface totale du module,  $\beta$  le coefficient de perte de rendement en fonction de la température (%/°C),  $T_{pv}$  la température du module et  $T_{ref}$  la température de référence (25°C).

Malgré une technologie équivalente (mono-Si), le rendement électrique nominal du capteur PV-T est plus faible que celui obtenu pour un module PV. Cela est dû au plus faible *packing factor* du capteur PV-T mais principalement à la présence du vitrage supérieur, générant des pertes optiques.

## 2.2. Performances thermiques

Les mesures pour déterminer les performances thermiques du capteur PV-T ont été réalisées au Fraunhofer ISE en accord avec la norme EN12975 [8]. La Figure 2 présente les courbes de rendement thermique du capteur PV-T en mode *maximal power point* – avec extraction de courant (1), en mode *open-circuit* – sans extraction de courant (2) comparées aux courbes de rendement thermique de capteurs solaires thermiques plans non-sélectifs (3) et sélectifs (4).

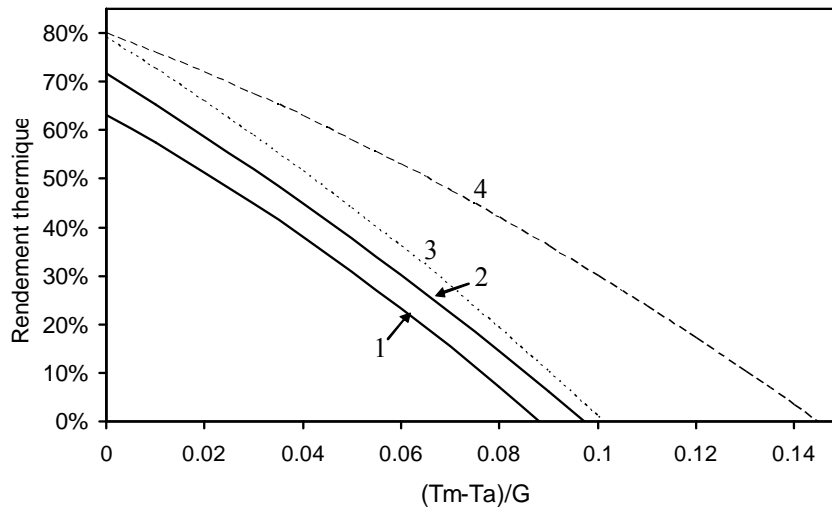


Figure 2 : courbes de rendement thermique. (1) capteur PVT en mode mpp – extraction de courant. (2) capteur PVT en mode circuit ouvert – sans extraction de courant. (3) capteur solaire thermique non-sélectif. (4) capteur solaire thermique sélectif.

Le rendement thermique d'un capteur solaire s'exprime selon les coefficients  $a_0$ ,  $a_1$  et  $a_2$  détaillés dans l'équation (2).

$$\eta_{Thermique} = a_0 - a_1 \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (2)$$

Les coefficients issus des courbes de rendement thermique présentés dans la Figure 2 sont détaillés dans le Tableau 2.

	$a_0$	$a_1$	$a_2$
	-	$W.m^{-2}.K^{-1}$	$W.m^{-2}.K^{-2}$
Capteur PV-T (mode mpp)	0.63	5.6	0.012
Capteur PV-T (mode oc)	0.72	6.2	0.0182
Capteur non sélectif	0.79	6.2	0.016
Capteur sélectif	0.8	3.8	0.012

Tableau 2 : résultats des tests thermiques pour le capteur PV-T comparés aux valeurs standards de différents capteurs solaires thermiques plans.

La différence entre les courbes de rendement du capteur PV-T et du capteur solaire thermique sélectif est due principalement :

- au coefficient d'absorption des cellules PV monocristallines ( $\alpha \sim 0,84$ ), plus faible que celui des revêtements hautement absorbants utilisés pour les capteurs solaires thermiques ( $\alpha \sim 0,95$ ).
- à l'émissivité des cellules PV ( $\varepsilon \sim 0,8$ ) plus importante que celle de la surface sélective ( $\varepsilon \sim 0,05$ ), générant des pertes thermiques plus importantes.

### 3. Simulation TRNSYS<sup>®</sup>

A partir des paramètres électriques et thermiques issus des tests réalisés au Fraunhofer ISE, un modèle numérique du capteur PV-T étudié a été mis au point sous l'environnement TRNSYS [8]. Afin de faire ressortir l'intérêt de ces composants hybrides, les performances énergétiques annuelles d'une installation PV-T de type chauffe-eau solaire ont été simulées. Ces résultats sont comparés avec ceux d'une installation solaire thermique standard, d'une installation solaire photovoltaïque et d'une installation *side-by-side* composée à 50% d'un module PV et à 50% d'un capteur solaire thermique.

#### 3.1. Description du système

La Figure 3 présente le système d'eau chaude solaire utilisé pour les installations PV-T, capteur thermique (sélectif et non-sélectif). Pour l'installation *side-by-side*, un capteur solaire thermique sélectif est simulé (2,5m<sup>2</sup>) avec un module PV (2,5m<sup>2</sup>). Pour l'installation solaire photovoltaïque, un module PV de 5m<sup>2</sup> est simulé sans boucle d'eau chaude solaire.

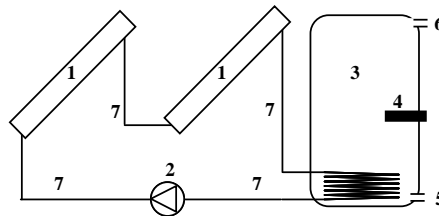


Figure 3 : Boucle d'eau chaude solaire modélisée sous TRNSYS. 1. capteur solaire ; 2. Pompe avec contrôleur ; 3. Ballon d'eau chaude de 200L ; 4. Chauffage auxiliaire, situé à 55% de la hauteur du ballon ; 5. Arrivée d'eau froide (15°C) ; 6. – Sortie d'eau chaude (60°C) ; 7. Canalisations.

Dans le cas d'un module PV standard, la production électrique correspond à l'équation (3) :

$$Q_{elec} = A_C \cdot G \cdot \eta_{ref} \cdot r_c \cdot (1 - \beta(T_{PV} - T_{ref})) \quad (3)$$

Dans le cas d'un capteur thermique standard, la production thermique correspond à l'équation :

$$Q_{Th} = A_C \cdot G \cdot \left[ \tau\alpha - U_L \cdot \frac{(T_{abs} - T_a)}{G} \right] = A_C \cdot G \cdot \left[ a_0 - a_1 \cdot \frac{(T_m - T_a)}{G} - a_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \right] \quad (4)$$

Cette équation, adaptée au cas PV-T en tenant compte de la conversion d'une partie du rayonnement absorbé en électricité se réécrit de la façon suivante :

$$Q_{Th} = A_C \cdot [G \cdot \tau\alpha - G \cdot \eta_{elec} \cdot \tau - U_L \cdot (T_{PV} - T_a) + U_{PV} \cdot (T_{PV} - T_a)] \quad (5)$$

Dans l'équation (5), l'absorbeur du capteur PV-T étant constitué de cellules PV,  $T_{PV}$  remplace  $T_{abs}$ . Le terme  $U_{PV}$  permet d'exprimer la diminution des pertes thermiques dues à la conversion effective d'une partie du rayonnement incident en électricité.

Les équations (3) et (5) soulignent le problème d'interdépendance lié au calcul des productions électriques et thermiques du capteur. Ainsi pour calculer  $T_{PV}$  (à travers  $Q_{Th}$ ) il est nécessaire de connaître  $\eta_{elec}$ , qui dépend lui-même de  $T_{PV}$ .

L'utilisation de TRNSYS permet le calcul dynamique de ce type de problème. Ainsi le *Type50b* a été utilisé pour modéliser les capteurs PVT et capteurs solaires thermiques (sélectif et non-sélectif) et le *Type94* pour le module PV. Les simulations ont été réalisées en utilisant les données météo de Paris Le Bourget sur une durée d'un an pour une consommation journalière de 125L d'eau à 50°C.

### 3.2. Résultats des simulations

Les productions thermiques et électriques annuelles ont été simulées dans les cinq différentes configurations. Les résultats sont détaillés dans le Tableau 3.

	Production thermique	Production électrique
	<i>kWh</i>	<i>kWh</i>
Capteur hybride PV-T	958	513
Capteur thermique sélectif	1715	0
Capteur thermique non-sélectif	1338	0
Installation <i>side-by-side</i>	1068	330
Module PV	0	659

Tableau 3 : Résultats des simulations sous TRNSYS.

Le résultat de ces simulations montre, comme prévu, que la production électrique de l'installation PV-T est plus faible que celle d'une installation purement PV, dû à la présence du vitrage (pertes optiques) et à des températures de fonctionnement plus importantes (le rendement électrique étant dépendant de la température). Les simulations montrent également qu'un capteur PV-T de 5m<sup>2</sup> a une production thermique annuelle plus faible que celle d'un capteur thermique sélectif (en raison de la non-sélectivité de la surface) mais aussi non sélectif (en raison de la conversion PV).

La production énergétique globale (thermique + électrique) des cinq systèmes est présentée dans le diagramme de la Figure 4. Le résultat des simulations montre que l'installation PV-T a un rendement global plus important qu'une installation *side-by-side*, avec une part de production électrique plus importante.

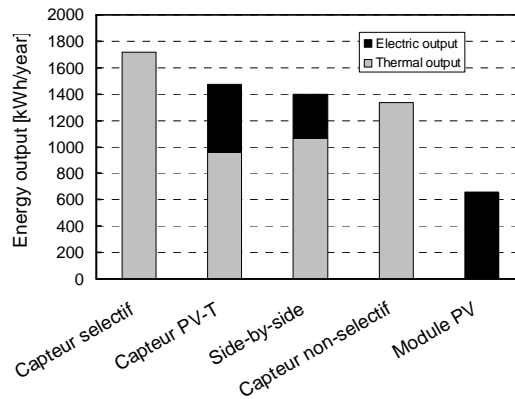


Figure 4 : Représentation de la production énergétique globale (thermique + électrique) pour les cinq systèmes étudiés.

## 4. Conclusion

Un capteur hybride PV-T en phase de pré-industrialisation a été testé au Fraunhofer ISE selon les normes existantes pour les capteurs solaires thermiques et les modules photovoltaïques. En se basant sur les résultats de ces tests, un modèle numérique simplifié de composants PVT a été mis au point et les paramètres du modèle alimenté par la caractérisation expérimentale. Des simulations ont été réalisées dans l'environnement TRNSYS pour le cas d'un système de chauffe-eau solaire standard. Les résultats ont montré qu'une installation utilisant un capteur PV-T peut avoir un rendement global (thermique et électrique) supérieur à celui d'installation thermique et photovoltaïque juxtaposée pour une même surface. Les tests et simulations réalisés démontrent ainsi l'intérêt pour les capteurs hybrides PV-T, particulièrement en ayant la perspective de réaliser une optimisation de ces concepts (intensification des échanges de chaleur, choix des matériaux, etc...). Dans ce contexte, un nouveau type de capteur PV-T est en cours de développement au Fraunhofer ISE.

## Références

- [1] H. A. Zondag et al., The yield of different combined PV-thermal collector designs, *Solar Energy*, Vol. 74 (2003), 253-269.
- [2] J.S. Coventry, Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector, *Solar Energy* 78 (2005), 211–222.
- [3] A. A. Hegazy, Comparative study of the performances of four photovoltaic/thermal solar air collectors, *Energy Conv. & Management*, Vol. 41 (2000).
- [4] Y.B. Assoa et al., Study of a new concept of photovoltaic–thermal hybrid collector, *Solar Energy*, Vol. 81 (2007), 1132-1143.
- [5] B. Robles-Ocampo et al., Photovoltaic/thermal solar hybrid system with bifacial PV module and transparent plane collector, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 91 (2007), 1966-1971.
- [6] D. De Vries, Design of a photovoltaic/thermal combi-panel, *PhD Thesis (1998)*, Eindhoven University of Technology, Netherlands.
- [7] IEC 60904-9 Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements. *International Electrotechnical Commission* (2007)
- [8] EN 12975-1:2006 “Thermal solar systems and components. General requirements”
- [9] S.A. Klein et al., TRNSYS. 16 – A Transient System Simulation Program, *University of Wisconsin, USA*.