

Rapport final PV P+D, DIS 45795 / 85855, Janvier 2005

# Toiture photovoltaïque Freestyle de 5,5 kWp

élaboré par  
**Pascal Affolter**  
**Solstis**  
Rue de Sébeillon 9b, 1004 Lausanne



## Résumé

Le système constructif Freestyle assure simultanément étanchéité du toit et production d'électricité, tout en procurant un aspect soigné à la toiture. Il est composé :

- de profilés aluminium fixés à la structure du toit
- d'une sous-couverture en polyester ondulé armé
- de tôles d'acier équipées de lamifiés amorphes à technologie triple-couche
- de profilés élastomères qui sont clipsés dans les profilés et utilisés pour la fixation des tôles solaires sur les profilés aluminium.

Le système-pilote a une surface totale de 160 m<sup>2</sup>. La surface solaire active est de 100 m<sup>2</sup>. Ceci correspond à une puissance installée de 5,5 kW. Les tôles « support » ont été choisies de couleur « anthracite » (RAL 7016). Cette couleur se marie particulièrement bien avec le marron-violacé des lamifiés photovoltaïques, l'ensemble formant une combinaison plutôt discrète et élégante.

Le système a été mis en service en mai 2003. Le système fonctionne dès lors sans interruption. Les mesures sont opérationnelles depuis le 1er juillet 2003. A ce jour, nous avons donc plus de 12 mois de recul sur le fonctionnement de l'installation. Les résultats dépassent de loin les attentes puisqu'une production prudente de 4'500 kWh avait été annoncée au client. La production réelle du 1er juillet 2003 au 30 juin 2004 a été de près de 5'400 kWh, ce qui, pour une installation dont l'inclinaison est loin d'être optimale, est tout à fait exceptionnel.

## Abstract

The roofing system Freestyle allows to cover a roof with a unglazed watertight photovoltaic system. This system features :

- aluminium profiles that fixed to the roof structure
- corrugated panels made of reinforced polyester, that plays the role of self-draining sub-roof
- half-finite PV laminated based on triple cell a-Si technology that are assembled on steel plates
- EPDM joints, inserted in the gullets of the aluminum profiles, are used for the fixation of the PV laminates on the aluminium profiles.

The pilot system has a full size of 160 m<sup>2</sup>. The active solar area is 100m<sup>2</sup> for an installed STC power of 5,5 kW. The color « dark grey » (RAL 7016) of the plates was chosen by the architect and is well matched to the color of the photovoltaic cells. This shows the capability of the system to offer a maximal satisfaction as far as esthetics are concerned.

The system was put into service in mai 2003. Up to now, it was operating well without any breakdown. The measurements were taken from the 1st of July up to now. We have therefore more than 12 monthes of follow-up of system's operation.

The results are far better than expected. A conservative production value of 4'500 kWh was offered. From the 1st of July 2003 un to the 30th of June 2004, the real production was close to 5'400 kWh, wich is an excellent value, provided the rather unoptimized system tilt angle.

## Table de matières

<b>Résumé</b> .....	2
<b>Abstract</b> .....	2
<b>Introduction / Buts du projet</b> .....	4
<b>Description de l'installation</b> .....	4
<b>Résultats principaux</b> .....	7
<b>Conclusion / Perspectives</b> .....	10
<b>Références et publications</b> .....	11
<b>Liste de symboles</b> .....	11
<b>Annexes</b> .....	12

## Introduction / Buts du projet

Freestyle consiste en un système de couverture étanche complet. Ce système est composé :

- de profilés latéraux (aluminium et EPDM)
- d'une tôle de couverture équipée de modules amorphes Uni-Solar amorphe triple couche
- d'une sous-couverture pour une étanchéité parfaite.

Les points forts de ce système sont :

- combinaison d'un générateur photovoltaïque et d'une couverture étanche
- possibilité de réaliser une toiture incurvée
- système non vitré donc résistant aux chocs
- couleur marron violacé très différente des technologies cristallines pour une intégration au bâtiment plus discrète.

Le projet couvre toutes les nouvelles toitures de la villa située sur la riviéra Vaudoise. Ceci représente une couverture totale de 160m<sup>2</sup>, dont 100m<sup>2</sup> de surface solaire active.

## Description de l'installation

La grande force de ce système réside dans le fait qu'il présente une solution de couverture à la fois élégante et complète. Dans le cadre de ce projet, cette solution représentait pour le maître d'ouvrage et son architecte une réponse unique aux différentes questions soulevées par le projet solaire.

Le système est inspiré de la Toiture Solaire d'Energie Solaire SA et en reprend les principaux éléments. L'image de la Fig.1 présente le détail de la sous-couverture étanche.



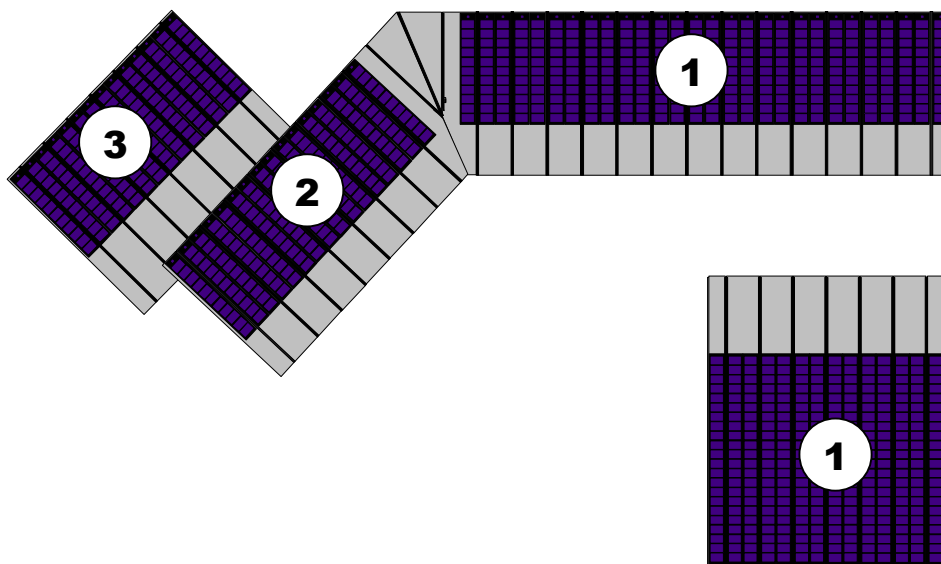
Fig.1 Détail avec le profilé et la sous-couverture étanche en feuille ondulée de polyester armé



*Fig.2 La toiture juste après pose des tôles solaires. Il ne reste plus qu'à enlever les feuilles de protection.*

Comme la largeur de la tôle de couverture est de 900mm, il est obligatoire de la fixer en son milieu pour éviter l'arrachement par effet de succion du vent. Ceci a été réalisé au moyen d'un collage sur une tôle pliée.

L'installation comprend quatre zones solaires réparties sur trois toitures réparties comme décrit sur la Fig.3.



*Fig.3 implantation des modules photovoltaïques en toiture*

Du point de vue électrique, on a subdivisé la toiture en trois groupes correspondant aux trois orientations :

- ① inclinaison :  $-8^{\circ}$ , azimut :  $0^{\circ}$
- ② inclinaison :  $8^{\circ}$ , azimut :  $-45^{\circ}$
- ③ inclinaison :  $-8^{\circ}$ , azimut :  $-45^{\circ}$ .

Ces trois groupes sont reliés aux trois entrées de l'onduleur SMA Sunny Boy Multistring qui comprend justement trois entrées avec MPP tracker. Ceci permet de faire fonctionner de manière optimale chaque champ séparément tout en n'ayant qu'un seul onduleur.

Les puissances respectives des trois groupes sont les suivantes :

No champ	Orientation	Inclinaison	Puissance	
1	sud-ouest	$-8^{\circ}$	3584	W
2	sud	$-8^{\circ}$	1024	W
3	sud	$+8^{\circ}$	896	W
Total		5504	W	

Fig.4 distribution des champs sur les 3 entrées MPP

Bien que la pose de l'onduleur ait déjà été faite en décembre 2002, il a été constaté que l'installation ne pouvait pas fonctionner sur tableau de chantier avec FI (le système de surveillance de courant de défaut intégrée à l'onduleur fait disjoncteur le FI du tableau de chantier). On a donc dû attendre le 5 mai de l'année suivante pour pouvoir faire la mise en service définitive.



Fig.5 Vue au grand angle des deux toitures sud.

## Résultats principaux

Les mesures sont opérationnelles depuis le 3 juin 2003. Le premier mois complet est donc le mois de juillet 2003. Les mesures ont été effectuées jusqu'à fin novembre 2004.

Les grandeurs mesurées sont les suivantes :

- ensoleillement global horizontal et dans le plan des panneaux
- tension et courant des 3 champs photovoltaïques
- puissance AC
- températures de différents éléments (panneaux, air extérieur, ...).



Fig.6 détail de la grande toiture équipée de lamifiés de 5m50 de longueur.

Date	Irradiation	Production sortie panneaux (courant continu, DC)	Production sortie onduleur (courant alternatif, AC)	Rendement onduleur	PR
	[kWh/m <sup>2</sup> ]	[kWh]	[kWh]		
juillet-03	180	902	828	92%	0.84
août-03	162	802	730	91%	0.82
septembre-03	114	547	502	92%	0.80
octobre-03	65	274	252	92%	0.71
novembre-03	31	152	142	93%	0.82
décembre-03	24	109	101	92%	0.75
janvier-04	22	101	94	94%	0.77
février-04	49	238	215	91%	0.81
mars-04	79	421	382	91%	0.88
avril-04	122	653	589	90%	0.88
mai-04	162	854	775	91%	0.87
juin-04	170	864	782	90%	0.84
Total	1181	5915	5391	91%	0.83

Fig.7 Récapitulation annuelle

Le tableau de la Fig.7 présente la récapitulation annuelle de la production. Avec ses 5'500 W STC installés, la toiture photovoltaïque a produit 5'391 kWh. L'irradiation solaire dans le plan des capteurs a été de 1'181 kWh. Ceci donne un PR moyen de 0.83, ce qui est une valeur remarquable. Nous pensons que la bonne performance de l'installation est due aux 3 facteurs prépondérants suivants :

- bon comportement des panneaux sous irradiation diffuse, à faible densité de flux et pour des angles d'incidence proche de la normale (« rayons rasants »)
- bon comportement des panneaux à haute température (le coefficient de température est beaucoup plus bas que pour les panneaux cristallins, ce qui entraîne une meilleure efficacité avec un montage intégré en toiture, sans ventilation naturelle à l'arrière des lamifiés)
- spécification prudente du fabricant (c'est-à-dire, les Watt spécifiés pour les lamifiés Uni-Solar sont probablement donnés avec de la réserve, pour contrer l'a priori d'une grande partie de la clientèle sur une soit-disant piètre qualité de la technologie silicium amorphe)



Fig.8 *vue de la « chambre parents » depuis la terrasse en bois*

Le tableau de la Fig.9 permet de comparer la production de plusieurs installations photovoltaïques. Sont indiqués le type de cellule, l'inclinaison/orientation, le lieu et la puissance installée. Les valeurs présentées correspondent à l'énergie spécifique produite en kWh par kW installé (ou en heures, si on veut simplifier). Une période différente a été choisie afin de pouvoir mettre en évidence les différences saisonnières.

Le record absolu est détenu par l'installation de Lutry avec 151 kWh par kW en juillet 2003 alors que la meilleure valeur obtenue par une installation classique est de 142 kWh par kW, et cela malgré une orientation tout à fait hors norme. En août, l'installation de Lutry produit autant qu'une installation inclinée de manière optimale. Ces performances ont été confirmées

lors de l'été 2004, bien que celui-ci ait été moins ensoleillé. A partir de septembre 2003, la production spécifique descend mais la valeur globale reste excellente. Le total d'entre saison (en violet sur le tableau de la Fig.9) donne 314 kWh/kW contre 373 et 350 pour les installations conventionnelles. En hiver, la production spécifiques descend à 100 kWh/kW contre 167, resp. 134. Ces performances relativement basses en hiver ont un effet toutefois très limité sur le résultat annuel car la production spécifique pour la période sept.03 à août 04 est de 959 kWh/kW contre 1054 pour l'installation à 27° sud et 983 pour l'installation à 10° sud-est.

	Toiture Lutry entre 8 et -8°	Polycristalline 27° Sud Lausanne	Polycristallin 10° Sud-Est Genève
	5.5	21.7	69.5
juil.03	151	135	142
août.03	133	128	128
sept.03	91	108	101
oct.03	46	61	50
nov.03	26	37	31
déc.03	18	32	26
janv.04	17	28	11
févr.04	39	70	66
mars.04	69	90	86
avr.04	107	114	113
mai.04	141	134	136
juin.04	142	129	127
juil.04	143	132	122
août.04	119	118	115
<b>année</b>	<b>959</b>	<b>1054</b>	<b>983</b>
entre-saison	314	373	350
hiver	100	167	134
été	545	514	499
sept.04	90	111	106
oct.04	44	66	59
nov.04	23	48	44
<b>automne 2004</b>	<b>157</b>	<b>224</b>	<b>209</b>

Fig.9 productions mensuelles spécifiques (en kWh/kW ou heures) pour l'installation silicium amorphe triple couche comparées à deux installations conventionnelles (cristallin, inclinaison à 27° et 10°).

En annexe, nous donnons différentes mesures détaillées qui permettent de se plonger plus en détail sur le fonctionnement de l'installation. Ceci permet de voir comment se comportent les différentes grandeurs mesurées sur différents jours clés choisis.

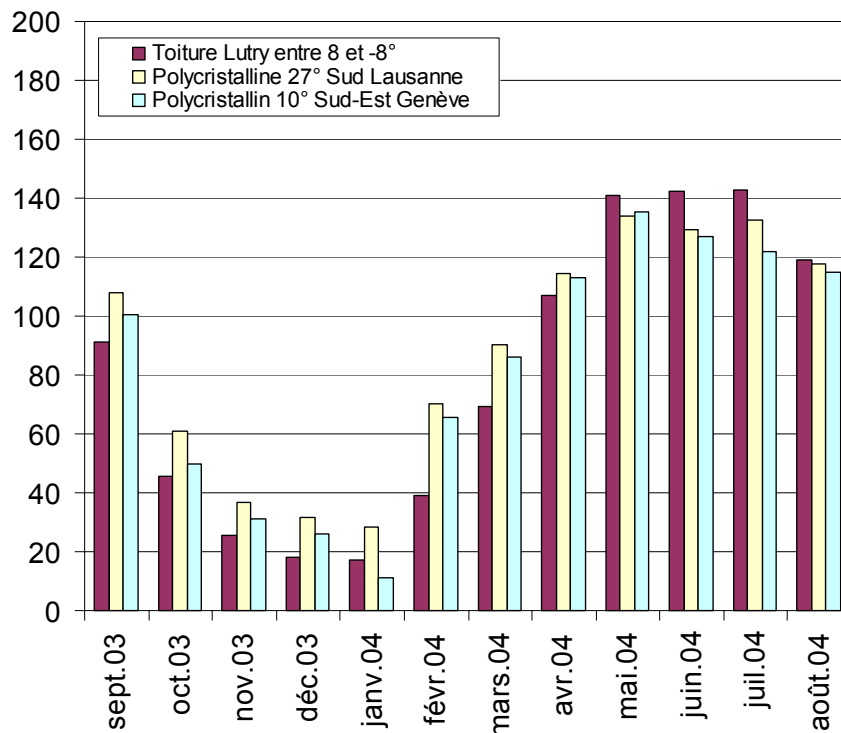


Fig.10 productions mensuelles spécifiques (en kWh/kW ou heures) pour l'installation silicium amorphe triple couche comparées à deux installations conventionnelles (cristallin, inclinaison à 27° et 10°).

Ces différentes annexes permettent d'approfondir, notamment grâce aux puissances spécifiques (la puissance spécifique est le rapport entre puissance DC réelle et puissance nominale STC)

- la différence obtenue sur les trois champs selon leur orientation (champ 1, 2 et 3)
- le comportement selon la saison.

## Conclusion / Perspectives

Après une année et demie de fonctionnement, l'installation « Toiture photovoltaïque » à Lutry a produit une quantité d'énergie électrique importante, étant donné une orientation non optimale. La toiture a donné entière satisfaction à ses utilisateurs, tant par la qualité de la couverture, par le plaisir procuré par une esthétique soignée que par la production d'électricité. L'exploitation de l'installation pour les années à venir consistera donc simplement à relever le compteur périodiquement et nettoyer la toiture à la fin de l'hiver, pour s'assurer qu'il n'y reste qu'un minimum de poussière et de feuilles mortes avant la reprise de la forte production estivale.

## Références et publications

La revue « Chantiers business » a fait paraître un article le 1<sup>er</sup> juillet 2003 sur l'installation. L'Office Fédéral a été mentionné.

L'installation a également fait l'objet d'une publication poster lors de la dernière conférence photovoltaïque à Paris (7-11 June 2004 Paris, France 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition).

Elle a également participé au concours « Prix solaire suisse ».

## Liste de symboles

Gh : irradiance dans le plan horizontal (unité : W/m<sup>2</sup>)

Gi : irradiance dans le plan des capteurs (unité : W/m<sup>2</sup>)

U1 : tension du champ capteur no1

I1 : courant du champ capteur no1

U2 : tension du champ capteur no2

I2 : courant du champ capteur no2

U3 : tension du champ capteur no3

I3 : courant du champ capteur no3

P\_DC : puissance de sortie des capteurs, à l'entrée des capteurs, courant continu DC (W)

P\_AC : puissance de sortie de l'onduleurs, injectée dans le réseau, courant alternatif AC (W)

STC : standard test conditions (conditions d'ensoleillement standard sous lesquelles sont spécifiés les panneaux solaires photovoltaïques)

## Annexes

### Mesures lors de jours choisis

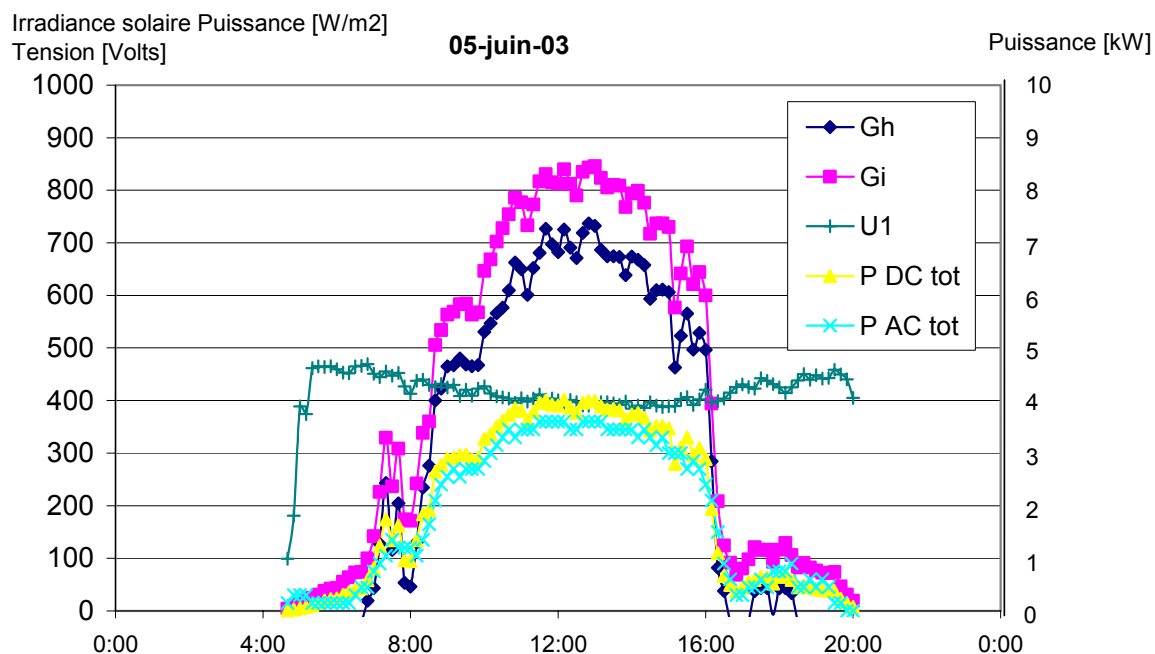


Fig.11 Irradiance, tension du champ no1 et puissance DC et AC lors d'un beau jour d'été

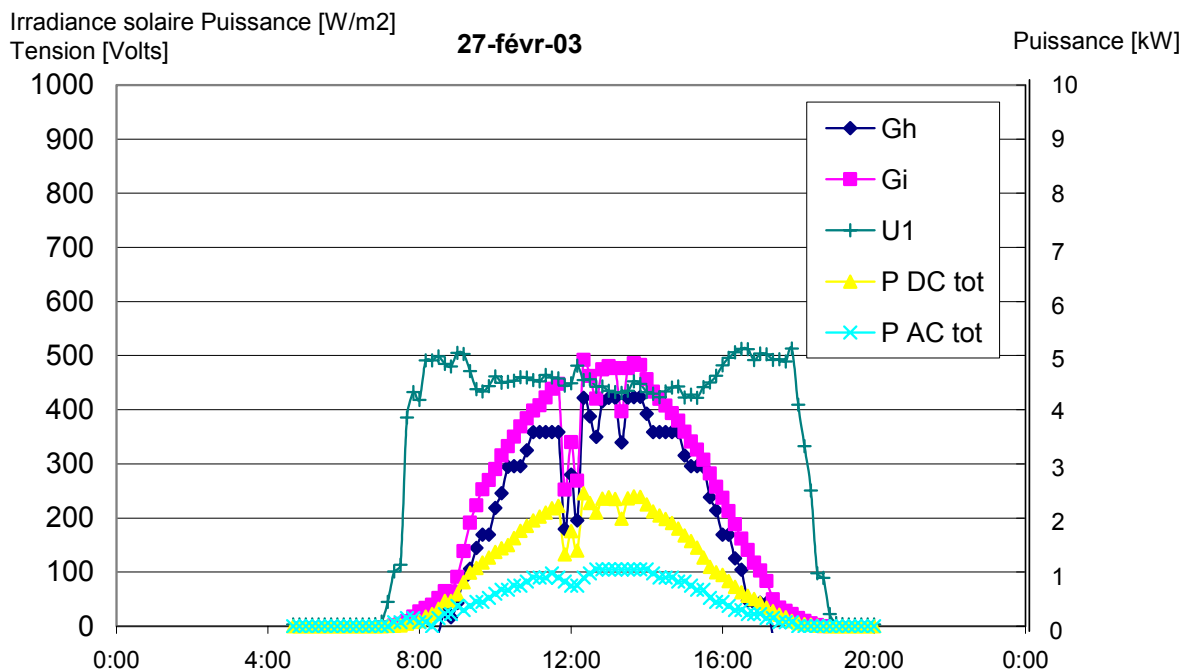


Fig.12 Irradiance, tension du champ no1 et puissance DC et AC lors d'un beau jour d'hiver

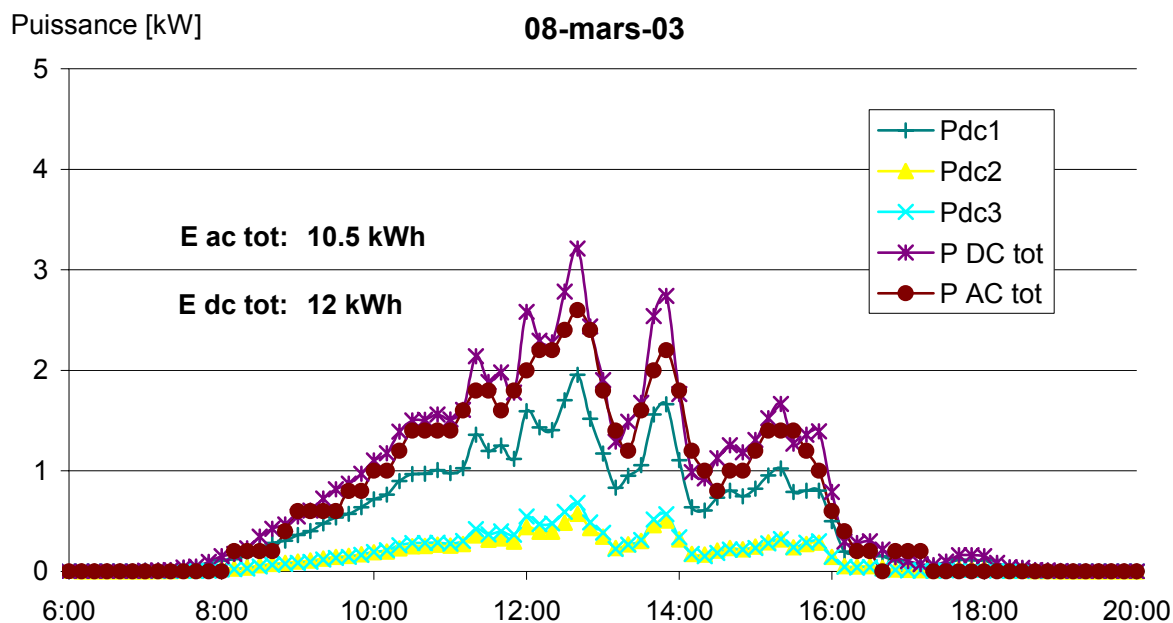


Fig.13 Puissances des 3 champs lors d'un jour moyen d'entre saison

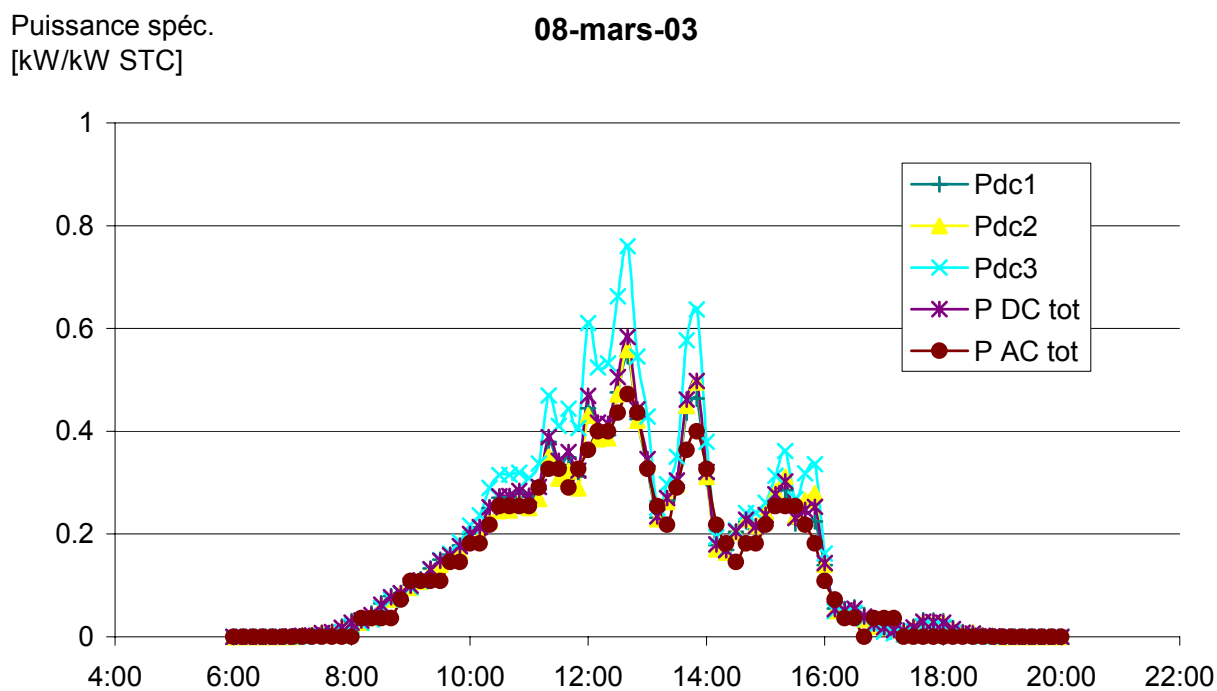


Fig.14 Puissances spécifiques des 3 champs lors d'un jour moyen d'entre saison

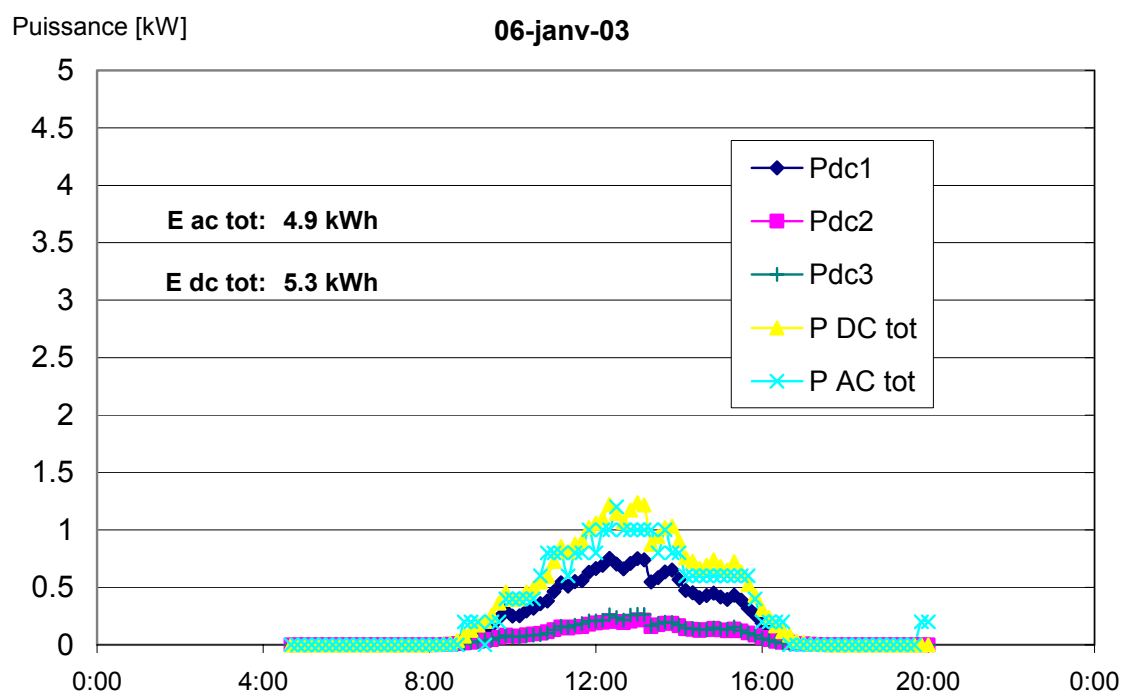


Fig.15 Puissances des 3 champs lors d'un beau jour d'hiver

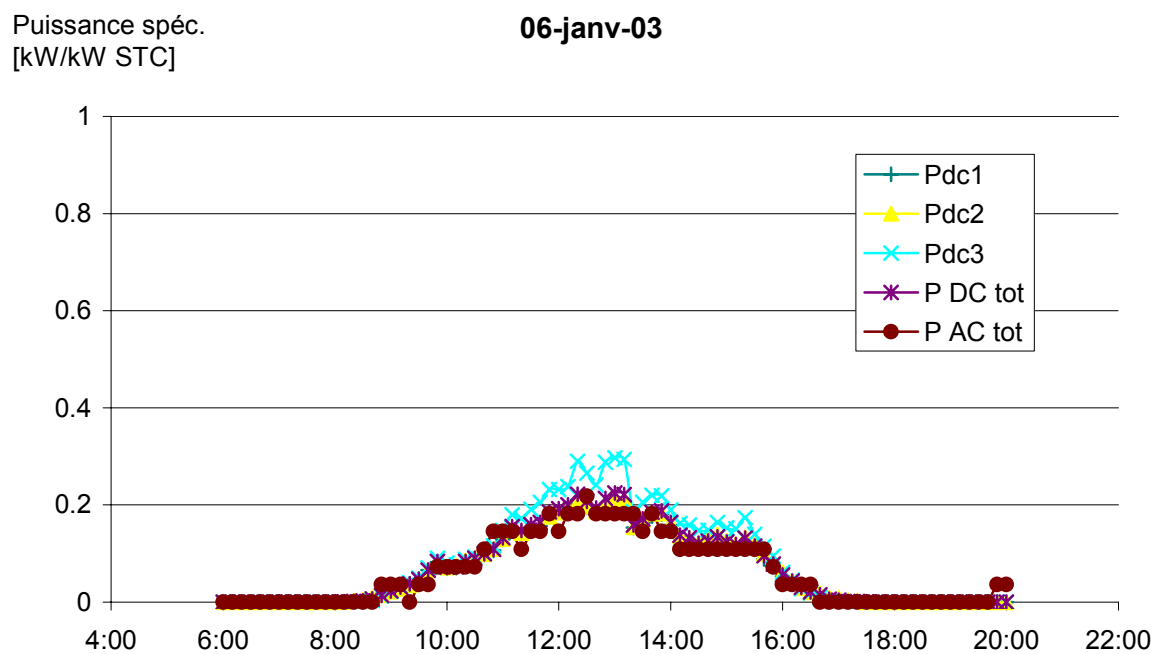


Fig.16 Puissances spécifiques des 3 champs lors d'un beau jour d'hiver

Puissance [kW]

03-sept-03

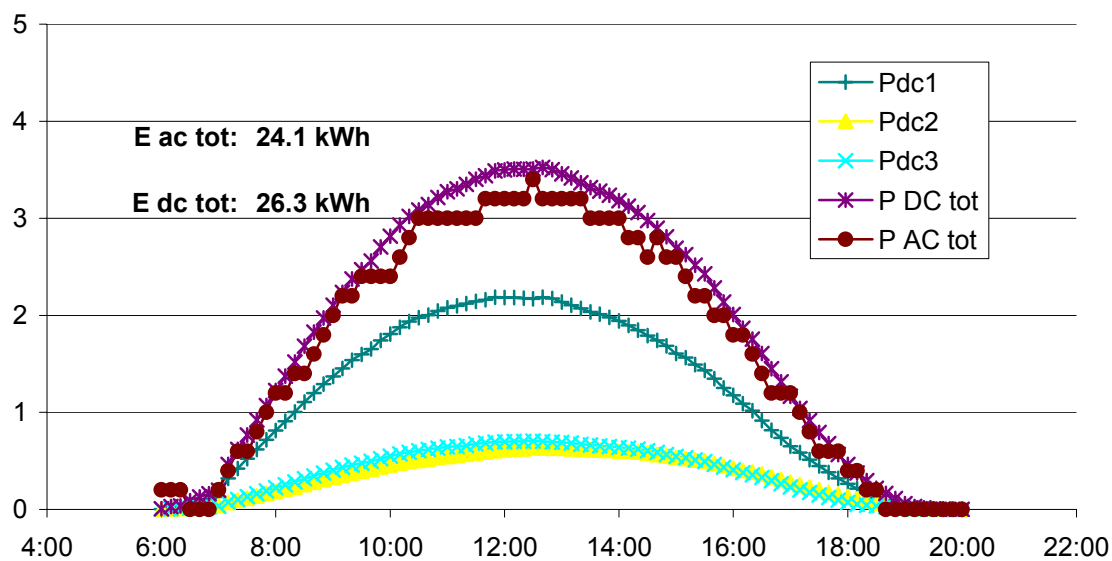


Fig.17 Puissances des 3 champs lors d'un beau jour d'automne

Puissance spéc.  
[kW/kW STC]

03-sept-03

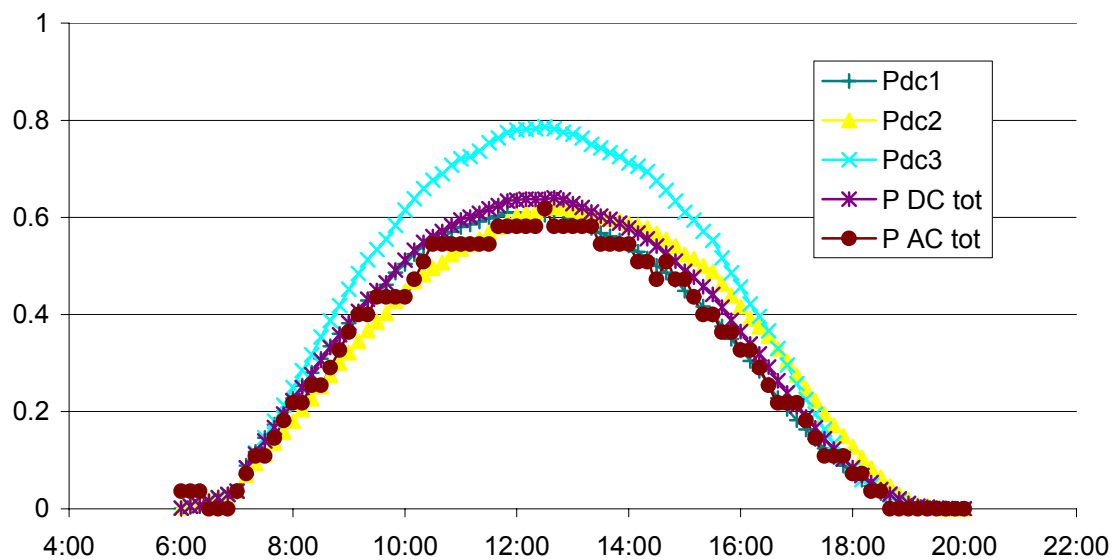


Fig.18 Puissances spécifiques des 3 champs lors d'un beau jour d'automne

Puissance [kW]

22-juin-03

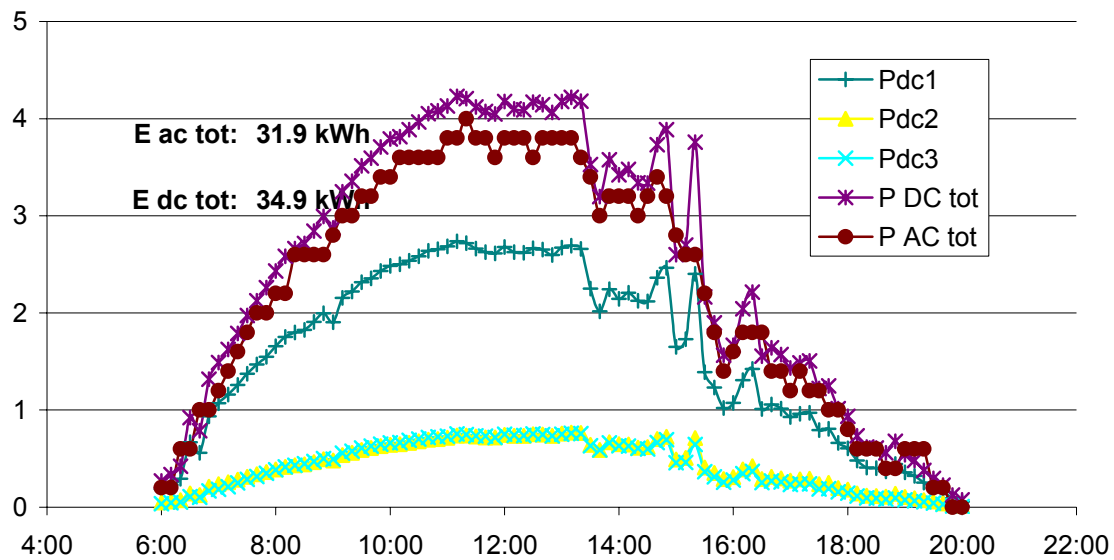


Fig.19 Puissances des 3 champs lors d'un beau jour d'été

Puissance spéc.  
[kW/kW STC]

22-juin-03

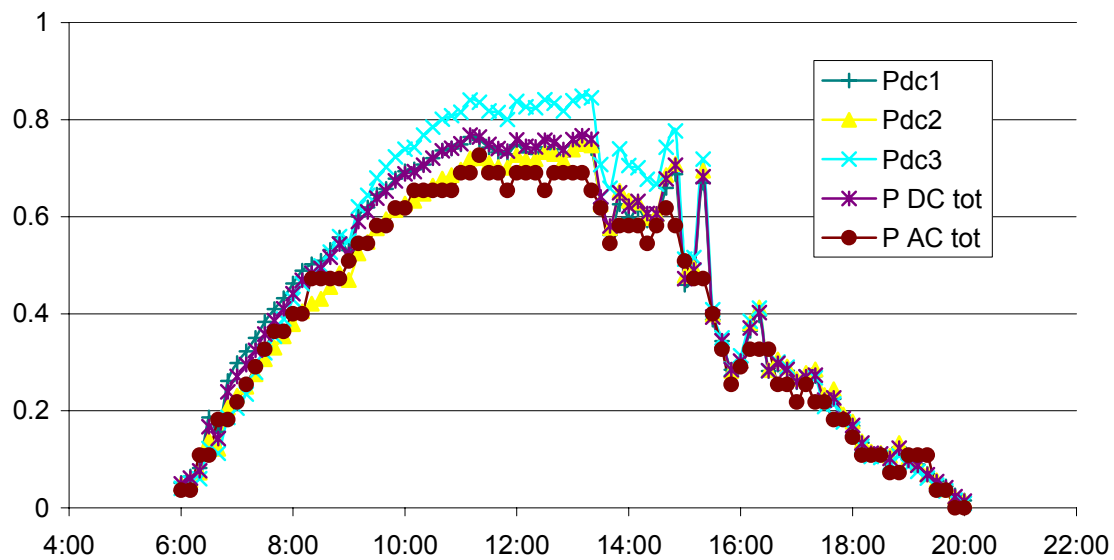


Fig.20 Puissances spécifiques des 3 champs lors d'un beau jour d'été