

Rapport final PV P+D, DIS 14556 / 54108, Octobre 2003

Système hybride simple PV/T au centre d'entretien autoroutier de Domdidier/FR

élaboré par
Jacques Audergon, ing dipl EPFL/SIA
GEIMESA et Partenaires SA
Avenue du Midi 13, 1700 Fribourg



RESUME

Système hybride simple PV/T de 7 kWp au centre d'entretien autoroutier de la N1 à Domdidier/FR (PV/T Photovoltaïque / Thermique)

Le projet de système hybride simple PV/T 7 kWp consiste à installer des cellules photovoltaïques sur le toit du bâtiment. Le système PV/T est constitué de 33 panneaux de simples vitrages dans lesquels sont insérées les cellules photovoltaïques. Chaque panneau porte 144 cellules PV type ASE Alzenau, en remplacement du double vitrage installé normalement sur l'un des 2 sheds (lanterneau) assurant l'éclairage zénitale du garage pour véhicules d'entretien du CED. La puissance nominale de l'installation PV est de 6,7 kWp.

La chaleur produite par les cellules PV sur son intrados est récupérée par un système d'extraction d'air avec 2 ventilateurs (placé au sommet du shed) pulsant cet air ainsi réchauffé vers le sol au moyen de buses. Ce système contribue au chauffage du garage, en contribuant à maintenir hors gel la halle. Lorsque la température est trop élevée, en dehors de la période de chauffage, l'air est envoyé directement à l'extérieur, par un jeu de vantaux. Cette installation constitue un système hybride simple PV/T.

Le résultat des mesures montre que le système hybride simple PV/T apporte une réelle contribution au chauffage du garage. Selon l'évaluation faite, l'apport thermique est évalué à 4'700 kWh/an, soit à peu près l'équivalent de la production électrique. En conclusion, un tel système peut être judicieusement comparé avec des sheds non équipés, mais dotés de parois opaques sur le coté exposé au soleil. Une solution intéressante serait de compléter le système avec une plaque formant gaine de ventilation, coté intérieur du shed. Un double vitrage isolant est recommandé, pour améliorer le bilan thermique.

ABSTRACT

Simple Hybrid System (PV/T) 7 kWp at N1 Motorway Maintenance Center, Domdidier/FR (PV/T = simple hybrid system Photovoltaic/thermal)

The project of the system PV/T 7 kWp consist to put a set of photovoltaic cells on a strip of the building. It is constituted of 33 simple window panels and each carry 144 photovoltaic cells ASE Alzenau, as a replacement for the normal garage's skylight of the "Motorway Maintenance Center" in Domdidier/FR. The installation's power is 6'700 Wp.

The heat produced by the PV elements is recuperated by 2 ventilators, which blow the warm air down (on the garage floor) in order to avoid frost of hall during winter. When the temperature is too high, the warm air is directly expelled outside of the building. This is a simple hybrid system PV/T.

The result of measures shows that the simple hybrid system brings a plus to the heating of the garage. This contribution is evaluated to 4'700 kWh/y . In conclusion, such a system can be only compared with an opaque wall on the side of skylight exposed to the sun. A significant improvement could be the addition of an air conduit behind the inside face of PV.

TABLE DES MATIERES

Chapitre	Contenu	Pages
1.	Situation initiale	
1.1.	<i>Pourquoi une installation PV à Domdidier ?</i>	1
1.2.	<i>Brève description du site de Domdidier</i>	1 - 2
1.3.	<i>Conception de l'installations PV/T</i>	2
1.4.	<i>Description des installations PV/T</i>	3
2.	Objectifs du travail	
2.1.	<i>Comportement hybride de l'installation</i>	4
2.2.	<i>Bilans énergétiques et efficacité</i>	4
3.	Démarche adoptée	
3.1.	<i>Conception du système de mesures</i>	4 - 5
3.2.	<i>Instrumentation mise en place</i>	5 - 6
3.3.	<i>Déroulement de la campagne de mesures</i>	6
4.	Principaux résultats	
4.1.	<i>Bilans annuels</i>	7
4.2.	<i>Bilans mensuels de l'installation PV</i>	8
4.3.	<i>Profils journaliers</i>	9 - 10
5.	Analyse des résultats	
5.1.	<i>Principales constatations</i>	11
5.2.	<i>efficacité des onduleurs</i>	12
5.3.	<i>Analyse du comportement hybride</i>	12 - 18
6.	Conclusions	
6.1.	<i>Fonctionnement hybride</i>	19
6.2.	<i>Exploitation des résultats pour d'autres cas</i>	20
6.3.	<i>Collaborations</i>	20

Liste des symboles

Bibliographie

1. SITUATION INITIALE

1.1. *Pourquoi une installation PV à Domdidier ?*

Suite à une lettre du Directeur de l'OFEN du 17.12.1993 au Directeur des Travaux Publics du Canton de Fribourg, encourageant fortement le canton de Fribourg à réaliser des installations PV dans le cadre des autoroutes sur territoire fribourgeois, l'idée est venu de mettre en valeur le site du centre d'entretien autoroutier de la N1 projeté à Domdidier. Ce centre, bien équipé en moyens de gestion informatisé et de communication et doté d'installations énergétiques de haut niveau, est particulièrement adéquat pour recevoir une installation photovoltaïque.

Du point de vue de la politique énergétique cantonale, ce projet est significatif. Il est le signe que le canton ne néglige aucune forme d'énergie, même si du point de vue économique, une telle installation ne peut être rentabilisée aux conditions actuelles.

L'installation photovoltaïque de Domdidier constitue un élément supplémentaire dans le réseau des installations solaires installées dans des bâtiments publics, comprenant notamment les capteurs solaires thermiques du centre d'entretien de Vaulruz ainsi que l'installation photovoltaïque de 3 kWp de la nouvelle école d'ingénieur de Fribourg.

1.2. *Brève description du site de Domdidier*

Le centre d'entretien autoroutier de la N1 à Domdidier, dénommé **CED**, est situé au Nord du village de Domdidier le long du tracé de la N1, à environ 1,5 km à l'Ouest d'Avenches.

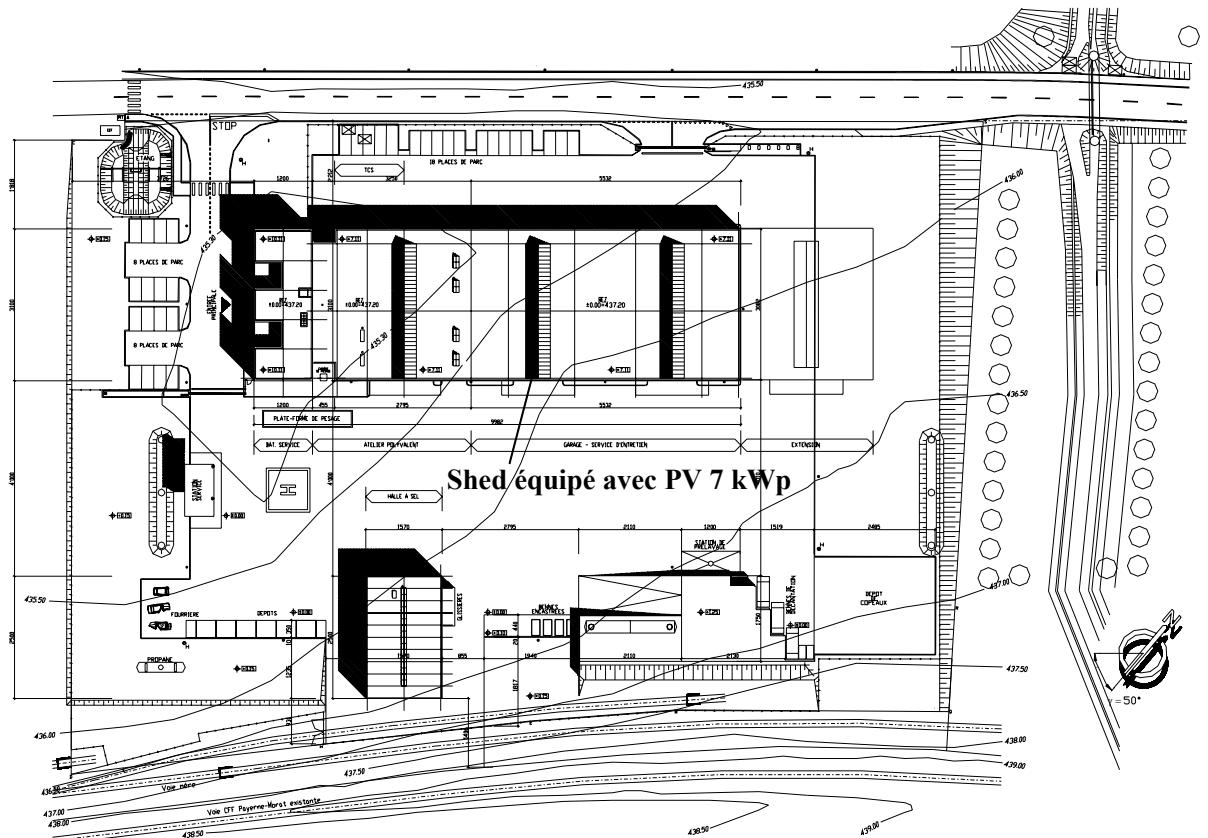
L'altitude moyenne du site est de 437 m. Le CED est situé à 8 km environ au nord-est de Payerne, où se trouve une station météo. Nous admettons que les données de Payerne sont représentatives pour le contrôle des valeurs mesurées au CED. Selon Météonorm'85, le rayonnement global horizontal, traduit sous forme d'irradiation, pour Payerne, est de **1'192 kWh/m²** pour l'année 2000. A titre de comparaison, cette irradiation annuelle est de 1'230 kWh/m² pour l'autre site solaire autoroutier de Vaulruz.

Le CED est constitué de 3 bâtiments contigus, respectivement 1 bâtiment de service, 1 halle polyvalente et 1 garage destiné au stockage des véhicules d'entretien de la N1 chauffés à basse température, ainsi que d'une halle à sel indépendante, non chauffée. Le système énergétique comprend une pompe à chaleur avec stock en terre, un couplage chaleur-force et une chaudière mixte propane/mazout.

L'installation PV est implantée dans l'un des 2 sheds (lanterneau à 2 pans à 45 °) assurant l'éclairage zénitale du garage, occupant le pan complet orienté au sud-ouest. L'azimut γ du plan des capteurs PV est de 50°.

La figure no 1 ci-dessous présente à une échelle réduite le site du CED ainsi que la position de l'installation PV :

Figure No 1 – Plan général d'implantation du CED



1.3. Conception de l'installation hybride simple PV/T

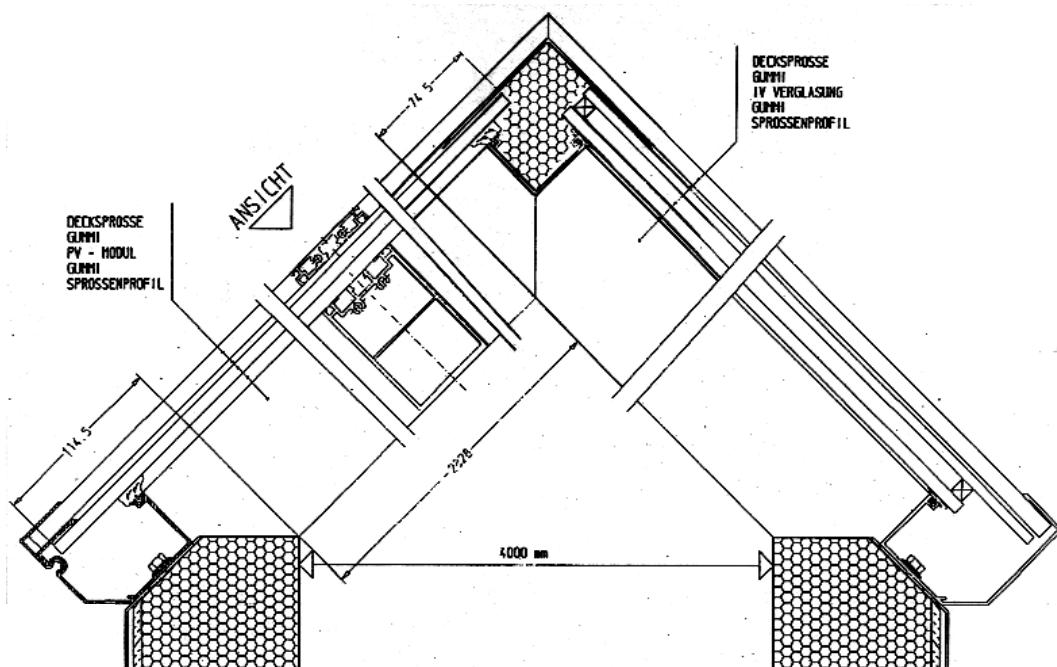
La conception de l'installation PV/T (photovoltaïque/thermique) repose sur 2 idées :

1. Utilisation de la particularité thermique du garage avec une température de service hiver limité à 7°C, sauf en cas d'occupation par du personnel (température relevée à 17°C), pour tester la récupération de chaleur produite à l'intrados des cellules photovoltaïques par un simple système de ventilation transférant l'air ainsi chauffé au niveau du sol du garage. L'installation ainsi conçue est censée réaliser un système hybride simple.
 2. Intégration la plus poussée possible des cellules PV dans la toiture du garage, en remplaçant carrément le pan sud-ouest d'un des 2 sheds par des panneaux PV partiellement translucide, selon le modèle réalisé à l'école d'ingénieurs de Soleure. Le système de ventilation évacuant la chaleur émise par les cellules PV sur l'intrados est constitué de 2 installations symétriques de reprise d'air avec une gaine perforée et un ventilateur axial. Le débit total est de 600 m³/h soit un taux de renouvellement d'air de 3.0 (volume du shed d'environ 200 m³). Les ventilateurs sont commandés par une horloge et fonctionnent pendant la période de chauffage.

1.4 Description des installations PV/T

L'installation photovoltaïque présente la particularité d'être constitué directement du verre porteur dans lequel sont intégrés les cellules solaires, sans double vitrage supplémentaire. La figure No 2 présente la coupe type du shed (lanterneau), fabriqué et monté par la firme COLT INTERNATIONAL, équipé de l'installation PV/T :

Figure No 2 Coupe-type sur lanterneau équipé des cellules PV



Le coefficient k du vitrage PV est de $4.00 \text{ W/m}^2\text{K}$. Le vitrage sur le pan opposé est un double vitrage isolant, avec un coefficient $k = 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$.

L'installation PV proprement dite est constituée de 33 panneaux vitrés portant chacun 144 cellules (monocrystalline cells) marque ASE Alzenau de $1.41 \text{ W}_p / 0.489 \text{ V}$, soit 203 W_p au total par panneau. L'installation comprend 5 groupes de 5 panneaux ($I_{MPP STC} = 5.78 \text{ A} ; U_{MPP STC} = 175 \text{ V} ; P_{PEAK} = 1'015 \text{ W}$) et 2 groupes de 4 panneaux chacun ($I_{MPP STC} = 5.78 \text{ A} ; U_{MPP STC} = 140 \text{ V} ; P_{PEAK} = 812 \text{ W}$), raccordés sur 7 onduleurs SMA Sunny Boy WR 700. La **puissance totale installée** est de **6'700 W_p**. L'énergie électrosolaire est refoulée sur le réseau public (EEF).

La surface effective occupée par les cellules PV est de **46.6 m²** pour une surface vitrée y compris cellules PV (sans cadres) de 77.7 m^2 , soit environ le 60 %. A titre indicatif, la surface totale du pan de shed, cadres inclus, est d'environ 83.6 m^2

2. OBJECTIFS DE TRAVAIL

2.1. *Comportement hybride de l'installation PV/T*

L'objectif prioritaire est d'essayer de mettre en évidence le **comportement hybride** du système PV intégré au vitrage sud-ouest d'un shed sur le garage du CED. A cet effet, un dispositif de mesures complet a été mis en place et un concept de mesures adapté à l'objectif établi.

2.2. *Bilans énergétiques et efficacité*

L'objectif secondaire est la mesures des différents paramètres permettant d'établir des **bilans énergétiques mensuels et annuels** ainsi que l'évaluation de **l'efficacité** du système du point de vue PV.

3. DEMARCHE ADOPTEE

3.1. *Conception du système de mesures*

La mise en évidence du fonctionnement hybride du système PV/T n'est pas facile, compte tenu qu'il s'agit d'une installation en exploitation et non d'un modèle en laboratoire. Nous avons retenu les hypothèses suivantes :

1. Le système véritablement hybride suppose la réalisation d'un confinement coté intrados des cellules permettant à l'air (ou l'eau) de circuler en récupérant efficacement la chaleur émise par les cellules PV. Nous avons admis un système simplifié, sans confinement, en récupérant directement l'air dans la partie supérieure du shed et en le pulsant vers le bas de la halle. Il s'agit donc d'un système ouvert, beaucoup plus difficile à maîtriser du point de vue de la mesure.
2. Nous avons prévu de comparer le shed équipé de l'installation PV avec le shed symétrique par rapport à la surface du garage, non équipé. Nous admettons que la comparaison des températures mesurées dans ces 2 cas, dans la partie haute des sheds (1.50 m au-dessus de la base) nous permette de déceler les différences de comportement et si possible, grâce à la mesure du rayonnement solaire dans le plan des capteurs et à la mesure de la température extérieure de compléter l'analyse pour tirer des conclusions utilisables. Une analyse différentielle avec et sans évacuation de l'air au sommet du shed équipé des cellules PV complète la démarche.

La mesure des bilans énergétiques et de la performance du système PV peut se faire simplement avec l'ensemble des paramètres fournis par les onduleurs ainsi que les mesures externes de rayonnement solaire.

3.2. **Instrumentation mise en place**

L'instrumentation comprend 2 systèmes complémentaires, respectivement celui intégré au système PV proprement dit, fourni par la Maison COLT, selon notre cahier des charges et le système indépendant de mesures, mis en place par nos soins.

Le système de mesures COLT INTERNATIONAL est basé, dans sa version adaptée 1999 sur le module de contrôle SMA Sunny Boy Control qui stocke les données énergétiques générales, selon liste ci-dessous et reçoit par modem via le réseau 230 V les informations des onduleurs, également stockées (voir liste ci-après).

◆ Générales :

- ◊ Puissance instantanée côté alternatif Sunny Boy
- ◊ Energie produite par jour Sunny Boy
- ◊ Energie totale produite depuis la mise en service Sunny Boy

◆ Par onduleur :

- ◊ Tension cellules [U_{pv} - Ist] Sunny Boy
- ◊ Tension cellules [U_{pv} - Soll] Sunny Boy
- ◊ Intensité onduleur [I_{ac} - Ist] Sunny Boy
- ◊ Tension onduleur [U_{ac}] Sunny Boy
- ◊ Fréquence onduleur [F_{ac}] Sunny Boy
- ◊ Puissance onduleur [P_{ac}] Sunny Boy
- ◊ Résistance [Riso] Sunny Boy
- ◊ Energie totale produite [E-tot] Sunny Boy
- ◊ Nombre d'heures de service [h-tot] Sunny Boy
- ◊ Intensité cellules [I_{pv}] Sunny Boy

Ces informations sont stockées toutes les 15 minutes dans le Sunny Boy et sont transférées sur un PC utilisant Windows 95 qui les enregistre dans des fichiers "Excel".

Le système d'acquisition GEIMESA, constitué d'une chaîne de mesures DAU 16/20, comprend :

◆ mesures générales :

- ◊ 1 solarimètre (cellule PV de référence certifiée) placé dans le plan horizontal de la toiture, près du shed PV
- ◊ 1 solarimètre (idem) placé dans le plan incliné du champ de cellules PV
- ◊ 1 sonde de température extérieure
- ◊ 1 compteur électrique pour la production d'électricité PV sur réseau EEF,

- ◆ mesures spécifiques, pour le shed équipé des cellules PV :
 - ◊ 1 sonde de température en applique intrados vitrage – position haute
 - ◊ 1 sonde de température en applique intrados vitrage – position médiane
 - ◊ 1 sonde de température en applique intrados vitrage – position basse
 - ◊ nombre et durée d'ouverture des vantaux du shed

En plus de l'instrumentation spécifique mentionnée ci-avant, le système MCR des installations techniques du CED, que nous avons également conçu et planifié, fourni les données suivantes, en complément aux mesures mentionnées ci-avant :

- ◊ 1 sonde de température d'ambiance shed, hauteur 1.50 m par rapport à la base du shed, coté ouest du shed à environ 6.25 du bord.
- ◊ 1 sonde de température d'ambiance shed, hauteur 1.50 m par rapport à la base du shed, symétriquement disposée par rapport à la première, coté est.
- ◊ Etat de marche et durée de fonctionnement des 2 ventilateurs shed PV
- ◊ Nombre d'heures de fonctionnement des aérothermes Basse Température (BT) assurant la température de base jusqu'à 7 °C.
- ◊ Nombre d'heures de fonctionnement des aérothermes Moyenne Température (MT) assurant le complément à 17 °C en présence de personnel
- ◊ Comptage de chaleur pour les aérothermes BT et MT
- ◊ Position des portes du garage (ouverte ou fermée) en valeur instantanée.

Les données issues du système MCR sont stockées dans des fichiers historiques accessibles à distance, par modem. Nous disposons dans notre bureau, à Fribourg, d'un accès à ces fichiers et aux valeurs instantanées.

3.3. Déroulement de la campagne de mesures

Initialement, la campagne de mesures était prévue et exécutée de l'été 1996 à l'été 1998. Suite à différents problèmes avec des onduleurs et avec la transmission des données, nous avons constaté qu'une partie des mesures obtenues n'étaient pas fiables. Les installations ont été modifiées et finalement après une dernière intervention du fournisseur, nous avons pu considérer que dès le 23 février 1999 le système de mesures, installé puis modifié par la Maison COLT INTERNATIONAL, était fiable.

Avec l'accord de l'OFEN, nous avons décidé de relancer une campagne de mesures s'échelonnant entre 1999 et 2000. Dans le cadre de cette campagne, nous avons réservé une période de mesures avec ventilateurs de shed arrêtés, pour essayer de détecter la différence de comportement par rapport à l'état en service normal avec ventilateurs de sheds en service (pendant la période de chauffage). Ces essais se sont déroulés du jeudi 27 avril au jeudi 4 mai 2000.

4. PRINCIPAUX RESULTATS

4.1. Bilans annuels

Pour le rapport final, nous ne conservons que les valeurs mesurées de manière fiable pour les années 1999 et 2000.

A titre d'information, la production totale d'électricité solaire, depuis la mise en service de l'installation PV en septembre 1996, établie au 31.12.2000 est de **19'710 kWhél.**

Le bilan détaillé annuel pour les années 1999 et 2000 se présente comme suit :

Tableau No 1 – Bilans annuels de l'installation PV – valeurs ajustées

Spécifications	Unités	1999	2000
Puissance nominale des cellules PV : P_0	kWp	6.7	6.7
Surface du champ A_A (F brute cellules)	m ²	46.6	46.6
Energie spécifique rayonnée dans le plan des cellules : G_C , selon mesures ajustées : Soit, pour l'année et pour la surface totale des cellules, une énergie rayonnée $E_{S,A}$	kWh/m ²	1'152	incomplet
	kWh/a	53'663	incomplet
Production d'électricité sortie onduleur E_{IO} Soit en kWh/kW _P par an	kWhél/a	4'648	5'342
	kWh/kW _P	694	797
Pour indication : valeur annuelle du rayonnement global horizontal selon station météo de Payerne	kWh/m ²	1'117	1'192
Indices de performance du système (en admettant pour 2000 des valeurs $E_{S,A}$ ajustées selon Payerne)			
Y_r énergie solaire de référence	kWh/m ² /jour	3.39	3.27
Y_f production finale d'électricité	kWh/kW _P jour	2.04	2.27
Indice de performance PR		0.60	0.69

Remarque :

Le détail des mesures figure dans le tableau No 2 du chapitre 4.2., en particulier pour le rayonnement global. Signalons que les valeurs du rayonnement global dans le plan des cellules, figurant dans le tableau en question, ont fait l'objet d'un ajustement pour tenir compte de dérives et d'effets de réflexions qui, selon notre analyse, ont eu tendance à augmenter la valeur de ce rayonnement. En effet, la valeur résultant des mesures pour 1999, sans ajustement, de 1'363 kWh/m² est apparue surévaluée. Sur la base des valeurs pour Payerne et du coefficient de transfert pour un plan incliné avec un angle $\alpha = 45^\circ$ et un azimut $\gamma = 50^\circ$ (sud-ouest), soit $R = 1'171/1'192 = 0.98$, nous l'avons ramenée aux valeurs du rayonnement horizontal.

4.2. Bilans mensuels de l'installation PV

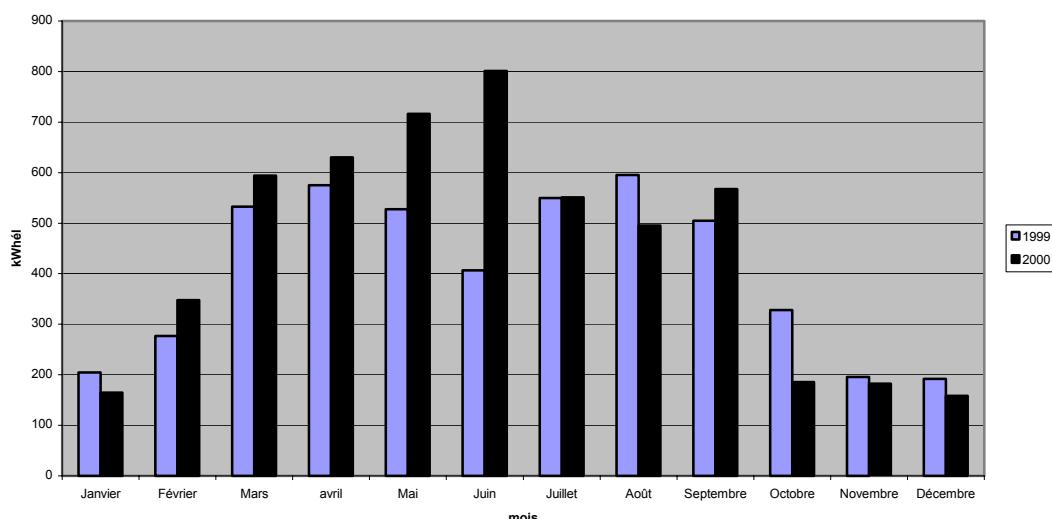
Le tableau no 2, ci-après, présente les résultats ajustés (mesures communes), par mois, pour 1999 et 2000, du rayonnement global et de la production électrique :

Tableau No 2 Résultats détaillés, ajustés, par mois

Mois	1999					2000				
	Rayonnement global		Production électrique		Nbre jours mesures effectives communes	Rayonnement global		Production électrique		Nbre jours mesures effectives communes
	global E _{SA} kWh	spécif G _C kWh/m ²	Tot ajusté E _{IO} kWh	spécifique Y _f kWh/jxkW _P		global E _{SA} kWh	spécif G _C kWh/m ²	Tot ajusté E _{IO} kWh	spécifique Y _f kWh/jxkW _P	
surface photovoltaïque A _A :			46.6 m²						46.6 m²	
Janvier	1'489	32.0	204.8	0.99	31	1'319	21.4	126.4	1.18	16
Février	1'350	29.0	165.6	1.37	18	2'279	48.9	316.6	1.63	29
Mars	3'790	81.3	502.7	2.42	31	4'318	92.7	598.3	2.88	31
avril	5'332	114.4	575.1	2.86	30	5'527	118.6	630.0	3.13	30
Mai	7'240	155.4	527.9	2.54	31	7'583	162.7	716.5	3.45	31
Juin	8'746	187.7	410.6	2.04	30	0.0	0.0	805.4	4.01	0
Juillet	9'384	201.4	549.7	2.65	31	0.0	0.0	550.8	2.65	0
Août	6'846	146.9	595.3	2.87	31	0.0	0.0	495.6	2.39	0
Septembre	5'019	107.7	508.4	2.71	28	0.0	0.0	571.8	2.84	0
Octobre	2'453	52.7	328.3	1.58	31	0.0	0.0	185.4	0.89	0
Novembre	761	16.3	106.2	0.93	17	0.0	0.0	186.3	0.93	0
Décembre	1'251	26.9	173.1	0.83	31	0.0	0.0	158.4	0.76	0
TOTAL	53'663	1'151.7	4'647.7	2.04	340	21'026	444.3	5'341.5	2.27	137

La représentation graphique de l'énergie électrique totale produite par mois (non ajustée), par le système PV, à la figure No 3 , respectivement pour 1999 et 2000 permet de se faire une bonne idée de la variation de la production mensuelle.

Figure No 3 – Variation mensuelle de la production d'électricité pour 1999 et 2000



4.3. Profils journaliers

Parmi les nombreux résultats disponibles, nous avons retenu 2 profils journaliers qui nous paraissent représentatifs du fonctionnement de l'installation PV, respectivement celui de la journée du mardi 24 août 1999, journée d'été particulièrement chaude et ensoleillée ($G_C = 6.4 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$) et celle du mercredi 26 janvier 2000, journée d'hiver particulièrement froide, mais tout de même avec du soleil ($G_C = 1.9 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$). Les profils journaliers présentés ci-après, aux figures no 4 et 5 montrent d'une part l'évolution des températures extérieure et intérieure (mesurée sur l'intrados des cellules, au milieu du champ) et d'autre part la variation horaire de l'énergie rayonnée dans le plan des cellules et la production correspondante d'électricité solaire, en kWh/h. Pour une lecture plus facile du diagramme, nous avons multiplié les valeurs de la production électrique par 10.

Figure No 4 Profil journalier horaire températures extérieure T_{ext} , intrados, énergie rayonnée E_{SA} et production d'électricité pour le mardi 24 août 1999, représentatif d'un jour type ETE

Production journalière d'électricité E_{IO} :

31.1 kWh

Energie rayonnée dans le plan des capteurs E_{SA} :

349,5 kWh.

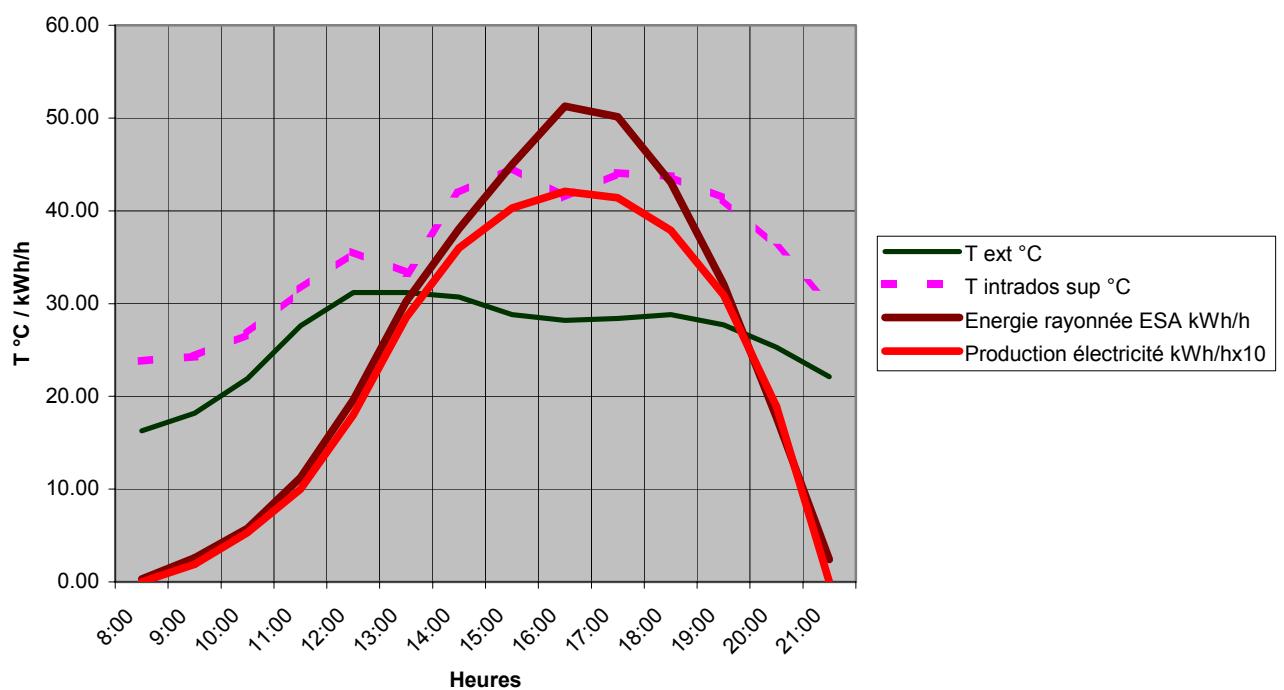
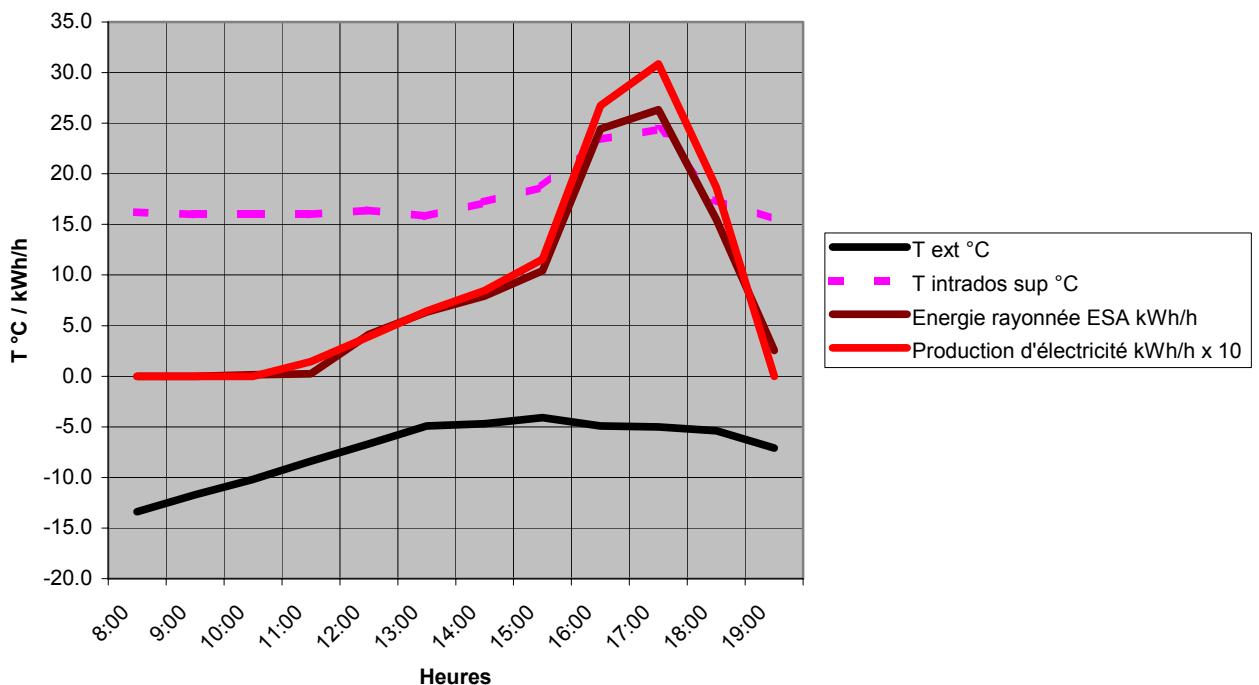


Figure No 5 Profil journalier horaire températures extérieure T_{ext} , intrados, énergie rayonnée E_{SA} et production d'électricité pour le mercredi 26 janvier 2000, représentatif d'un jour type HIVER

Production journalière d'électricité E_{IO} : **10,8 kWh**
 Energie rayonnée dans le plan des capteurs E_{SA} : **99,5 kWh.**



Le choix de la représentation des 2 courbes d'énergie respectivement celle de l'énergie rayonnée dans le plan des cellules et celle de la production d'électricité correspondante, sortie onduleurs dans un rapport de 1 à 10 est peu orthodoxe, mais il permet de rendre compte visuellement du rendement global de l'installation. En effet, lorsque les 2 courbes coïncident, le rendement est de 10 %. Lorsque la courbe de production électrique dépasse celle de l'énergie rayonnée, le rendement est supérieur à 10 %.

Nous observons que pour le cas HIVER, le rendement du système PV est supérieur à celui du cas ETE. Cela met en évidence le rôle joué par la température extérieure sur la performance du système PV.

Nous observons également que même par grand froid ($T_{ext} < -10^\circ\text{C}$), la température de l'intrados reste supérieure à 15°C .

5. ANALYSE DES RESULTATS

5.1. *Principales constatations*

Après quelques déboires et mises au point ardues, en particulier en ce qui concerne le système d'acquisition de données du système solaire ainsi que le fonctionnement de certains onduleurs, nous pouvons considérer que le système PV/T de Domdidier fonctionne de manière satisfaisante, depuis février 1999.

Nous disposons pour 1999 et 2000 des résultats détaillés complets en ce qui concerne la production d'électricité solaire. Par contre, du point de vue du rayonnement solaire global dans le plan des capteurs, nos mesures s'arrêtent à fin mai 2000. Nous disposons donc de 17 mois complets pour l'analyse des résultats. Nous constatons que la production d'électricité s'est accrue chaque année depuis la mise en service en 1996. Cela tient essentiellement à la disponibilité des installations, dont la mise au point définitive a été réalisée au début 1999. Si l'on compare les mois de mars, avril et mai, seuls mois complets de mesures pour les 2 années d'analyse, soient 1999 et 2000, nous obtenons le tableau suivant :

Tableau No 3 Bilans comparés 1999 – 2000 sur 1 mois de mesures complètes

	1999	2000
	mars-mai 92 j	mars-mai 92 j
Energie incidente plan capteurs	E _{S,A} [kWh] 16'362	17'428
Energie totale fournie par le système	E_{I,O} [kWh] 1'606	1'945
Energie solaire de référence Y _r	kWh/m ² /jour 3.82	4.07
Production finale Y _f	kWh/jourxkW _P 2.60	3.16
Indice de performance PR	0.68	0.78

La performance du système, sur les 3 mois de mesures complètes, est supérieure pour l'année 2000 par rapport à 1999, confirmant la tendance annuelle (tableau No 1).

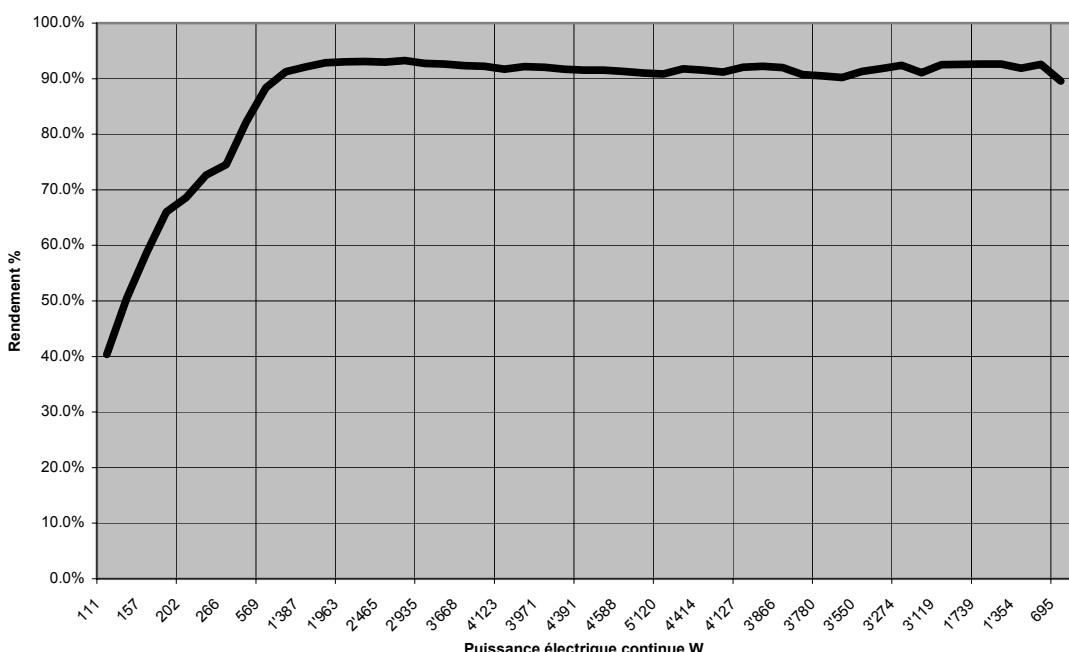
L'efficacité globale annuelle du système, pour 1999 est de $\eta_{tot\ 1999} = 8.7\%$, ce qui est une bonne valeur.

Nous constatons que sur une année complète, l'indice de performance est meilleur en 2000 (PR = 0.69) qu'en 1999 (PR = 0.60). Ce constat confirme, selon notre analyse, le problème de la disponibilité pas encore optimale de l'installation, en particulier en raison de petites pannes au niveau des onduleurs, certains disjoncteurs lâchant un peu facilement par temps d'orage. Or le réarmement est manuel. Au début de la campagne de mesures en 1996-1997, nous disposions d'une possibilité de contrôle à distance des pannes des onduleurs. Mais avec le changement de système, nous avons perdu cette possibilité. Seul le contrôle sur place nous permet de détecter la panne et d'intervenir. Cette situation s'est améliorée en 2000 essentiellement en raison du suivi sur place plus fréquent avec pratiquement une visite toutes les 2 semaines. Si l'on admet pour référence les données de rayonnement global annuel de la station météo de Payerne nous observons que le rayonnement solaire annuel s'est accru de 6,8 % entre 1999 et 2000 et la production d'électricité E_{I,O} de 11,5 % pour la même période, confirmant l'amélioration de la disponibilité.

5.2. Efficacité des onduleurs

Pour cette analyse, nous retenons un jour représentatif de la température extérieure moyenne d'hiver. Nous avons choisi le lundi 21 février 2000. La figure No 6, ci-après, présente le rendement moyen des onduleurs, exprimé en % en fonction de la puissance sortie onduleurs P_{IO} . Ce graphique met en évidence l'efficacité des onduleurs.

Figure No 6 Efficacité des onduleurs : rendement en % en fonction de la puissance électrique P_{IO} des cellules PV, selon mesures du 12.02.99



5.3 Analyse du comportement hybride de l'installation

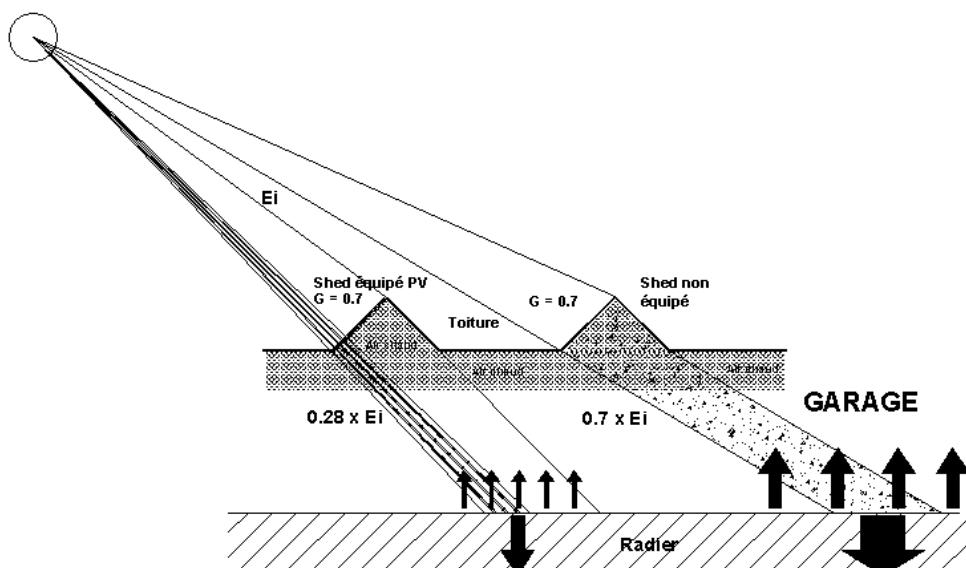
L'analyse du comportement hybride de l'installation repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

1. L'ensemble sheds – halle (garage) fonctionne comme un capteur solaire thermique selon les hypothèses suivantes:
 - a. le vitrage du shed normal a un coefficient de transmission énergétique d'environ 0.7. Dans ces conditions, nous admettons que le 70 % de l'énergie incidente traverse le vitrage et va, pour l'essentiel, frapper le radier, seule une petite partie est retenue par les structures du shed et du plafond ou par réflexion sur le vitrage opposé.
 - b. Le vitrage du shed équipé des cellules photovoltaïques a un coefficient de transmission énergétique admis identique (0.7). Par contre, seule 40 % de la

surface est transparente. Dans ces conditions, nous admettons que le 28 % de l'énergie incidente va frapper le radier.

- c. Le radier fonctionne comme stockeur de chaleur, avec des cycles de charge et décharge, selon le régime des températures intérieures (7 °C la plupart du temps, 17°C en cas d'occupation par du personnel). Le destockage contribue au chauffage de la halle. Une partie de la chaleur contribue à la constitution et à l'entretien d'un coussin d'air chaud au plafond et dans les sheds. La mise en marche périodique des aérothermes de la halle permet de brasser l'air, mais pas de manière suffisante pour recycler l'entièreté du coussin d'air chaud au plafond.
- d. La figure No 7 illustre les hypothèses ci-avant.

Figure No 7 Schéma admis pour le fonctionnement en capteur solaire de l'ensemble sheds-radier du garage



- 2. La complexité du comportement réel de l'ensemble, du point de vue thermique, l'absence de mesures au niveau du radier et de la répartition des températures dans la halle, de même que les données d'exploitation très variables (taux d'occupation, fréquence d'ouverture des portes etc) nous amènent à renoncer à modéliser le fonctionnement thermique global de la halle. Nous avons choisi de nous concentrer sur des indicateurs admis représentatifs du comportement hybride des cellules, soient :
 - a. Comparaison des températures de l'air dans le shed normal et dans le shed équipé des cellules PV, en période hivernale. C'est un indicateur pour la production de chaleur des cellules PV sur l'intrados, étant admis que tous les autres paramètres influençant cette température sont quasiment les mêmes pour les 2 sheds.

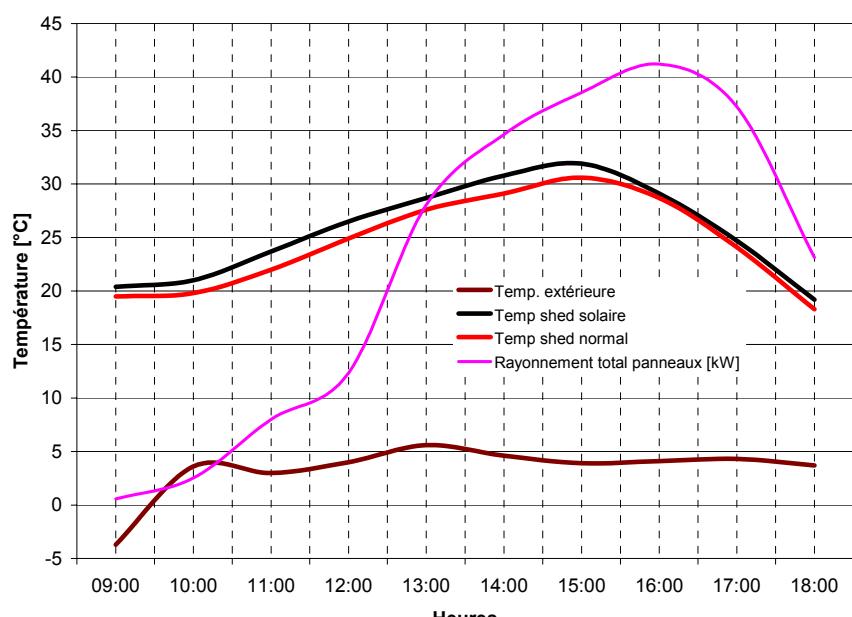
- b. Comparaison du rendement du système PV pour le cas de marche de l'installation de ventilation du shed solaire (évacuation de la chaleur émise par les cellules PV) et pour le cas d'arrêt de cette installation. Nous admettons que cette comparaison fournit une indication suffisante, bien qu'indirecte, sur le fonctionnement hybride des cellules PV, partant du principe que le refroidissement des cellules augmente leur rendement électrique.

D'une manière globale, et indépendamment des indicateurs mentionnés ci-avant, nous observons que la demande en chaleur pour le chauffage du garage, suivie de manière continue par le système MCR, montre une économie d'énergie importante pour la période 1999-2000, de l'ordre de 35 %, à conditions climatiques égales, par rapport au modèle simulé pour le projet. Une partie de cette économie est à attribuer à une amélioration de la gestion des aérothermes et à un taux d'occupation un peu inférieur aux prévisions. Mais nous pouvons admettre qu'une fraction de cette économie est due aux apports thermiques solaires plus importants que prévus, et en particulier au recyclage de l'air prélevé dans le shed solaire, en période diurne, soient 600 m³/h à une température toujours supérieure à 15 °C pour contribuer au chauffage de base (7°C). C'est un premier indice que l'apport thermique des cellules PV contribue au chauffage de la halle.

Comparaison des températures dans les sheds, en hiver :

L'analyse de nombreux graphiques horaires journaliers, mettant en relation la température extérieure, la température sur l'intrados ainsi que la température ambiante dans la partie haute des 2 sheds du garage, a permis de constater un écart systématique des températures entre le shed de référence et le shed équipé de l'installation PV, de l'ordre de +1 à +2 °C, pendant la période hivernale, ceci en faveur du shed solaire. La figure No 8, ci-après, montre l'évolution relative des températures dans les 2 sheds pour le lundi 21 février 2000, représentatif, selon notre analyse, du comportement en période HIVER du point de vue des températures. Pour compléter l'information, la température extérieure et le rayonnement global dans le plan des cellules sont également reportés sur le graphique :

Figure No 8 Variation des températures extérieure et ambiante dans les 2 sheds ainsi que le rayonnement solaire le lundi 21 février 2000



Comparaison du rendement du système PV avec et sans ventilation :

Une campagne de mesures a été faite au début mai 2000 pour comparer le rendement du système PV avec ventilation en marche (cas normal) et avec ventilation à l'arrêt (essai limité dans le temps). Nous avons retenus 1 jour représentatif du cas d'arrêt des ventilateurs, soit le mercredi 3 mai, et 1 jour représentatif du cas de marche des ventilateurs, soit le vendredi 5 mai.

Un premier tableau présente les résultats des mesures du rayonnement solaire et des températures respectivement sur l'intrados des cellules solaires (température moyenne entre le haut, le milieu et le bas du champ) et de l'air dans le shed solaire et dans le shed normal (mesure à environ 1.5 m du pied du shed). En phase de marche, le débit total des 2 ventilateurs est de 600 m³/h. Nous obtenons les résultats suivants :

Tableau No 5 : Résultats des mesures du rayonnement et des températures

Date	Heure	Temp. extérieure sans vent.	Rayonnement plan cellules [W/m ²]	Rayon. total cumul.sans vent. [kWh]	Temp. moyenne intrados	Shed solaire Temp. air sans vent.	Shed normal Temp. air sans vent.
Ventilateur arrêté	09:00	19.9	80.00	0.00	23.3	27.3	27.4
	10:00	21.8	145.44	5.04	25.0	30.0	29.8
	11:00	25.7	407.22	19.76	28.9	33.0	33.1
	12:00	26.3	523.28	41.99	31.7	35.8	36.1
	13:00	28.2	790.89	76.37	35.6	37.0	36.7
	14:00	28.0	915.56	115.14	38.5	37.7	37.9
	15:00	25.9	1159.61	163.02	38.9	36.8	36.6
	16:00	25.0	967.06	209.42	37.4	38.0	36.8
	17:00	22.8	124.44	238.47	32.6	30.4	30.1
	18:00	15.2	508.39	246.74	24.0	33.1	32.9
	03.05.00	19:00	498.67	277.51	24.9	30.8	30.5
Date	Heure	Temp. extérieure avec vent.	Rayonnement plan cellules [W/m ²]	Rayon. total cumul.avec vent. [kWh]	Temp. moyenne intrados	Shed solaire Temp. 1 avec vent.	Shed normal Temp. 1 avec vent.
Ventilateur en marche	09:00	17.3	103.28	0.00	20.4	26.1	25.9
	10:00	21.8	133.28	5.23	23.6	28.5	28.6
	11:00	23.9	422.33	19.23	26.3	30.9	31.0
	12:00	26.9	499.06	38.99	30.0	33.7	33.8
	13:00	29.0	736.72	66.34	33.7	35.6	36.1
	14:00	27.0	884.56	100.06	35.7	34.8	34.9
	15:00	23.4	136.50	126.99	32.1	30.4	30.2
	16:00	20.0	342.33	137.72	25.5	31.8	31.7
	17:00	23.2	494.89	165.99	29.2	31.6	31.4
	18:00	22.7	308.72	179.09	28.9	34.1	33.8
	05.05.00	19:00	22.0	166.67	30.2	32.0	31.9

Sur la base des mesures du rayonnement et des résultats des mesures détaillées par onduleur et selon sortie réseau de la production électrosolaire, nous avons déterminé les pertes électriques et le rendement énergétique global de l'installation photovoltaïque, avec l'objectif de mettre en évidence les éventuelles différences entre l'état avec ventilation et l'état sans ventilation, c.a.d avec et sans évacuation de la chaleur sur l'intrados des cellules. Le tableau No 6. ci-dessous, présente les résultats de ces calculs :

Tableau No 6 : production d'électricité et rendement de l'installation

Date	Heure	Rayon. total cumul.sans vent. [kWh]	Energie électrique sans vent. [kWh]	Energie él., cumulée sans vent. [kWh]	Pertes cumulées sans vent. [kWh]	Rend. moy. onduleurs sans vent. [%]	Rendement énergétique global sans vent. [%]
Ventilateur arrêté	09:00	0.00	0.048	0.000	0.00	88.4%	0.0%
	10:00	5.04	0.096	0.275	-5.65	93.0%	5.5%
	11:00	19.76	0.309	1.205	-16.71	92.7%	6.1%
	12:00	41.99	0.426	2.736	-31.98	91.7%	6.5%
	13:00	76.37	0.613	5.044	-54.22	91.5%	6.6%
	14:00	115.14	0.686	7.608	-78.93	90.8%	6.6%
	15:00	163.02	0.778	10.499	-108.99	92.0%	6.4%
	16:00	209.42	0.639	13.273	-138.17	72.4%	6.3%
	17:00	238.47	0.087	14.964	-157.68	92.4%	6.3%
	18:00	246.74	0.438	15.537	-165.08	92.6%	6.3%
	03.05.00	19:00	277.51	0.411	-185.59	89.5%	6.4%
						Moyenne	6.1%
Date	Heure	Rayon. total cumul.avec vent. [kWh]	Energie él. instant. (mes.) avec vent. [kWh]	Energie él. cumulée (mes.) avec vent. [kWh]	Pertes cumulées avec vent. [kWh]	Rend. moy. onduleurs avec vent. [%]	Rendement énergétique global avec vent. [%]
Ventilateur en marche	09:00	0.00	0.07	0.000	0.00	86.4%	0.0%
	10:00	5.23	0.086	0.299	5.83	92.8%	5.7%
	11:00	19.23	0.321	1.189	-16.59	92.7%	6.2%
	12:00	38.99	0.396	2.544	-30.54	92.1%	6.5%
	13:00	66.34	0.588	4.412	-48.79	91.2%	6.7%
	14:00	100.06	0.627	6.578	-70.73	90.0%	6.6%
	15:00	126.99	0.102	8.172	-89.02	93.1%	6.4%
	16:00	137.72	0.290	8.937	-97.88	93.1%	6.5%
	17:00	165.99	0.392	10.914	-116.88	92.9%	6.6%
	18:00	179.09	0.253	11.827	-127.02	92.9%	6.6%
	05.05.00	19:00	204.66	0.475	-144.46	90.2%	6.8%
						Moyenne	6.3%

Indicateurs de performance du système	sans ventil	avec ventil
Y _r Energie solaire de référence	kWh/m ² /jour	5.96
Y _f Production finale	kWh/jourxkW _P	2.64
PR Indice de performance	Y _f / Y _r	0.44
		0.47

Effet hybride :

L'indicateur des températures comparées dans les sheds en hiver montre qu'un écart systématique de l'ordre de 1 à 2 °C se manifeste entre le shed solaire et le shed normal, alors que la ventilation du shed solaire est en marche. Selon nos observations, cette différence est effective entre 09:00 et 16:00, d'une manière générale, en hiver. En admettant que la chaleur récupérée dans le shed solaire soit due à l'échauffement des cellules PV et qu'elle contribue au chauffage de la halle grâce à la pulsion de l'air chaud à raison de 600 m³/h, vers le sol, nous évaluons à au moins 26 kWh, en moyenne journalière, l'apport des cellules PV au chauffage. Cette chaleur est en tous les cas utiles pour tous les jours où la température moyenne diurne est inférieure à 7 °C. C'est l'effet thermique du système PV.

Pour la journée du 21 février 2000, nous avons les résultats de mesure suivants :

Energie rayonnée dans le plan du capteur	$E_{S,A\text{ jour}}$	220.42 kWh
Energie AC sortie onduleur	$E_{IO\text{ jour}}$	24.52 kWhél

Apport énergétique utile pour l'année, évalué à 4'700 kWhth

L'effet hybride selon cette évaluation se caractérise par :

Evaluation de l'apport en chaleur des cellules PV :	26.00 kWhth
Rendement électrique journalier	%
Rendement thermique journalier	%
Rendement PV/T journalier	22.9 %

Si l'on compare ce résultat à ceux des systèmes hybrides classiques performants, dont le rendement PV/T est supérieur à 50 %, on constate que le bénéfice de l'hybridité est relativement modeste. L'apport énergétique utile annuel est évalué à 4'700 kWhth. Il faut cependant rappeler qu'il s'agit ici d'un système à simple vitrage, sans captage confiné de la chaleur. D'autre part, les évaluations faites sont simplificatrices, et il est probable que le bilan réel soit un peu plus favorable.

Amélioration de l'effet hybride dans le cas d'un système ouvert, type CED :

La question se pose de l'amélioration qu'apporterait la mise en place d'un double-vitrage isolant du type posé sur le reste des lanterneaux du CED ($k = 1.80 \text{ W/m}^2\text{K}$), en lieu et place du vitrage simple, sur la performance thermique du système. Nous avons évalué le bilan différentiel entre le vitrage normal et le vitrage solaire ($k = 4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$), en considérant que ces pertes n'interviennent que lorsque la température du shed solaire est égale ou inférieure à celle du shed normal, et lorsque la température extérieure est inférieure à 7 °C. La perte énergétique due au simple vitrage par rapport au double vitrage isolant a été évaluée en considérant les températures effectives enregistrées par mois, pour les mois où la température moyenne est inférieure ou proche de 7 °C et en calculant pour la tranche horaire 16 :00 à 09:00 les déperditions totales par type de vitrage. Le bilan donne une économie d'énergie de 2'700 kWh/an au profit du double vitrage.

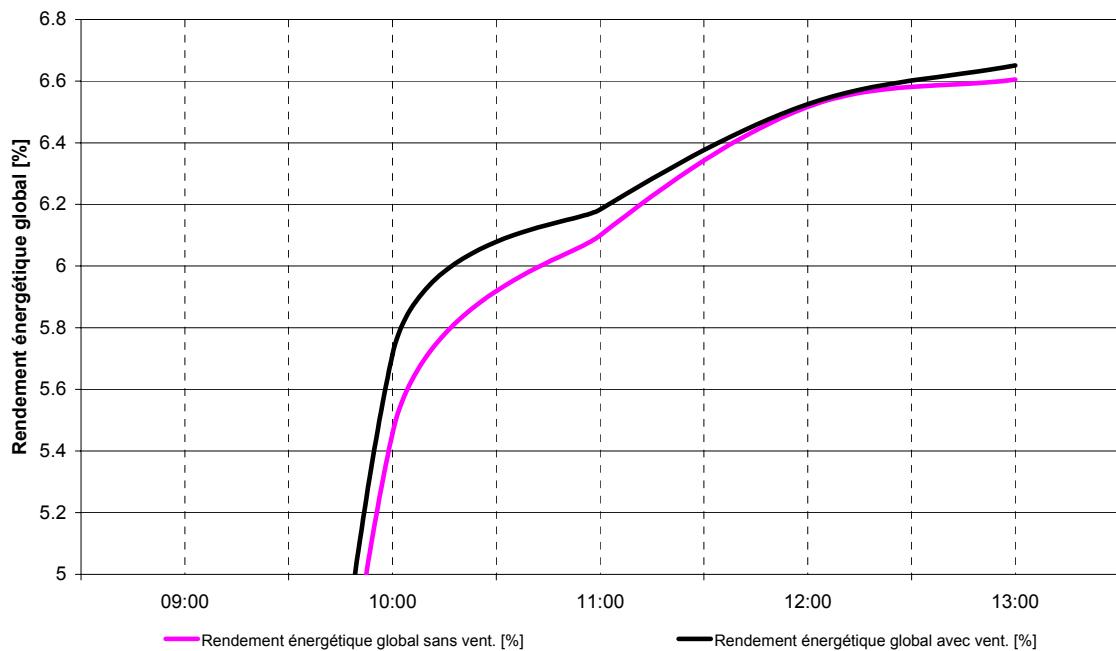
Amélioration du rendement électrique dans le cas de fonctionnement hybride :

La mise en marche de la ventilation du shed solaire, dont l'objectif est d'évacuer la chaleur produite par les cellules PV, soit en hiver pour la distribuer dans la partie basse de la halle pour contribuer au chauffage de base à + 7°C, soit en été pour l'évacuer vers l'extérieur, contribue à l'amélioration du rendement du système PV, selon les résultats du tableau No 6. L'indice de performance passe de 0.44 sans ventilation à 0.47 avec ventilation, soit une amélioration de l'ordre de 7 %. Même si ces valeurs sont à prendre avec prudence, c'est un indicateur qui confirme que le fonctionnement hybride du système PV du CED contribue à l'amélioration de son rendement électrique.

La figure No 9 montre l'évolution du rendement de l'installation PV pour les cas sans et avec ventilation, respectivement le mercredi 3 mai et le vendredi 5 mai 2000, pour l'horaire de 09:00 à 12:00, période où les conditions externes peuvent être considérées comme comparables

Figure No 9

Evolution du rendement électrique comparée pour le cas sans ventilation (3.05.00) et avec ventilation (5.05.00)



6. CONCLUSIONS

6.1. *Fonctionnement hybride de l'installation PV de Domdidier*

Incontestablement, l'installation PV de Domdidier apporte, en période de chauffage une contribution au chauffage du garage, en plus de la production d'électricité. L'analyse des différents graphiques mettant en relation la température extérieure, les températures internes sur l'intrados des cellules PV et dans l'ambiance des sheds, ainsi que les bilans énergétiques nous amène à conclure :

1. Le refroidissement des cellules photovoltaïques par simple circulation d'air sur l'intrados permet d'améliorer le bilan thermique de chauffage du garage. La différence de température entre l'air repris au sommet du shed puis pulsé au sol, après réchauffement par l'apport des cellules PV (+ 1 à 2°C par rapport à l'air de l'autre shed constitué essentiellement du matelas d'air chaud par effet de serre + rayonnement radier) avec la consigne antigel fixée à 7 °C pour la température ambiante du garage est suffisante pour contribuer au chauffage de la halle. Même par grand froid, on observe que la température dans le shed équipés des cellules PV ne descend pas au-dessous de 15 °C.
2. L'évaluation de l'apport thermique du système PV est de l'ordre de 4'700 kWh/an, soit à peu près l'équivalent de la production d'électricité solaire. Il y a donc bien un fonctionnement hybride, qui se traduit par une augmentation du rendement énergétique du système PV/T. A titre d'exemple, l'évaluation des rendements sur 1 jour, soit le 21 février 2001 montre que le rendement du système passe de 11,1 % (rendement électrique) à 22.9 % (rendement électrique+thermique). Rappelons que l'évaluation repose sur des hypothèses simplificatrices. Nous admettons cependant que le résultat est représentatif du bilan énergétique effectif du système..
3. Le fait d'utiliser un double vitrage isolant, combiné avec le champ de cellules PV améliore incontestablement le bilan thermique par une diminution des pertes de l'ordre de 2'700 kWhth par an, soit à peu près le 60 % de la production électrique.
4. L'évacuation de la chaleur par un système de ventilation améliore le rendement des cellules PV d'environ 7 % selon nos évaluations. Le système hybride améliore donc la performance électrique du système.
5. Nous sommes d'avis qu'il serait plus judicieux de mettre en concurrence le système hybride simple type CED avec des sheds classiques avec la face sud opaque en guise de protection contre les surchauffes, la solution des cellules intégrées dans un vitrage constituant une barrière déjà efficace et ajustable contre le risque de surchauffe, tout en apportant à la fois un éclairage utile et des gains énergétiques déterminants. Un double-vitrage est recommandé.

6.2. *Exploitation des résultats pour d'autres cas*

Compte tenu de la base de données constituée par les 4 années de mesures ainsi que par les résultats encourageants obtenus, nous sommes convaincus que le système hybride simple PV/T de Domdidier pourrait servir de modèle à d'autres projets, en milieu industriel soit pour les cas de halles de stockage à faible niveau de température de service, avec le système du CED, soit pour des halles industrielles nécessitant de l'éclairage zénital, avec éventuellement l'adaptation du système par la mise en place sur l'intrados d'un caisson permettant de confiner l'air circulant derrière les cellules PV.

Il est envisageable de compléter l'expérience au CED avec le test d'un caisson constitué d'une plaque de verre formant un véritable double vitrage avec un espace de l'ordre de 10 cm pour la circulation d'air. Les ventilateurs étant déjà en place, les modifications sont relativement simples. Il serait judicieux, dans ce cas, de compléter le système de mesures avec des mesures de températures au niveau du radier et de l'ambiance de la halle elle-même.

6.3. *Collaborations*

Nous avions prévu de collaborer avec la section électricité de la HES à Fribourg, qui dispose d'une installation PV de 3 kWp sur le toit de l'un des bâtiments de l'école. L'idée était d'échanger nos expériences et nos fichiers de mesures et de permettre à des étudiants, dans le cadre de projets de semestre, de tirer partie des capacités de mesure des 2 systèmes. Malheureusement, cette collaboration n'a pas encore porté ses fruits en raison du décalage de leur programme. Nous espérons cependant que cela puisse se réaliser dans un proche avenir.

Une collaboration avec d'autres HES ou d'autres institutions reste ouverte.

GEIMESA et Partenaires SA

J. Audergon, ing dipl EPFL/SIA

LISTE DES SYMBOLES

CED	Centre d'entretien autoroutier de la N1 à Domdidier/FR	
PV	Photovoltaïque	
PV/T	Photovoltaïque/Thermique	
Météo		
G_C	[kWh/m ²]	Irradiation dans le plan des capteurs
STC		Conditions standards : 1 kW/m ² , 25 °C, AM 1.5
$E_{S,A}$	[kWh]	Energie dans le plan capteur
Champ photovoltaïque		
P_O	[kW _p]	Puissance nominale , aux STC selon constructeur
A_A	[m ²]	Surface du champ (surface brute des modules)
E_A	[kWh]	Energie sortie du champ
η_A	[---]	Efficacité du champ $E_A / E_{S,A}$
$U_{MPP\ STC}$	[V]	Tension cellules aux conditions STC = U_{PV}
$I_{MPP\ STC}$	[A]	Courant du champ aux conditions STC = I_{AC}
P_{PEAK}	[W]	Idem P_O , puissance nominale cellules STC
P_{ac}	[W]	Puissance onduleur
U_{ac}	[V]	Tension onduleur
F_{ac}	[hz]	Fréquence onduleur
Conditionnement de puissance / onduleur		
E_{II}	[kWh]	Energie DC entrée onduleur
E_{IO}	[kWh]	Energie AC sortie onduleur
η_I	[---]	Efficacité énergétique onduleur E_{IO} / E_{II}
Indices de performance système ($Y = \forall Yields \forall$)		
Y_r	[kWh/m ² /jour]	Ennergie solaire de référence, par jour
Y_f	[kWh/jour x kW _P]	Production finale (d'électricité), par jour
PR	Y_f / Y_r	Indice de performance
Données CED		
BT	[°C]	Basse Température (chauffage)
MT	[°C]	Moyenne Température (chauffage)
T ext	[°C]	Température extérieure, mesurée sur le système MCR
Temp 1		Température de la sonde d'ambiance sud-ouest de shed

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Centrales photovoltaïques – Guide pour le dimensionnement et la réalisation de projets
A l'usage des bureaux d'ingénieurs PACER 1996
- [2] Normierte Auswertungen – Messdaten PV-Netzverbundanlagen
L. Clavadetscher, A. Frölich, Th. Nordmann – Förderprogrammleitung Photovoltaik
c/o TNC Consulting AG, Asystrasse 84 CH-8708 Männedorf