

**Zeitschrift:** Technique agricole Suisse  
**Herausgeber:** Technique agricole Suisse  
**Band:** 71 (2009)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Exploitation thermique des installations photovoltaïques intégrées dans la toiture : utiliser la chaleur pour le séchage tout en produisant plus de courant  
**Autor:** Caenegem, Ludo Van / Bollhalder, Hubert / Dörfler, Renate  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1086008>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 05.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

## Exploitation thermique des installations photovoltaïques intégrées dans la toiture

### Utiliser la chaleur pour le séchage tout en produisant plus de courant

Ludo Van Caenegem, Hubert Bollhalder, Renate Dörfler, Christian Gazzarin, Franz Nydegger, Hans-Rudolf Ott, Alina Pasca, Alfons Schmidlin, Station de recherche Reckenholz-Tänikon ART, CH-8356 Ettenhausen

Intégrer les modules solaires des installations photovoltaïques dans la toiture permet d'exploiter davantage l'énergie solaire que jusqu'ici. C'est ce que démontre une installation pilote de la station de recherche de Agroscope Reckenholz-Tänikon ART. Aujourd'hui, seuls 10 à 15 pour cent des rayons solaires sont convertis en courant électrique. Le reste se perd par convection dans l'environnement sous forme de chaleur ou est renvoyé par rayonnement. Cependant, si on intègre les modules solaires, qui se composent de plusieurs cellules solaires, dans la toiture, il est possible de les utiliser non seulement pour la production de courant, mais aussi pour la production de chaleur. Il suffit de créer un flux d'air dans le collecteur entre les modules solaires et la sous-toiture. Ce système augmente le refroidissement des cellules solaires et par conséquent leur rendement électrique.

Une installation pilote d'ART a permis d'étudier combien de chaleur on peut

tirer des modules solaires en fonction de différents paramètres comme le débit et la vitesse de l'air dans le collecteur, la vitesse du vent et la radiation globale. Les résultats de mesure indiquent qu'il existe un rapport très net entre la vitesse de l'air dans le collecteur et le rendement thermique et électrique. Les jours ensoleillés, on a pu retirer aux modules solaires jusqu'à 3,9 kWh de chaleur et 0,77 kWh d'électricité par mètre carré. Pendant la ventilation, la température des cellules solaires a baissé jusqu'à 15 degrés et la production d'électricité a augmenté jusqu'à 6%. Comme la température de la chaleur disponible est relativement basse, les possibilités d'utilisation sont limitées. Le mieux est d'utiliser la chaleur pour le séchage, par exemple pour le séchage du foin ou des plaquettes de bois. L'air réchauffé présente un déficit de saturation élevé, ce qui raccourcit le temps de séchage et réduit la consommation d'énergie du ventilateur. En dehors du séchage,

les cellules solaires devraient si possible être refroidies par un dispositif d'aération naturelle. Cela implique une circulation d'air libre dans le collecteur, une distance suffisamment grande entre les modules solaires et la sous-toiture et peu d'étranglements, pour que la résistance de l'air ne soit pas trop importante. Si la chaleur n'est pas exploitée, l'utilisation de ventilateurs peut être utile lorsque la production supplémentaire d'électricité grâce au refroidissement des cellules solaires est plus importante que l'énergie consommée par les ventilateurs.



Fig. 1: Installation intégrée dans la toiture.

Sommaire	Page
Problématique	32
Installation d'essai	32
Résultats d'essai	32
Utilisation de la chaleur pour le séchage (séchage en grange)	35
Refroidissement des cellules solaires en dehors du temps de séchage	35
Conclusions	38
Bibliographie	38



Schweizerische Eidgenossenschaft  
Confédération suisse  
Confederazione Svizzera  
Confederaziun svizra

Eidgenössisches Volkswirtschafts-  
departement EVD  
Forschungsanstalt  
Agroscope Reckenholz-Tänikon ART



### Problématique

On dit souvent qu'un refroidissement insuffisant des cellules solaires entraîne des températures élevées et un faible rendement et que, par conséquent, les installations photovoltaïques intégrées à la toiture ne sont pas une bonne solution. Cependant si l'on parvient à refroidir les cellules solaires de manière ciblée pendant toute l'année, les installations intégrées à la toiture produisent au moins autant de courant que les installations placées sur la toiture, installations dont la face inférieure ne bénéficie souvent pas assez de l'effet du vent. La chaleur que les installations intégrées à la toiture sont susceptibles de produire est supérieure à l'énergie électrique produite par les cellules solaires. Pour maximiser la production de courant et produire le plus de chaleur possible, il est important de coordonner la construction de la toiture, les modules solaires et le dispositif d'aération dès la phase de planification.

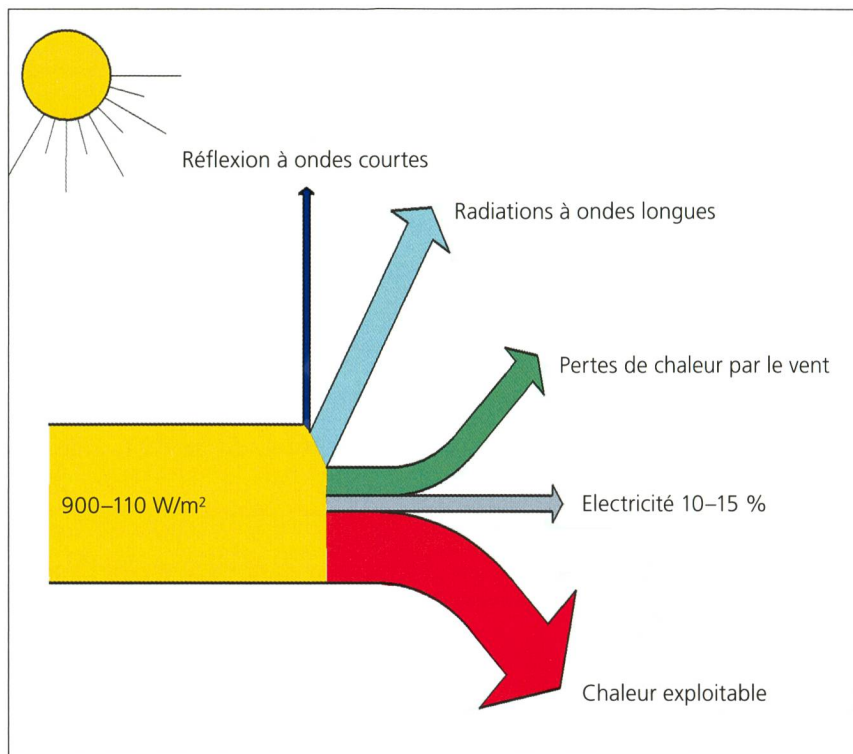


Fig. 2: Seule une petite part (10–15 %) de l'énergie solaire qui arrive sur un module solaire est convertie en électricité. Environ 40 à 50% peuvent être utilisés sous forme de chaleur, le reste se perd dans le vent ou est réfléchi.

### Installation d'essai

L'installation PV se compose de huit modules photovoltaïques (type Megalate 1,316 x 0,975 m, 136 Wp, 3S Swiss Solar Systems SA), intégrés à la toiture et raccordés à un onduleur (Sunny Boy 1100 LV) (fig. 3). L'inclinaison du toit est de 20 degrés. A 20 centimètres en dessous des modules se trouve une sous-toiture en panneaux agglomérés, qui, avec les modules solaires et les poutres latérales, forment un collecteur de 10,5 mètres de long et 0,83 mètres de large. Le flux d'air dans le collecteur est produit par un ventilateur axial ( $\Delta$  50 cm) avec débitmètre en amont. Des sondes PT-100 mesurent la température de l'air (précision de 0,1 °C) au début et à la fin du canal, ainsi que la température des cellules solaires (précision de 0,5 °C) au centre de l'installation. La vitesse de l'air dans le collecteur et la vitesse du vent au-dessus des cellules solaires sont enregistrées à l'aide d'un anémomètre à fil chaud (Schmidt SS20.502 300 428). Un capteur de rayonnement (Ahlborn type FLA 613-GS, SN 6557/08) mesure la radiation globale du soleil sur un plan horizontal. La produc-

tion de courant est relevée après l'onduleur. A cause des pertes d'énergie lors de la conversion du courant continu en courant alternatif et à cause de la chute de tension dans les lignes de raccordement, la production est environ dix pour cent plus faible que l'énergie électrique fournie par les cellules solaires.

Toutes les données sont saisies toutes les secondes, pondérées sur une minute, puis enregistrées.

Le débit d'air est calculé à partir de la vitesse de l'air dans le collecteur et comparé avec la valeur du débitmètre. La différence de température de l'air à l'entrée et à la sortie du collecteur, le débit d'air et la densité de l'air sont les paramètres qui permettent de calculer la chaleur absorbée. Les rendements thermique et électrique sont obtenus en faisant le quotient de la puissance thermique ou électrique ( $W/m^2$ ) par la radiation globale ( $W/m^2$ ) sur un plan horizontal. Pendant les mesures, le toit était toujours orienté au Sud.

### Résultats d'essai

Seule une petite part (10–15 %) de l'énergie solaire qui arrive sur le module solaire peut être convertie en électricité (fig. 2). Une partie des radiations solaires à ondes courtes n'est pas absorbée, mais directement réfléchi. Une part de l'énergie absorbée est renvoyée dans l'espace sous forme de radiations à ondes longues. Une autre partie se perd par convection dans les courants éoliens qui effleurent les cellules solaires. Le reste pénètre dans les modules solaires et peut être récupéré sous forme de chaleur sur le côté inférieur. Pour savoir précisément combien de chaleur peut être exploitée, il est indispensable de faire des essais en fonction des principaux paramètres: géométrie de l'installation, vitesse de l'air sur les côtés inférieur et supérieur des modules solaires, radiation globale, inclinaison et orientation du toit, ainsi que résistance thermique des modules solaires. C'est pourquoi une installation d'essai photovoltaïque (installation PV) a été installée à ART à Tänikon. Elle a permis de mesurer les rendements thermique et électrique durant l'été 2008.



**Essais préalables sans sous-toiture**

Les deux premiers jours (01.07.08 et 02.07.08), la sous-toiture n'avait pas encore été montée. Les modules solaires étaient donc soumis au vent par le haut et par le bas. Le 01.07.08 de 13h00 à 13h30, la température des cellules solaires se situait en moyenne 26,5 degrés au-dessus de la température extérieure. Le rendement électrique moyen s'élevait à 8,91 pour cent, la vitesse moyenne du vent à 1,7 m/s. Le rendement électrique se réfère à la radiation globale sur un plan horizontal. Le jour suivant (02.07.08), les valeurs relevées avec une vitesse moyenne du vent semblable étaient similaires (fig. 4). Des vitesses de vent inférieures à 2 m/s ne sont pas exceptionnelles sur le Plateau suisse, par beau temps.

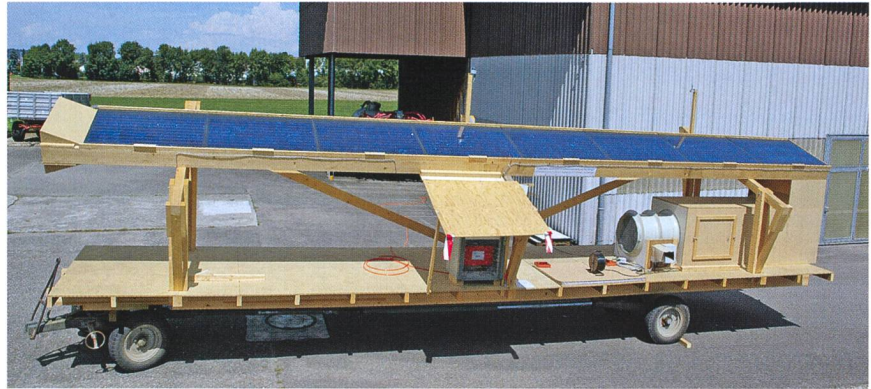


Fig. 3: L'installation d'essai (installation PV) d'ART se compose de huit modules photovoltaïques, intégrés à la toiture (20°). Un ventilateur (en bas à droite) avec débitmètre en amont permet de régler la vitesse de l'air en continu entre 1 et 7 m/s.

**Essais avec sous-toiture**

Après le montage de la sous-toiture (03.07.08), l'installation a fonctionné pendant 25 jours de beau temps, 14 jours en juillet, 6 jours en août, 3 jours en septembre et 2 jours en octobre (tab. 1). La vitesse de l'air dans le collecteur (canal entre les modules solaires et la sous-toiture) variait entre 2,66 et 6,83 m/s. En juillet, le rendement thermique moyen était d'environ 50 pour cent, le rendement électrique de 10 pour cent. On constate qu'il est possible de retirer environ cinq fois plus d'énergie des radiations solaires, sous forme de chaleur que sous forme d'électricité (mesures effectuées après l'onduleur).

En dépit d'une température moyenne des cellules solaires légèrement plus élevée, le rendement électrique en août était de 0,7 pour cent supérieur à celui de juillet. Ce résultat s'explique par le fait que la radiation globale est relevée à l'horizontale. Plus la hauteur du soleil baisse, plus le rapport entre

la radiation solaire sur la surface inclinée de la toiture (20°) et la radiation solaire mesurée à l'horizontale augmente. La tendance s'accroît en septembre et en octobre. Les différences relatives au rendement thermique (40–65 %) sont dues aux différentes vitesses de l'air dans le collecteur et aux vitesses du vent sur la face supérieure des modules solaires. Le rendement électrique (9–12 %) est déterminé principalement par la température des cellules solaires. Cette dernière dépend de la température ambiante, de l'ensoleillement (radiation globale), de l'émission infrarouge des modules solaires, ainsi que du refroidissement par le vent en haut et par le flux d'air en bas.

Rapport entre la température des cellules solaires et la vitesse de l'air: La température des cellules solaires se différencie d'autant plus de la température ambiante que la vitesse du vent par-dessus et la vitesse de l'air par-dessous sont basses (fig. 5). C'est le 10.07.08 (13h00–13h30) qu'on a relevé

la différence la plus élevée entre la température des cellules solaires et la température extérieure (24,6 °C). Ce jour-là, la vitesse moyenne du vent était de 2,8 m/s, et la vitesse de l'air dans le collecteur de 2,2 m/s. La différence de température la plus faible a été enregistrée le 16.07.08 (19,3 °C). La vitesse moyenne du vent était alors de 3,4 m/s et la vitesse de l'air de 3,8 m/s.

Rapport entre la température des cellules solaires et le rendement électrique: Plus la température des cellules solaires augmente, plus le rendement électrique diminue. Le 27.08.08, le ventilateur a été arrêté à 12h49 (fig. 6). De ce fait, la vitesse de l'air dans le collecteur a baissé d'environ 5,2 m/s à environ 0,3 m/s. La vitesse de l'air résiduelle était due à l'influence du vent et à l'ascendance thermique. L'arrêt de l'aération active a fait monter la température des cellules solaires d'environ 42,2 degrés à 51,6 degrés en l'espace d'une demi-heure. Le rendement électrique s'est dégradé et

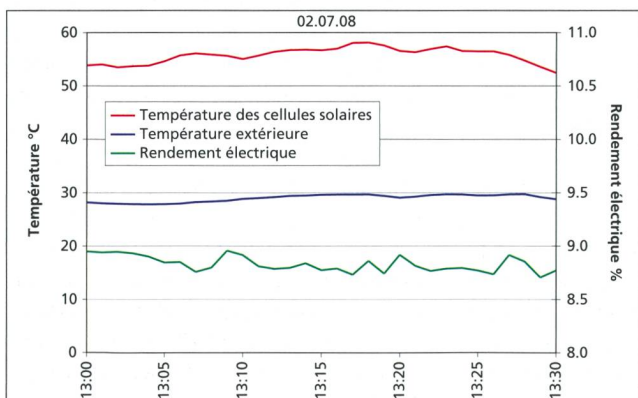


Fig. 4: Rendement électrique en fonction de la température extérieure et de la température des cellules solaires pour les modules solaires soumis à l'emprise du vent par le haut et par le bas, le 2 juillet 2008 (vitesse moyenne du vent 1,7 m/s).

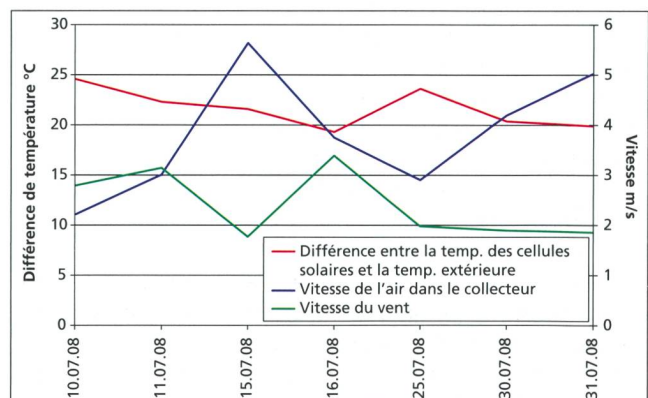


Fig. 5: La différence entre la température des cellules solaires et la température extérieure dépend de la vitesse du vent au-dessus des modules solaires et de la vitesse de l'air dans le collecteur. Valeurs mesurées entre 13h00 et 13h30.



Tab. 1: Données de mesure de l'installation photovoltaïque en juillet, août, septembre et octobre 2008

Date	Heure	Vitesse de l'air moyenne dans le canal (m/s)	Température moyenne des cellules solaires °C	Radiation globale à l'horizontale kWh/m <sup>2</sup>	Rendement électrique %	Rendement thermique %	Rapport chaleur/électricité
01.07.08	11:00–17:05	– <sup>1</sup>	51.9	5.15	9.18	–	–
02.07.08	07:56–16:46	– <sup>1</sup>	47.9	6.58	9.33	–	–
04.07.08	07:42–16:05	3.85	32.6	5.25	9.81	54.29	5.5
08.07.08	07:53–16:45	4.26	27.6	5.26	9.83	46.77	4.8
10.07.08	07:22–16:25	2.18	41.6	6.80	9.50	44.71	4.7
11.07.08	10:07–16:25	2.95	47.2	5.23	9.58	48.37	5.0
15.07.08	08:13–16:07	5.60	35.4	6.25	10.13	63.84	6.3
16.07.08	07:50–16:34	3.76	36.8	6.54	10.05	49.54	4.9
21.07.08	08:34–16:36	4.37	25.4	4.14	10.22	46.86	4.6
23.07.08	08:10–23:59	6.00	26.2	7.56	10.09	50.26	5.0
24.07.08	00:00–24:00	5.45	21.6	7.72	9.97	44.95	4.5
25.07.08	00:00–16:06	2.84	25.2	6.02	10.00	44.52	4.5
28.07.08	08:11–16:44	2.03	43.0	5.60	9.54	41.96	4.4
29.07.08	08:14–16:52	3.35	39.8	5.52	9.82	45.83	4.7
30.07.08	08:09–16:25	4.24	39.7	5.21	9.94	54.51	5.5
31.07.08	07:58–16:22	5.08	40.7	6.03	9.98	57.55	5.8
<b>Moyenne juillet</b>		<b>4.00</b>	<b>36.42</b>	<b>5.93</b>	<b>9.81</b>	<b>49.57</b>	<b>5.0</b>
06.08.08	08:40–16:55	3.57	39.9	5.59	10.21	51.04	5.0
07.08.08	13:02–16:22	3.54	41.5	1.93	9.79	49.84	5.1
11.08.08	10:05–16:06	5.79	36.2	3.51	10.14	56.81	5.6
13.08.08	13:18–16:42	3.54	35.4	2.18	10.55	48.62	4.6
18.08.08	10:09–17:48	4.38	39.0	5.31	10.98	52.69	4.8
21.08.08	11:00–16:13	0.20	42.9	3.31	10.15	–	–
27.08.08	10:11–12:49	4.28	37.3	1.88	11.44	64.04	5.6
<b>Moyenne août</b>		<b>3.61</b>	<b>38.87</b>	<b>3.39</b>	<b>10.47</b>	<b>53.84</b>	<b>5.1</b>
08.09.08	07:48–17:05	4.44	34.8	3.84	12.27	63.28	5.2
09.09.08	08:18–16:43	3.52	35.5	4.84	12.06	61.16	5.1
30.09.08	14:09–16:05	2.09	18.3	0.42	11.03	33.33	3.0
<b>Moyenne septembre</b>		<b>3.35</b>	<b>29.53</b>	<b>3.03</b>	<b>11.79</b>	<b>52.59</b>	<b>4.4</b>
14.10.08	12:12–17:18	3.37	30.76	1.23	14.40	53.7	3.7
15.10.08	11:45–17:42	4.08	28.26	1.41	14.80	51.2	3.5
<b>Moyenne octobre</b>		<b>3.73</b>	<b>29.51</b>	<b>1.32</b>	<b>14.60</b>	<b>52.45</b>	<b>3.59</b>

<sup>1</sup> Le 1.07.08 et le 2.07.08, la sous-toiture n'était pas encore montée.

est passé de 11,2 (à 42 °C) à 10,4 pour cent (à 55 °C).

Pour pouvoir comparer le rendement électrique de différents jours, l'énergie électrique ne doit pas être rapportée à la radiation globale à l'horizontale, mais à la radiation solaire sur la surface inclinée de la toiture. Le rapport entre l'ensoleillement par mètre carré sur le toit orienté au Sud (20 °) et l'ensoleillement à l'horizontale n'est pas constant. Au contraire, il diminue plus la hauteur du soleil décroît. Lorsque le soleil est au zénith (environ 13h20), le rapport était par exemple de 1,095 le 1 juillet et de 1,13 le 29 juillet. Si l'on corrige la radiation globale par ce rapport, les données enre-

gistrées en juillet 2008 permettent de calculer une baisse du rendement électrique d'environ 0,4 pour cent par degré d'augmentation de la température des cellules solaires (fig. 7).

#### Rapport entre la vitesse de l'air dans le collecteur et le rendement électrique:

Les résultats de mesure indiquent une relation évidente entre la vitesse de l'air dans le canal du collecteur et le rendement électrique (fig. 8). Plus la vitesse de l'air est élevée, plus le rendement électrique est important. Comme les autres facteurs d'influence (température extérieure, vitesse de l'air et radiation globale) ont varié durant les jours

étudiés, le parallélisme des deux courbes n'est pas parfait.

#### Rapport entre la vitesse de l'air dans le collecteur et le rendement thermique:

Plus la vitesse de l'air dans le canal augmente, plus le coefficient de transfert de chaleur entre la partie inférieure des modules et l'air circulant augmente. De ce fait, l'air absorbe davantage de chaleur. Le même principe est valable pour la partie supérieure des modules. Plus la vitesse du vent est élevée, plus les déperditions de chaleur dans l'air extérieur sont importantes, et moins la chaleur est disponible pour le collecteur. Par conséquent, le rendement



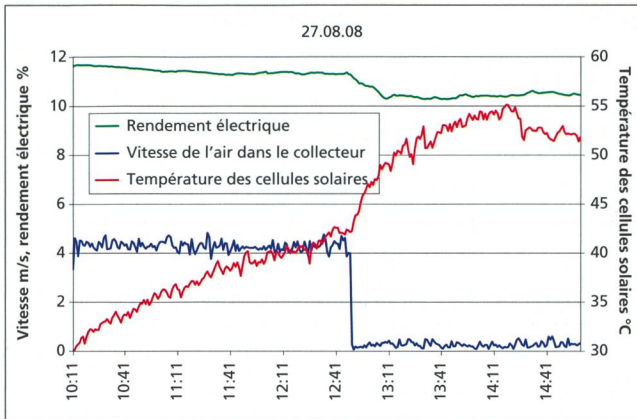


Fig. 6: Après arrêt du ventilateur, la température des cellules solaires est montée de 42 °C à 55 °C. Le rendement électrique a baissé de 11,2 à 10,4 %.

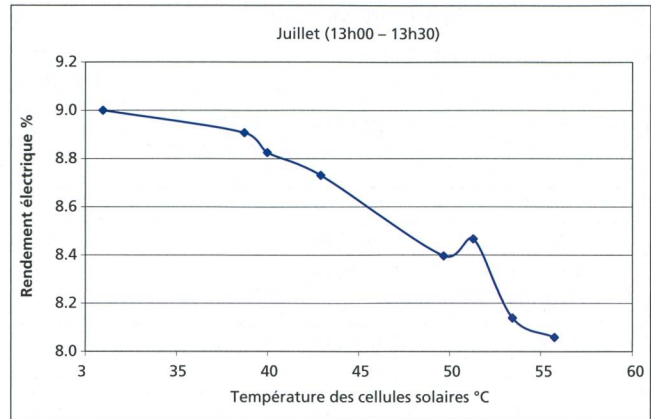


Fig. 7: Lorsque la température des cellules solaires augmente, le rendement électrique baisse en moyenne de 0,4 % par °C. Le plan de référence est ici la radiation solaire sur une toiture inclinée de 20° vers le Sud.

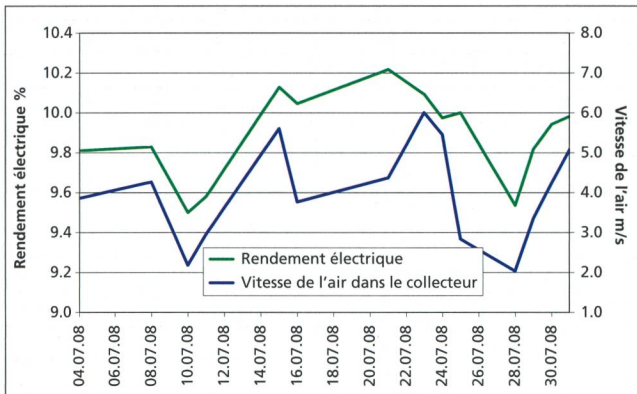


Fig. 8: Les résultats d'essai indiquent une relation évidente entre le rendement électrique et la vitesse de l'air dans le collecteur.

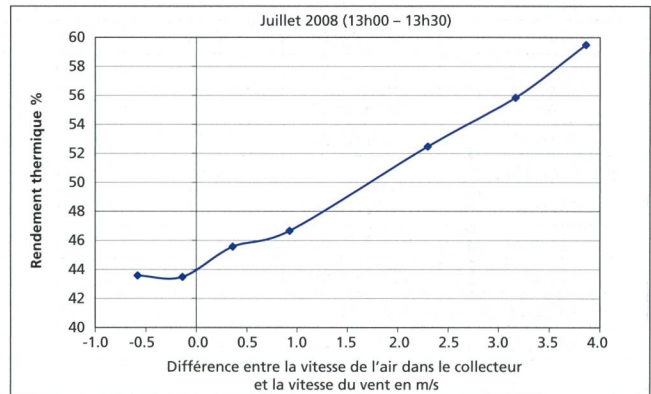


Fig. 9: Plus la vitesse de l'air dans le collecteur dépasse la vitesse du vent, plus le rendement thermique est élevé.

thermique est plus élevé, plus la vitesse de l'air dans le collecteur dépasse la vitesse du vent (fig. 9).

### Utilisation de la chaleur pour le séchage (séchage en grange)

Les jours ensoleillés, la ventilation des modules photovoltaïques permet de retirer jusqu'à quatre kilowatt de chaleur par mètre cube. Toutefois, la chaleur est disponible à une température relativement basse. Les possibilités d'utilisation sont donc limitées. La meilleure solution consiste à l'utiliser pour le séchage. L'augmentation de la température fait baisser l'humidité relative de l'air et fait augmenter sa capacité de rétention d'eau. Un exemple théorique (fig. 10) montre comment le réchauffement de l'air dans l'installation PV permet de diviser le temps de séchage du foin par deux par rapport à un séchage à froid. Le calcul se base sur les

données climatiques d'un jour ensoleillé du mois de juin. La longueur du collecteur est de 12 mètres, sa hauteur de 0,2 mètres et la vitesse de l'air de 3,8 m/s. Les températures de l'air à la sortie du collecteur ont été calculées à l'aide d'un modèle de simulation, établi sur la base des données mesurées. La rétention d'eau moyenne de l'air (g/kg d'air) entre 9h00 du matin et 21h00 a été déterminée d'une part, pour les températures extérieures (séchage sans installation PV) et d'autre part, pour les températures de l'air à la sortie de l'installation PV. Pour simplifier, on a admis qu'à la sortie du tas de foin, l'air affichait une humidité relative moyenne de 70 pour cent et que la teneur en eau de l'air extérieur était constante pendant la journée, à raison de 10,9 g/kg d'air. Avant le séchage, le foin présente une teneur en MS de 65 pour cent et de 87 pour cent après le séchage. La surface du tas de foin (155 m<sup>2</sup>) et la surface de l'installation photovoltaïque (300 m<sup>2</sup>) ont été adaptées l'une à l'autre par rapport aux débits d'air. Les calculs montrent que

dans le cas du séchage à froid, l'air absorbe en moyenne 1,11 grammes d'eau par kilogramme d'air en traversant le tas de foin. Dans le cas du séchage à air chaud, ce chiffre est de 2,19 grammes (fig. 11, tab. 2). Les calculs indiquent également que, du fait d'un temps de séchage plus court, l'économie d'énergie du ventilateur (-557 kWh) est nettement supérieure à la production supplémentaire d'électricité (38 kWh) obtenue par refroidissement des cellules solaires. Financièrement parlant, ce dernier point est néanmoins plus important si le courant solaire peut être revendu plus cher que ne coûte l'achat de courant.

### Refroidissement des cellules solaires en dehors du temps de séchage

#### Refroidissement naturel

Les cellules solaires doivent également être refroidies en dehors de la période de sé-

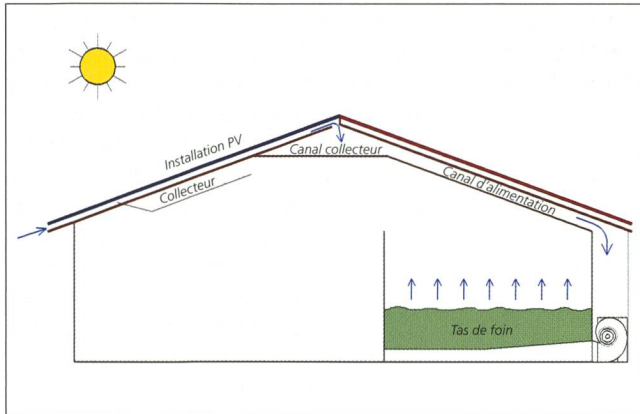


Fig. 10: L'air réchauffé par l'installation photovoltaïque est utilisé pour le séchage du foin (cf. tab. 2).

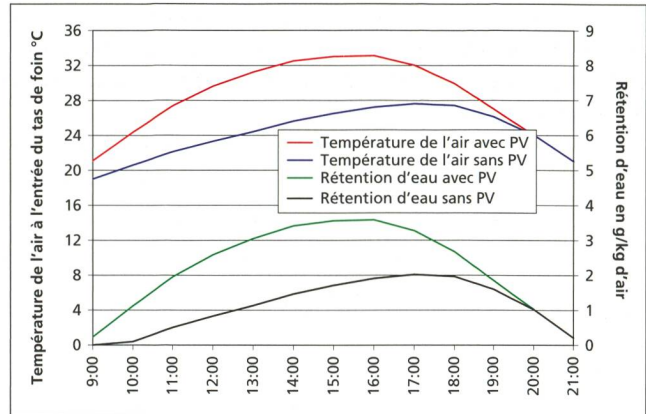


Fig. 11: Température à l'entrée du tas de foin et rétention d'eau de l'air avec préchauffage (avec PV) et sans préchauffage (sans PV) dans l'installation photovoltaïque (simulation pour l'installation selon le tab. 2).

chage du foin, si possible à l'aide d'un dispositif d'aération naturelle (gravité ou vent). Le plus simple pour l'aération naturelle est un toit à chevrons, lorsque l'air peut circuler librement avec un système de ventilation faîtière (fig. 12). Plus le toit est pentu, plus la distance entre les cellules solaires et la sous-toiture est importante, plus la résistance de l'air est faible et donc plus le flux d'air est important de même que le refroidissement.

Les modules solaires doivent être placés de façon à éviter le plus possible les étranglements (poutres, profils). La distance entre les cellules solaires et la sous-toiture est prévue en général pour une vitesse de l'air de 4 à 5 m/s pendant le séchage du foin. Suivant si l'air chaud est aspiré par le bas ou par le haut pendant le séchage du foin, il faut prévoir des volets dans la base du versant (sablière) ou dans le faîte, de manière à pouvoir les ouvrir lorsque le séchoir à foin ne fonctionne pas. Lorsque l'air est aspiré au centre entre le faîte et la base du versant, les volets ne sont pas nécessaires (fig. 12). Lorsque le canal collecteur est placé au centre, l'air est aspiré aussi bien par le faîte que par la base du versant. Par conséquent, la longueur des ouvertures d'aération double. Pour obtenir la même vitesse de l'air (4 à 5 m/s) lors de la ventilation du foin, il faut donc diviser par deux la distance entre les cellules solaires et la sous-toiture. Le fait d'avoir divisé par deux la hauteur du collecteur a pour conséquence de diminuer l'aération naturelle en dehors de la période de séchage du foin et donc de réduire le refroidissement et le rendement électrique. D'un autre côté, une solution sans volets est nettement meilleur marché.

On peut calculer la vitesse de l'air due à l'ascendance thermique dans le collecteur en fonction de la géométrie du toit et des

conditions climatiques. Elle se situe au croisement de la courbe de pression de l'air et de celle de résistance de l'air (fig. 13). Dans l'exemple, elle est d'environ 0,9 m/s pour une distance de 15 centimètres entre la sous-toiture et les cellules solaires. En ce qui concerne la température et la résistance de l'air, les calculs se basent sur les résultats de mesure de l'installation pilote d'ART. Le flux d'air entraîne une baisse de la température des cellules solaires de 11,6 degrés et une augmentation de la production de courant de 4,6 pour cent. Si l'on divise la distance entre les cellules solaires et la sous-toiture par deux (7,5 cm), la baisse de température des cellules solaires diminue pour atteindre 7,5 degrés. Par conséquent, la production supplémentaire de courant diminue elle aussi de trois pour cent.

### Refroidissement mécanique

Avec un toit à pannes, il n'est pas possible d'utiliser l'ascendance thermique. On dépend donc de l'influence du vent. Or, suivant son intensité et sa direction, le vent est plus ou moins efficace. Plus le collecteur est long, plus la résistance de l'air est importante et plus le débit d'air est faible.

Pour refroidir les cellules solaires, on peut éventuellement faire fonctionner le ventilateur en dehors de la période du séchage du foin. Comme l'air réchauffé ne doit pas être comprimé à travers le tas de foin, mais peut être envoyé directement à l'extérieur, la résistance de l'air diminue et atteint moins de 100 Pascal. Avec cette résistance de l'air relativement faible, il n'est pas utile d'utiliser de ventilateurs radiaux, qui sont conçus pour des pressions élevées. Il est

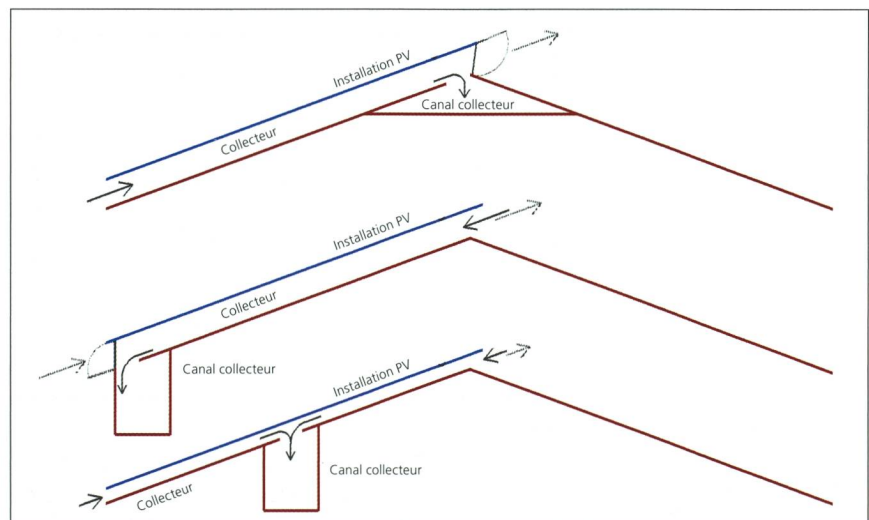


Fig. 12: Pour permettre un refroidissement minimal des cellules solaires en dehors de la période de séchage du foin, il est indispensable de prévoir une aération naturelle par ascendance thermique. Suivant la position du canal collecteur, il peut être nécessaire d'ouvrir des volets à cet effet.



**Tab. 2 : Calcul du temps et de la consommation d'énergie pour le séchage du foin durant une journée ensoleillée en juin, d'un côté sans préchauffage de l'air (sans PV) et de l'autre avec préchauffage de l'air (avec PV) dans l'installation photovoltaïque (PV).**

Longueur de l'installation PV	m	25	
Largeur de l'installation PV	m	12	
Hauteur du collecteur	m	0.2	
Vitesse de l'air dans le collecteur	m/s	3.8	
Section totale du collecteur (moins les chevrons)	m <sup>2</sup>	4.5	
Débit d'air dans le collecteur	m <sup>3</sup> /s	17.1	
Densité moyenne de l'air	kg/m <sup>3</sup>	1.11	
Surface du tas de foin	m <sup>2</sup>	155	
Débit d'air dans le tas de foin	m <sup>3</sup> /s m <sup>2</sup>	0.11	
Hauteur de couche par remplissage	m	1.5	
Quantité de foin en MS par remplissage	kg MS	18655	
Teneur en MS du foin avant le séchage	%	65	
Teneur en MS du foin après le séchage	%	87	
Evacuation d'eau nécessaire par kg de MS de foin	kg/kg de MS	0.39	
Evacuation d'eau nécessaire au total en kg	kg	7257	
		sans PV	avec PV
Evacuation d'eau moyenne	g/kg d'air	1.1	2.2
Evacuation d'eau moyenne	g/m <sup>3</sup> d'air	1.23	2.43
Evacuation d'eau totale	kg/h	76	150
Temps de séchage théorique	h	96	48
Résistance de l'air	Pa	450	525
Puissance absorbée par le ventilateur (h=0.60)	kW	12.8	13.8
Energie consommée par le ventilateur	kWh	1227	670
Energie économisée avec le ventilateur	kWh		-557
Production supplémentaire de courant pendant le séchage*	kWh		38
<b>Gain total d'énergie</b>	kWh		<b>595</b>

\* Production moyenne de courant 65W/m<sup>2</sup>, baisse de la température des cellules solaires: 10 °C

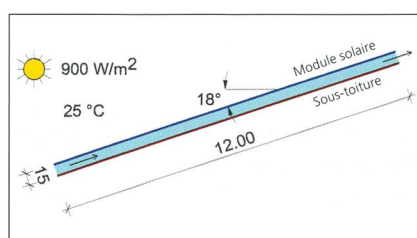
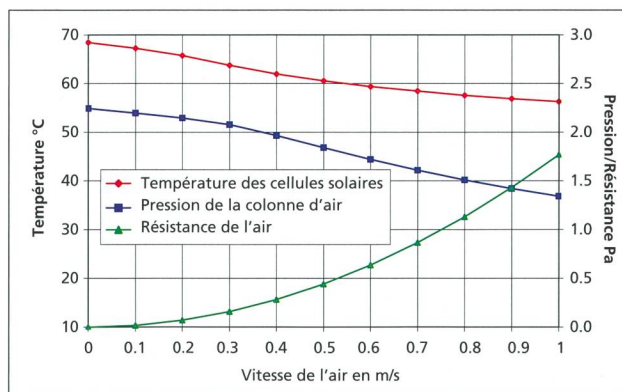


Fig. 13: Avec un toit à chevrons sous l'effet de l'ascendance thermique, la vitesse de l'air liée se situe au point où la courbe de résistance de l'air et celle de la pression de la colonne d'air se croisent (0,9 m/s). La baisse de température des cellules solaires est de 11,6 °C à 0,9 m/s.

recommandé d'employer des ventilateurs axiaux (ventilateurs d'étable) qui peuvent déplacer de grosses quantités d'air avec une faible résistance en consommant un minimum d'énergie. Un refroidissement mécanique des cellules solaires ne vaut la peine d'un point de vue énergétique que si l'énergie consommée par les ventilateurs est inférieure à la production supplémentaire de courant obtenue grâce au refroidissement des cellules solaires. Les calculs montrent que même avec des ventilateurs qui consomment peu d'énergie, il n'est pas utile de produire des vitesses de l'air supérieures à 2 m/s dans le collecteur. Dans l'exemple (fig. 14), la différence entre la puissance supplémentaire des cellules solaires et la puissance consommée par les ventilateurs atteint son niveau maximal (2,01 – 0,55 = 1,45 kW) à 1,9 m/s. Elle devient négative à partir de 4,6 m/s.

Avec une vitesse de l'air de 0,9 m/s, qui peut être obtenue sans ventilateur à l'aide d'un dispositif d'aération par gravité, la puissance supplémentaire des cellules solaires est de 1,35 kilowatt (fig. 13). Elle est donc aussi élevée que le gain de puissance net avec ventilation mécanique. Sachant qu'il faut également tenir compte des investissements pour le ventilateur, le refroidissement mécanique des cellules solaires ne vaut la peine que lorsqu'il n'est pas possible de parvenir à une aération naturelle suffisante.

Lorsqu'on a recours à des ventilateurs, il est recommandé de choisir des modèles dont la puissance absorbée spécifique est réduite (< 20 W/1000 m<sup>3</sup>/h). Les ventilateurs usuels dans les étables affichent une vitesse de sortie de 10 m/s à un régime de 100 pour cent, ce qui correspond à une pression dynamique de 55 Pascal. D'un autre côté, la résistance totale de l'air dans le collecteur et le canal collecteur n'est que de 10 à 20 Pascal pour une vitesse de l'air de 2 m/s. Cela signifie que le ventilateur a besoin d'environ 75 à 85 pour cent de sa puissance pour pulser l'air vers la sortie. Il est possible de réduire la vitesse de sortie et par conséquent la pression dynamique en choisissant un ventilateur plus gros et en le faisant tourner à faible régime. La baisse du régime doit cependant être énergétiquement rentable (pas de système de réglage par hachage de phase à l'aide de triacs/thyristors), car sinon les pertes inhérentes au réglage du régime annuleraient le gain d'efficacité.



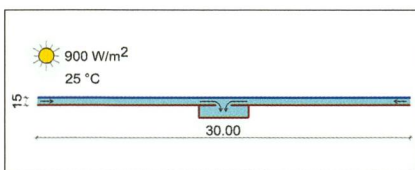
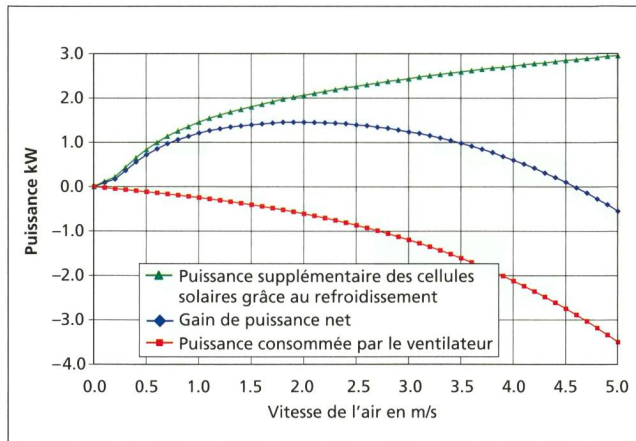


Fig. 14: Avec un toit à pannes et un refroidissement mécanique des cellules solaires, le gain net de puissance atteint son niveau maximal avec une vitesse de l'air de 1,9 m/s.

## Conclusions

Avec les installations intégrées à la toiture, il est possible d'augmenter le rendement énergétique des cellules solaires en exploitant une partie de l'énergie solaire absorbée sous forme de chaleur pour le séchage. Parallèlement à l'exploitation de la chaleur, le rendement électrique des cellules solaires s'améliore sous l'effet du refroidissement. Les résultats des mesures effectuées dans une installation d'essai d'ART montrent que l'on peut tirer quatre à cinq fois plus de chaleur que d'électricité des cellules solaires. En phase de pré-essai, les modules solaires étaient soumis à l'influence du vent, aussi bien par dessus haut que par dessous. Leur température dépassait alors la température ambiante. La différence pouvait aller jusqu'à 27 degrés. Dans les essais qui ont suivi, pendant lesquels un flux d'air a été créé entre les modules solaires et la sous-toiture, la différence entre la température ambiante et la température des cellules solaires a pu être limitée à 20 degrés pour un ensoleillement sensiblement équivalent. Une baisse de la température des cellules solaires d'un degré se traduit par une augmentation de la production de courant de 0,4 pour cent.

Les jours ensoleillés, la ventilation active permet de tirer des modules photovoltaïques jusqu'à quatre kilowattheure de chaleur par mètre carré. La chaleur peut être utilisée pour le séchage, de foin ou de plaquettes de bois par exemple. La température plus élevée fait baisser l'humidité relative de l'air

et augmente la capacité de rétention d'eau, ce qui réduit considérablement le temps de séchage et la consommation d'énergie du ventilateur. De plus, l'installation produit davantage de courant. Plus le rapport entre la vitesse de l'air dans le collecteur et la vitesse du vent est élevé, plus on peut exploiter de chaleur. Sachant toutefois que la consommation d'énergie du ventilateur dépend du carré de la vitesse de l'air dans le canal collecteur, il est conseillé de limiter cette dernière à 5 m/s.

Pour que les cellules solaires ne surchauffent pas lorsque la chaleur n'est pas utilisée et que le ventilateur est arrêté, elles devraient si possible être refroidies par un flux d'air naturel. L'aération naturelle la plus simple est celle qui utilise l'ascendance thermique avec un toit à chevrons. Lorsque la ventilation naturelle est insuffisante, il peut être utile de prévoir une ventilation mécanique, même si l'air n'est pas utilisé pour

le séchage. La seule condition étant que le ventilateur consomme moins d'énergie que les cellules solaires n'en produisent en plus grâce au refroidissement. Par conséquent, la puissance absorbée spécifique du ventilateur doit être réduite.

Les installations photovoltaïques nécessitent d'importants investissements. C'est pourquoi il est capital de bien calculer chaque installation. Les résultats de mesure confirment que les installations intégrées à la toiture n'ont en aucun cas un rendement électrique inférieur aux installations placées sur la toiture, dans la mesure où la ventilation naturelle ou mécanique est suffisante grâce à un collecteur bien conçu. Au contraire, la puissance des installations intégrées à la toiture est même supérieure à plusieurs installations placées sur la toiture qui ne peuvent pas être suffisamment refroidies, car la distance entre le toit et les modules solaires est trop faible.

## Bibliographie

- Gazzarin C., Zumbühl T. et Toggweiler P., 2008. Installations photovoltaïques dans les exploitations agricoles. Rapport ART 694, 12 p.
- Käppeli E., 1983. Strömungslehre und Strömungsmaschinen, p. 106–118
- Kuttler W., 2009. Klimatologie. ISBN 978-3-506-76576-5, p. 59–78.
- Nydegger F., 1991. Capteurs solaires pour le séchage en grange – Planification et réalisation. Rapport FAT 407 (aujourd'hui rapports ART), 20 p.
- Recknagel H., Sprenger E. et Shramek R., 2001. Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik p. 1209–1245.
- Sagelsdorff R. et Frank T., 1993. Wärmeschutz und Energie im Hochbau. Element 29, Schweizerische Ziegelindustrie, Zürich.
- Simons W.J., 1979. Warmte overdracht, p. 155–194.

## Impressum

Edition: Station de recherche Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen

Les Rapports ART paraissent environ 20 fois par an. – Abonnement annuel: Fr. 60.–. Commandes d'abonnements et de numéros particuliers: ART, Bibliothèque, Tänikon, CH-8356 Ettenhausen, Tél. 052 368 31 31, Fax 052 365 11 90, E-mail: doku@art.admin.ch, Internet: <http://www.art.admin.ch>

Les Rapports ART sont également disponibles en allemand (ART-Berichte). ISSN 1661-7576.

Les Rapports ART sont accessibles en version intégrale sur notre site Internet ([www.art.admin.ch](http://www.art.admin.ch)).