

**Zeitschrift:** Technique agricole Suisse  
**Herausgeber:** Technique agricole Suisse  
**Band:** 73 (2011)  
**Heft:** 10  
  
**Rubrik:** Passion

### **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>**



Installation photovoltaïque de démonstration du «landwirtschaftlichen Lehranstalten für Oberfranken» de Bayreuth. Les différents types de modules se distinguent les uns des autres, et, à gauche de la photo, l'indicateur digital permet de lire les performances momentanées et cumulées.

Photo : Ueli Zweifel

# Le photovoltaïque, captivant

L'énergie solaire et son utilisation sont synonymes de production d'énergie favorable à l'environnement. En plus de l'image positive liée à l'utilisation de l'énergie solaire, le photovoltaïque exerce une fascination technique particulière. La transformation de l'énergie solaire (photons) en électricité est un phénomène purement électronique. Aucune étape intermédiaire mécanique, thermique ou chimique n'est nécessaire. Cela rend la production photovoltaïque d'autant plus populaire.

**Ruedi Hunger**

En mois de septembre 2011, 2269 installations photovoltaïques étaient en fonction, avec une production projetée de 34 078 537 kWh. A cette date, ce ne sont pas moins de 16 149 projets qui sont inscrits sur la liste d'attente RPC\*\*. Parmi

eux, 985 installations avec une puissance électrique de 30 703 kW et une production projetée de 29 482 618 kW sont annoncées dans le domaine du photovoltaïque, et 10 547 postulants se trouvent sur la liste d'attente. Actuellement,

18 installations photovoltaïques, avec une production projetée de 2 563 652 kW, sont en phase de projet.  
(\*\* RPC = rétribution à prix coûtant du courant injecté)



## Construction du module solaire

Les modules standard de la catégorie de puissance entre 50 et 200 watts, tels qu'ils sont montés en série et utilisés pour les installations photovoltaïques, mesurent entre 0,5 et 2 m<sup>2</sup>. Un module standard se compose de plusieurs cellules solaires montées en série et de diodes bypass. Ces diodes bypass servent à la protection de 12 à 24 cellules solaires contre les températures excessives (effet hotspot).

La couche inférieure est constituée d'un film Tedlar. Ce film multicouche évite la pénétration de l'oxygène et empêche ainsi l'oxydation prématurée des cellules. La cellule solaire elle-même se trouve sur ce film Tedlar, encapsulée entre deux films composés d'éthylène-acétate de vinyle (EVA). Sur le film EVA supérieur se trouve un verre solaire conçu tout spécialement, ainsi que le cadre aluminium de finition. Ce type de module solaire convient aux toits plats et en pente.

Un autre mode de faire est illustré par la technique verre-verre-résine: la couche inférieure est constituée d'un verre plat (float glass). Ensuite, la cellule solaire est engoncée entre deux couches de résine composite. La couche supérieure est également formée d'un verre solaire avec un cadre aluminium de finition. Le module solaire terminé est d'une épaisseur d'environ 4 à 5 mm. Les modules verre-résine peuvent se monter comme revêtement de façades, mais aussi servir d'abri de protection contre le soleil ou de toiture.

Le silicium (Si) constitue le matériau de base de nombreuses cellules solaires. Il est très largement répandu sur terre et sans incidences écologiques. Par ailleurs,

## Rayonnement solaire inépuisable



**La construction d'un nouveau bâtiment permet de choisir l'emplacement et l'inclinaison optimaux de la toiture.** Photo: Ruedi Hunger

Le soleil produit un rayonnement, hors de l'atmosphère terrestre, de 1,367 kW/m<sup>2</sup>. Sur la surface de la terre, une telle valeur n'est cependant pas atteinte:

- 31 % de l'énergie est réfléchi par l'enveloppe atmosphérique.
- 17 % sont absorbés par l'atmosphère.
- 4,2 % sont réfléchis par la surface de la terre.
- 33 % des rayons solaires atteignent l'eau.
- **14 % de l'énergie solaire arrive sur les continents.**

En additionnant la valeur du rayonnement solaire en un endroit sur une année, on obtient le rayonnement global moyen en kW/m<sup>2</sup>. Celui-ci se situe en Europe centrale entre 900 et 1200 kWh/m<sup>2</sup> par an. En Suisse, cette valeur s'élève entre 1050 et 1700 kWh/m<sup>2</sup>\*. L'on peut donc en conclure que le rayonnement global diminue du nord au sud. Les régions les plus ensoleillées sont par exemple l'Amérique centrale, le désert du Sahara, l'Afrique du Sud, l'Arabie saoudite et l'Australie du Nord. Pour l'utilisation des rayons solaires avec le photovoltaïque, la longueur d'onde joue également un rôle. Le spectre se situe entre 240 et 1700 nm (nanomètre = 10<sup>-6</sup> mm), la lumière solaire visible entre 400 et 800 nm. La cellule solaire utilise également une partie des rayons ultraviolets et infrarouges. Cette source d'énergie n'est pas visible par l'œil humain.

\*(source: Meteonorm 1983-1992 !).

le silicium est l'un des matériaux semi-conducteurs les plus utilisés.

L'un des problèmes de base du photovoltaïque réside dans les différences de rayonnement solaire dans le temps en raison de l'alternance jour-nuit, du soleil et de la pluie, de l'été et de l'hiver. Les installations photovoltaïques n'utilisent pas seulement le rayonnement solaire direct, mais transforment également la lumière diffuse en énergie. Certaines mesures, réalisées sur le Plateau suisse,

démontrent que le rayonnement diffus correspond à quelque 50 % de l'ensemble du rayonnement.

Lorsque les températures augmentent fortement dans les modules (jusqu'à 85°C), l'efficacité énergétique diminue. Cela signifie que l'énergie lumineuse peine à se transformer en énergie électrique. Un contrôle de diverses installations, fait par la Haute école FHS Triesdorf et l'Ecole spécialisée en machines agricoles LMS Triesdorf (D), montre que des

**Tableau 1: types de modules et caractéristiques**

Enquête et récapitulatif réalisés par des étudiants du Centre de formation Triesdorf Bavière (D)

Type de module	Monocristallin	Multicristallin	BP-Saturn	Sanyo-HIP	Couches ultrafines
Propriétés	Module classique avec degré d'efficacité élevé	Construction simple, en général meilleur marché que module monocristallin	Surface pyramidale assurant une excellente absorption de la lumière	Degré d'efficacité élevé aussi par température élevée	Construction simple, besoins de surface important
Réactions aux changements de température	Echauffement lent en hiver	Echauffement rapide, refroidissement lent	Sensible aux changements de température en raison de leur structure superficielle	Réaction modérée aux changements de température	
Réactions aux rayonnements diffus et température équilibrée	Moins capables de transformer les rayonnements diffus en électricité que les Sanyo-HIP ou les cellules à couches ultrafines a-Si		Valorisation meilleure que la moyenne	Capable de transformer la lumière diffuse en électricité mieux que les cellules cristallines	
Coût d'investissement par kWp (peak)	Moyen	Moyen	Elevé	Elevé	Faible
Degré d'efficacité	Jusqu'à 16,8 %	Jusqu'à 14,2 %	Jusqu'à 14,7 %	Jusqu'à 16,8 %	Jusqu'à 7,4 %



installations plus ou moins horizontales sont aussi capables d'excellents résultats. Les installations avec une pente de 15° ont de meilleurs résultats en été que les installations plus pentues. En revanche, les rayons lumineux plus plats de l'ensoleillement hivernal sont mieux captés par des cellules placées à 30°. D'une manière générale, les installations plus plates ont un rendement de 2 à 5 % inférieur, ce qui n'est pas déterminant. Les modules solaires sont salis par la poussière et différentes sources. En général, le nettoyage naturel par la pluie et la neige suffit. En présence de saleté tenace, les performances peuvent être réduites jusqu'à 2 %. Dans certains cas, un nettoyage s'impose cependant, et il faut prendre les mesures adéquates.

### Onduleur

Les onduleurs servent à transformer le courant continu produit par l'installation solaire en courant alternatif, puis à l'injecter dans le réseau. En présence de brouillard ou de nuages, lorsque toutes les capacités de l'onduleur ne sont pas indispensables, l'efficacité de l'appareil diminue. Avec un onduleur central, dont une partie des éléments peuvent être enclenchés ou déclenchés au besoin, cet inconvénient disparaît.

Les câbles solaires placés dans les exploitations agricoles risquent d'être endommagés par des fouines. Aujourd'hui, des câbles protégés contre les morsures sont disponibles sur le marché. Ils sont de plus résistants aux atteintes de l'ozone et des rayons-UV.

### Investissements et prix de revient

La mise en place d'une installation solaire implique des frais conséquents. Le graphique 1 montre la répartition des coûts. Ces importants investissements ne se justifient que si le rendement énergétique est assuré par un degré d'efficacité élevé. Le prix de revient de la production d'électricité solaire dépend du type d'installa-

### Notions et définitions

- **Tellurure de Cadmium CdTe**

Le tellurure de Cadmium est utilisé pour la production de cellules ultrafines. Le CdTe est très stable et ne subit pas de dégradation (comme par exemple les cellules Si amorphes). En laboratoire, un taux d'efficacité de plus de 16,5 % a déjà été relevé avec des cellules CdTe.

- **Silicium cristallin**

Silicium figé en forme de cristaux (atome dans un réseau cristallin).

- **Silicium monocristallin**

Silicium figé dans un très gros cristal (production très exigeante énergétiquement).

- **Silicium multicristallin**

Silicium sous forme de nombreux cristaux de constitutions diverses.

- **Silicium amorphe**

Silicium dont les atomes ne sont pas réunis sous forme cristalline.

- **Wafer**

Tranches fines coupées à la scie dans un lingot (barre de silicium). Inconvénient : la « sciure » est considérée comme perte.

- **Cellule solaire**

Diode semi conductrice avec couche de grande surface exposée à la lumière et produisant directement de l'énergie électrique sous l'effet des rayons solaires.

- **Module solaire**

Rassemblement galvanique de plusieurs cellules solaires, la plupart du temps branchée en série.

- **Panneau solaire**

Rassemblement mécanique de plusieurs modules solaires (un panneau solaire n'est pas un module solaire).

- **Générateur solaire**

Rassemblement de plusieurs panneaux ou modules solaires.

- **Installation solaire**

Rassemblement de plusieurs générateurs solaires qui constituent ensemble une installation photovoltaïque.

- **Installation photovoltaïque IPV**

Ensemble des composants permettant la transformation immédiate de l'énergie solaire en énergie électrique.

- **IPV indépendante du réseau**

Installation de production d'électricité non reliée au réseau.

- **IPV reliée au réseau**

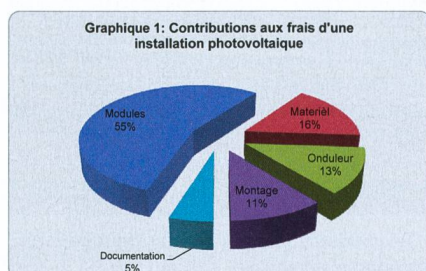
Installation de production d'électricité reliée au réseau.

- **Puissance maximale Pmax**

Puissance de sortie maximale d'une cellule solaire à un degré de rayonnement et une température de cellule solaire donnés. Unité : 1 watt = 1 Wp (Watt Peak)

- **Rendement énergétique annuel**

Les installations solaires sont construites dans des dimensions diverses. Afin d'obtenir une base de comparaison adéquate, la puissance maximale du générateur solaire est donnée en fonction du rendement énergétique annuel kWh/pa (a = par an).



tion, de l'endroit et de l'ensoleillement offert, ainsi que de la disposition de l'installation en place.

Dans le rapport ART 694 (2007), un prix de revient entre CHF 0.50 et 0.80 par kilowattheure (kWh) est évoqué. De nouveaux calculs datant de 2009 (photovoltaïque; HÄBERLIN) mentionnent CHF 0.40 à 0.90/kWh pour les installations reliées au réseau, alors que le prix de revient des installations isolées s'élève de CHF 1.30 à 2.30/kWh. L'on peut compter avec une durée de vie de 15 à 30 ans pour les installations reliées au réseau, à l'exception de l'onduleur et du régula-

teur de charge. En revanche, la durée de vie limitée des accumulateurs (2 à 10 ans) renchérit le prix de revient du courant des installations isolées.

Comme le montre le graphique 1, les coûts du module solaire ne constituent que quelque 55 % des coûts totaux. Cependant, l'on parle surtout du coût du module solaire. Celui-ci a diminué ces dernières années. Pour de commandes importantes, les prix de vente par watt de puissance de pointe (Wp) sont les suivants :

- module solaire en silicium cristallin : 2.40 à 4.80 CHF/Wp



Tableau 2: facteurs déterminant le rendement potentiel en courant solaire (rapport ART 694/2008)

Rendement en énergie solaire	Energie électrique produite
R: Rayonnement	Energie solaire issue du rayonnement, resp. lumière, dépend notamment de l'endroit, des conditions météorologiques, de l'orientation de la surface et de l'ombrage.
FO: Facteur d'orientation	Valeur indiquant l'écart par rapport à l'orientation optimale.
TR: Taux de rendement du module %	Capacité de conversion du module. Taux de rendement = Puissance électrique / rayonnement.
PS: Pertes liées au système %	Pertes dues en premier lieu à l'influence de la température et au taux de rendement de l'onduleur, aux câbles et à la réflexion des rayons solaires
D: Dégradation %	Diminution du taux de rendement des modules, dû au vieillissement
Influence de la température	Plus la température des cellules augmente, plus la puissance diminue; un montage avec aération diminue le réchauffement.
Taux de rendement de l'onduleur et pertes liées aux câbles	Capacité de conversion de l'onduleur du courant continu en courant alternatif conforme au réseau, résistance des câbles
Réflexion	Pertes par réflexion des rayons au niveau du module.

- module à couches ultrafines en CdTe: 2.25 à 4.50 CHF/Wp
- module à couches ultrafines en Si amorphe: 2.25 à 4.50 CHF/Wp

Les coûts effectifs pour cellules solaires cristallines se situent aujourd’hui déjà entre CHF 1.50 et 2.85/Wp, les coûts de production ne s’élevant qu’à quelque CHF 0.95/Wp (selon HÄBERLIN). Les modules avec cadre ne sont que très peu plus onéreux que ceux qui en sont dépourvus. Les cellules à couches ultrafines sont meilleur marché que les produits en silicium cristallin. Il faut cependant faire attention lorsque les prix des cellules sont très bas et qu’une surface plus importante, avec le câblage supplémen-

taire que cela implique, est imposée par un moins bon rendement. Le degré d’efficacité des cellules en silicium amorphe baisse de 10 à 30 % les premiers mois d’exploitation, en raison d’une dégradation de départ. Il faut considérer cela lors de la planification de l’installation.

Modèle de calcul de rentabilité

La toiture d’une ferme moyenne suisse construite dans les années 1980 a une surface d’environ 250 à 280 m². Sur cette base, les auteurs du rapport ART 694 (Gazzarin, Zumbühl, Toggweiler) ont procédé à des calculs de rentabilité pour des surfaces de 70, 280 et 800 m².

Tableau 3: hypothèses techniques, bases du calcul de rentabilité (rapport ART 694/2008)

Type de module	Cellules solaires au silicium monocristallin	Cellules solaires au silicium amorphes en couches ultrafines
Taux de rendement du module	13,5 %	8 %
Surface nécessaire	7,4 m²/kWp	12,5 m²/kWp
Durée d’utilisation réaliste	30 ans	20 ans
Dégradation annuelle	−0.6 %	considéré
Dégradation moyenne (après 12-15 ans)	−7.5 %	considéré
Pertes de rendement pour une installation intégrée à la toiture	3 %	0 %
Taux de rendement de l'onduleur	>90 %	>90 %
Durée d’utilisation de l'onduleur	10 à 15 ans	10 à 15 ans
Part de l'onduleur dans l'investissement global	10 %	10 %
Pertes liées au système	23 %	20 %

Des cellules cristallines avec un taux de rendement du module de 13,5 %, une puissance de l’installation de 9 kWp (70 m²), resp. 38 kWp (280 m²) et 108kWp (800 m²) ont été prises en compte. Le tableau 4 indique les investissements nécessaires pour une installation prête à fonctionner (le détail des calculs avec tous les facteurs déterminants se trouve dans le rapport ART 694).

Les mesures de promotion sont révisées

Le revenu de la vente du courant se calcule en fonction de la quantité de courant vendue (kW), multiplié par le prix du courant par kWh. Le prix du courant par kWh



Les cellules solaires utilisent non seulement la lumière visible, mais également une partie des rayons solaires ultraviolets et infrarouges.



Grâce à une bonne aération, les modules solaires ne chauffent pas trop, et un taux de rendement convenable est assuré.



**Tableau 4: investissements (modélisé) région du Plateau sans brouillard, Jura, Préalpes**

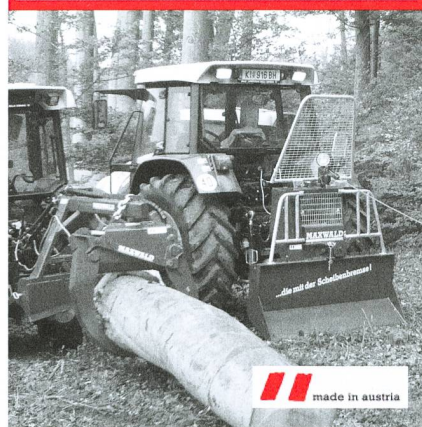
Installation	Cellules solaires au silicium monocristallin			Cellules solaires au silicium amorphe en couches ultrafines		
	Rendement (kW/an)	Investissements** (CHF/kWp)	Investissements** Total CHF	Rendement (kW/an)	Investissements** (CHF/kWp)	Investissements** Total CHF
Sur toiture 70 m <sup>2</sup>	8 740	8 900	84 105	5 820	8 277	46 351
Intégré 70 m <sup>2</sup>	8 470	10 947	103 449	5 820	10 181	57 012
Sur toiture 280 m <sup>2</sup>	34 950	7 804	294 982	23 260	7 257	162 568
Intégré 280 m <sup>2</sup>	33 900	9 111	344 410	23 260	8 474	189 808
Sur toiture 800 m <sup>2</sup>	99 850	7 378	796 839	66 460	6 862	439 147
Intégré 800 m <sup>2</sup>	96 850	8 265	892 603	66 460	7 686	491 923

\*En 2007, la technologie des couches ultrafines pour les cellules solaires était 7% meilleur marché.

\*\*Une diminution des coûts peut être obtenue avec les grandes installations, en raison des rabais pour grandes quantités.

se détermine selon la rétribution d'injection (voir ci-dessous). Hormis la rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC), différentes mesures incitatives ont été proposées dans le passé par les pouvoirs publics. Ces mesures fédérales, cantonales et communales ont été révisées dès août 2011 ([www.swissolar.ch](http://www.swissolar.ch)). D'une part, les aides financières, dont les montants divergeaient fortement, sont supprimées, et, d'autre part, après la rétribution à prix coûtant du courant injecté, les contributions cantonales et communales sont devenues extrêmement rares.

**MAXWALD**  
www.seilwinden.at



### On cherche distributeurs!

Ca vous intéresse? Contactez-nous:

**MAXWALD Maschinen GmbH**

A-4694 Ohlsdorf

T: 0043 7612 472190

E: [office@maxwald.at](mailto:office@maxwald.at)

### Recyclage du solaire et énergie grise

Les modules solaires ont aujourd'hui une espérance de vie de 20 ans et plus. Les cellules solaires et les modules dans leur ensemble sont largement recyclables. Grâce à un processus particulier, des combinaisons chimiques spécifiques sont obtenues, puis, par le biais de différentes étapes de nettoyage, du silicium de haute valeur est libéré.

Sous la désignation d'énergie grise, l'on entend l'énergie globale nécessaire à la fabrication d'un produit. Une importante quantité d'électricité s'avère nécessaire pour la construction de cellules solaires. La fabrication des composants électroniques (onduleur), de la structure et des câbles demande également beaucoup d'énergie. L'utilisation d'énergie renouvelable n'est défendable sur le plan écologique qu'à condition que la fabrication des composants nécessaires à la production d'énergie n'en demande pas davantage que l'installation sera ensuite capable d'en produire tout au long de son fonctionnement.

### Les erreurs de planification entraînent des diminutions de rendement

Bien que le photovoltaïque constitue une technique arrivée à maturité, les installations divergent dans leur efficacité. Déjà lors de la planification ou de la mise en place, des erreurs surviennent et exercent un effet négatif sur l'efficacité de l'installation. Une orientation ou une pente inopportune peuvent conduire à des

pertes de rendement de 10 à 20%. Lorsque l'installation se trouve soumise à l'ombre projetée par des objets pendant toute l'année, l'on peut compter avec une perte de 3 à 10%. Si cela se passe uniquement en hiver, la perte se réduit jusqu'à 1 à 3%. Un onduleur mal dimensionné ou placé au mauvais endroit réduit l'efficacité de 1 à 3%. La qualité des composants, en particulier les performances de l'onduleur, peut influencer les performances de l'installation jusqu'à 60%. Si un onduleur manque ou que les modules sont recouverts de saleté, d'importantes pertes de rendement se produisent. ■

### Taux de rétribution à prix coûtant du courant injecté (RPC) valable pour les demandes dès le 1.01.2011 (8 % TVA inclus)

Catégorie d'installation Classe de puissance	Taux de rétribution (ct./kWh) 2010	Taux de rétribution (ct./kWh) 2011
Indépendant		
≤10 kW	53.3	42.7
≤30 kW	44.3	39.3
≤100 kW	41.8	34.3
≤1000 kW	40.2	30.5
>1000 kW		28.9*
Sur toiture		
≤10 kW	61.5	48.3
≤30 kW	53.3	46.7
≤100 kW	50.8	42.2
≤1000 kW	49.2	37.8
>1000 kW		36.1*
Intégré à la toiture		
≤10 kW	73.8	59.2
≤30 kW	60.7	54.2
≤100 kW	54.9	45.9
≤1000 kW	50.8	41.5
>1000 kW		39.1*

\*Le taux pour les installations de ≤1000 kW n'est pas encore applicable en 2011.

Source: Office fédéral de l'énergie/swissolar