



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Office fédéral de l'énergie OFEN

Avril 2008

Programme photovoltaïque édition 2008

Rapport de synthèse 2007

élaboré par:
NET Nowak Energie & Technologie SA





Photo de couverture:

Immeuble administratif de l'entreprise Marché International, à Kempthal/ZH

En moyenne annuelle, cet immeuble couvre lui-même intégralement ses besoins énergétiques, grâce à une installation photovoltaïque de 44.6 kW_c, équipée de cellules solaires en couches minces

Sources:

Première page de couverture: SunTechnics Fabrisolar;

Dernière page: Büro für Architektur Beat Kämpfen, Photo Willi Kracher

élaboré par:

NET Nowak Energie & Technologie SA

Waldweg 8, CH - 1717 St. Ursen (Suisse)

Tél. +41 (0) 26 494 00 30, Fax. +41 (0) 26 494 00 34, info@netenergy.ch www.netenergy.ch

sur mandat de:

Office fédéral de l'énergie OFEN

Mühlestrasse 4, CH - 3063 Ittigen Adresse postale: CH- 3003 Bern

Tél. 031 322 56 11, Fax. 031 323 25 00 office@bfe.admin.ch www.bfe.admin.ch

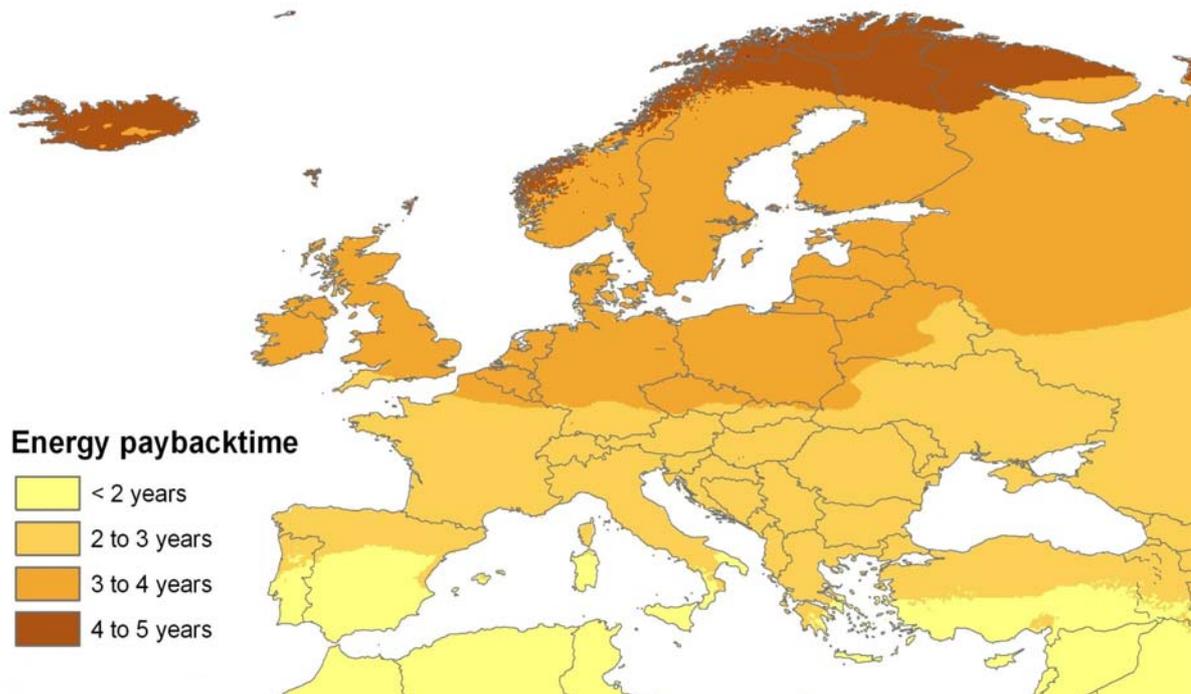


PROGRAMME PHOTOVOLTAÏQUE

Rapport de synthèse du programme de recherche 2007

Stefan Nowak

stefan.nowak@netenergy.ch



Une question souvent posée : la durée d'amortissement énergétique du photovoltaïque

Dans le cadre de la mise à jour des données du photovoltaïque dans la base de données Ecoinvent, *ESU Services* a déterminé la durée d'amortissement énergétique du photovoltaïque sur la base de produits et de procédés industriels actuels. La carte de l'Europe ci-dessus présente cette durée calculée pour une installation de 3 kW_c à cellules polycristallines en toiture à pans inclinés, l'électricité nécessaire à sa fabrication étant produite selon la palette UCTE. (Source: *ESU Services*).

Sommaire

1.	Aperçu du programme et objectifs fixés.....	4
2.	Travaux réalisés et résultats obtenus en 2007.....	5
	Technologie des cellules	5
	Modules solaires et intégration au bâtiment.....	9
	Technique des systèmes électriques	9
	Etudes et projets complémentaires	11
	Coopération internationale AIE, CEI, UE	13
3.	Coopération nationale.....	15
4.	Coopération internationale.....	15
5.	Projets pilotes et de démonstration (P+D).....	16
	Nouveaux projets P+D	16
	Projets P+D en cours	16
	Projets P+D achevés en 2007.....	18
6.	Evaluation 2007 et perspectives 2008.....	18
7.	Liste des projets de recherche	19
8.	Liste des Projets P+D.....	21
9.	Bibliographie.....	22
10.	Informations complémentaires	22
11.	Abréviations utilisées et sites Internet.....	23
12.	Sites Internet complémentaires	24

1. Aperçu du programme et objectifs fixés

En Suisse, comme dans le monde entier, le photovoltaïque a continué à se développer en 2007. Le Programme photovoltaïque en a ressenti nettement les effets: les entreprises industrielles sont de plus en plus nombreuses à s'intéresser au photovoltaïque, à formuler des idées et des concepts et à mettre sur pied des projets. Depuis que le parlement a décidé, au début de l'année sous revue, d'introduire la rétribution à prix coûtant du courant produit à partir de sources d'énergie renouvelables, les questions en rapport avec les applications ont aussi pris de l'importance. Les recherches, grâce à la large assise dont dispose le programme, ont pu être poursuivies au même niveau que jusqu'ici. L'industrie du photovoltaïque, qui continue manifestement à se développer en Suisse, le doit notamment à l'expansion continue et rapide du marché international.

Le Programme photovoltaïque poursuit une stratégie délibérément orientée vers la mise en œuvre industrielle et la compétitivité internationale, tant en ce qui concerne les produits que la recherche qui les précède. Pendant l'année 2007, il comptait environ 55 projets: des projets de recherche et de développement ainsi que les derniers projets P+D encore en cours. Ce nombre comprend tous les projets connus bénéficiant du soutien des pouvoirs publics.

En accord avec le Plan directeur de la recherche énergétique [61] de la Commission fédérale pour la recherche énergétique (CORE), les principaux objectifs du Programme photovoltaïque suisse pour la période 2004-2007 sont les suivants [62]:

- Nouvelle réduction du coût (\neq prix) du système énergétique „Photovoltaïque” (valeurs typiques pour 2007: 2.50 CHF/W_c pour les modules et 5 CHF/W_c pour les installations complètes); améliorations correspondantes des différents composants en ce qui concerne leurs caractéristiques électriques (2007: modules „couches minces” de rendement >12%), leur prix de revient et la fabrication industrielle.
- Etablissement et consolidation de la base industrielle des produits photovoltaïques, cellules et modules solaires compris, pour un certain nombre de filières technologiques.
- Standardisation et intégration poussée des produits et systèmes destinés aux marchés de masse.

Le Programme photovoltaïque englobe les cinq domaines suivants:

LES CELLULES DE L'AVENIR

Pendant l'année sous revue, les travaux consacrés aux **cellules solaires en couches minces** ont eu comme jusqu'ici pour objet essentiellement les cellules au **silicium** (amorphe ou microcristallin), celles à base de **semi-conducteurs composés** (CIGS) et celles à **colorant**. Globalement, de **nouveaux concepts** (de matériaux et de procédés), p.ex. des cellules solaires organiques ou à polymères, prennent de plus en plus d'importance en recherche fondamentale, au titre d'options technologiques à long terme; petit à petit, ces nouvelles cellules solaires deviennent réalité. L'industrialisation des procédés de fabrication, visée avec insistance, se trouve à un stade avancé en ce qui concerne les cellules au silicium en couches minces. Quant aux cellules à base de semi-conducteurs composés, un projet industriel est en train d'être mis sur pied. Pour la première fois en Suisse, la concrétisation de grandes installations destinées à la production de cellules en couches minces a été annoncée en 2007. En outre, les cellules solaires à substrat souple occupent une place de plus en plus importante.

MODULES ET INTÉGRATION AU BÂTIMENT

L'**intégration du photovoltaïque** à l'environnement construit continue à figurer au premier rang des applications recherchées. Alors qu'on trouve maintenant sur le marché un nombre important de systèmes de montage les plus divers, l'intérêt pour de nouveaux produits ne faiblit pas. Les expériences faites avec l'intégration des cellules solaires en couches minces retiennent l'attention.

TECHNIQUE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

Pour les applications, l'**assurance qualité** des modules photovoltaïques, des onduleurs et des installations dans leur ensemble est primordiale, tout comme les **observations de longue durée** faites sur ces composants. Ces sujets sont traités par les centres de compétence de plusieurs Hautes Écoles spécialisées. Des séries de mesures sur plusieurs années et l'analyse approfondie des défauts constatés sur les composants doivent permettre l'identification des paramètres critiques et une nouvelle amélioration de la durée de vie. Ces travaux, sur les installations complètes considérées comme

des systèmes, ont pour but une nouvelle amélioration de leur productivité (l'apport énergétique, en kWh, divisé par la puissance installée, en kW_c). En ce qui concerne les **installations en îlot**, on les combine de plus en plus souvent à d'autres techniques énergétiques, ce qui donne des installations hybrides.

ETUDES ET PROJETS COMPLEMENTAIRES

Les travaux relevant de ce domaine doivent dégager les notions de base en rapport avec un certain nombre de questions d'ordre général soulevées par le développement du marché du photovoltaïque. Il s'agit notamment des **possibilités** et des **limites de la technologie**, des **aspects environnementaux**, de la **planification énergétique** ainsi que des **aides pratiques** à la conception des installations et à leur surveillance. Ces travaux font appel aux technologies dernier cri de l'Internet, à des modèles de simulation sur ordinateur, au traitement des images, aux systèmes géographiques d'information et aux satellites de communication. Pour les applications destinées aux **pays en voie de développement**, ce sont, par contre, les aspects non techniques qui sont examinés en priorité. En outre, cette partie du programme comprend les projets situés à l'interface du PV avec d'autres techniques énergétiques.

COOPÉRATION INTERNATIONALE INSTITUTIONNELLE

Pour tous les domaines, la coopération internationale représente un pilier central. L'un des objectifs importants de l'exercice était de suivre l'évolution et d'intensifier les échanges au niveau international, ce qui a été fait comme jusqu'ici avec succès dans le cadre des programmes de l'**UE** et de l'**AIE**. Relevons à ce propos la poursuite de la participation à quelques-uns des grands projets européens dits Projets intégrés (*IP - Integrated Projects*). En outre, pendant l'année sous revue, la participation de la Suisse aux travaux des réseaux européens **PV-ERA-NET** et **Plate-forme technologique européenne du photovoltaïque** s'est révélée cruciale, avec notamment la publication du *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology* [63] de cette plate-forme.

2. Travaux réalisés et résultats obtenus en 2007

TECHNOLOGIE DES CELLULES

Grâce au soutien des institutions les plus diverses, la **recherche suisse sur les cellules solaires** a pu être poursuivie **sur tous les fronts** pendant l'année 2007 sous revue. La participation à des projets du 6^e Programme-cadre de l'UE ainsi que les projets CTI ont constitué deux piliers importants des activités. La Suisse est maintenant engagée, directement ou indirectement, dans la plupart des *Projets intégrés* de la Commission européenne concernant le photovoltaïque.

a) Silicium en couches minces

Les développements en matière de silicium en couches minces sont réalisés par l'IMT de l'Université de Neuchâtel, le CRPP de l'EPFL, la Haute Ecole Arc ingénierie du Locle, le NTB de Buchs (SG) et par les entreprises *oerlikon solar* à Trübbach et Neuchâtel, et *VHF-Technologies*, à Yverdon. Ils constituent le point le plus important du Programme photovoltaïque.

Au chapitre des **cellules solaires au silicium en couches minces** [1], l'IMT de l'Université de Neuchâtel a achevé en 2007 la phase actuelle de son projet. Les objectifs de ce projet de l'OFEN étaient une nouvelle élévation du rendement des cellules solaires déposées sur différents substrats (pour les cellules micromorphes: 14%), le perfectionnement des procédés de fabrication et de la caractérisation des cellules solaires, enfin la mise sur pied de l'infrastructure nécessaire au soutien des partenaires industriels (procédés, fabrication et caractérisation). Divers systèmes de dépôt ont été renouvelés et automatisés. Les systèmes pour la caractérisation des cellules ont été standardisés. Un accent particulier a été mis sur la reproductibilité de chaque étape du procédé de fabrication. Les entreprises *oerlikon solar* et *VHF-Technologies* ont été les premières concernées par cette collaboration industrielle; elles mettent en œuvre, par leurs produits, les procédés développés à l'IMT. L'année sous revue a vu les résultats suivants:

En 2006, des résultats intéressants avaient été obtenus pour les cellules solaires amorphes ou micro-cristallines à une jonction, déposées sur un substrat de verre, et pour les couches intermédiaires réfléchissantes. Dans la foulée, on a cherché en 2007 à améliorer encore le rendement des cellules

micromorphes. Tandis que la couche intermédiaire réfléchissante était constituée auparavant de ZnO, on a travaillé en 2007 sur des couches de SiOx. Ce matériau a permis d'obtenir, pour des cellules micromorphes d'une surface de 1.2 cm², un rendement initial de 12.6%. D'autre part, des cellules solaires de bonne qualité, aussi bien amorphes que microcristallines, ont été produites sur des substrats de matière plastique. Sur du PET (thérophtalate de polyéthylène) comme sur du PEN (naphtalate de polyéthylène), on a atteint, pour les cellules microcristallines, un rendement initial de 8.6%. Par ailleurs, les chercheurs comprennent mieux désormais les propriétés optoélectroniques du ZnO, notamment l'effet des joints de grain sur la mobilité des porteurs de charge. Enfin, le nouvel équipement automatisé à chambre double pour le dépôt des couches a été mis en service (Fig. 1).

Un nouveau projet CTI, intitulé **Flexible Photovoltaics – next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules** [2], a été lancé pendant l'année sous revue par l'IMT de l'Université de Neuchâtel et *VHF-Technologies*. Il s'agit d'améliorer de manière significative le rendement de 4.5% environ caractérisant la première génération des cellules solaires souples de *VHF-Technologies*. Par l'introduction, sur la face arrière, d'une couche réfléchissant la lumière de manière diffuse et par la création d'une structure amorphe de cellule avec la configuration en tandem, le rendement des produits industriels devrait passer à 6%. Sur une petite surface, les premiers résultats sont très prometteurs: 8.8%.

Le fonds *Naturstrom* de l'Axpo soutient le nouveau projet **THIFIC – Thin film on crystalline silicon** [3] de l'IMT. On désire obtenir des cellules solaires au rendement exceptionnellement élevé de 20-22%. On recourt pour cela au principe connu de l'hétéro-jonction, entre des cellules solaires au silicium cristallin et des cellules amorphes ou microcristallines (cellule HIT). L'utilisation de *wafers* en silicium d'épaisseur nettement moindre, pouvant aller jusqu'à 100 µm, est un avantage: on réalise une économie de matière première et donc aussi d'énergie. Dans la phase préliminaire du projet, on a déjà atteint un rendement de 19%. Il s'agit maintenant d'aller encore plus loin en texturant la surface des *wafers*.

La collaboration de l'IMT, de *VHF-Technologies* et d'autres partenaires européens se poursuit dans le cadre du projet européen **FLEXCELLENCE** [4] consacré aux cellules solaires souples déposées sur des substrats métalliques ou de matière plastique, dont l'IMT assure la direction. On est arrivé à préparer en 2007 des substrats à nanotextures sur des films métalliques ou de matière plastique. On a étudié différentes approches pour la déposition *roll-to-roll*: la déposition par vapeur chimique utilisant le procédé plasma *PECVD* à microondes, le dépôt en phase vapeur par procédé chimique à fil chaud et le *PECVD* à très haute fréquence *VHF*. L'IMT et *VHF-Technologies* se consacrent au dernier de ces trois procédés. A l'IMT, la technique *PECVD* a permis de déposer sur du plastique, au cours de l'année sous revue, une cellule tandem micromorphe d'un rendement de 10.9%. Produite industriellement, une telle cellule de 10% de rendement conduirait à des coûts inférieurs à 0.6 €/W_c, ce qui serait vraiment peu.

Dans le cadre du projet intégré **ATHLET** de l'UE [5], l'IMT et *oerlikon solar* poursuivent le perfectionnement des cellules solaires au silicium en couches minces. Pour les cellules tandems micromorphes, l'objectif est un rendement stabilisé de 10% pour une surface de 1 m² déposée à la vitesse de 10 Å/s, avec des coûts de modules inférieurs à 0.5 €/W_c. Ce projet complète le projet OFEN de l'IMT présenté au début du présent chapitre. En 2007, un rendement initial de 10.5% a pu être obtenu à l'aide du réacteur KAI-S. A la 22^e conférence européenne du photovoltaïque, à Milan, *oerlikon solar* a présenté les premiers modules micromorphes de grande surface (1.3 x 1.4 m²), d'un rendement de 9.46%.



Figure 1: Installation automatisée de dépôt du silicium en couches minces, à chambre double, basée sur la KAI-M plasma box d'oerlikon solar (Source: IMT)



Figure 2: Installation MRC de sputtering pour le dépôt des contacts sur la face avant et au dos des cellules solaires CIGS de 30 x 30 cm² en couches minces (Source: EPFZ)

b) Silicium cristallin

Dans le projet CTI **SIWIS** [6], le LFEM/EMPA de Thoune, en collaboration avec *Applied Materials Switzerland* (antérieurement *HCT Shaping Systems*), étudie les mécanismes pouvant conduire à des défauts de surface lors du sciage des disques minces de *wafers* avec une scie à fil. Il s'agit de développer des modèles sur cette base, l'objectif principal du projet étant la fabrication de *wafers* d'une épaisseur de moins de 100 μm destinés à la préparation de cellules solaires cristallines au silicium. Une corrélation a été constatée entre la rugosité de la surface, d'une part, la résistance mécanique et la formation de fissures, d'autre part; cette corrélation dépend des paramètres de la scie. Bien que le projet CTI soit terminé, les partenaires désirent poursuivre leur collaboration.

La Haute École spécialisée de Genève et *Applied Materials Switzerland* étudient les possibilités de recyclage du silicium des déchets de sciage; c'est une étude de faisabilité CTI baptisée **SIRE** [7]. La preuve a été apportée que le silicium peut être séparé du carbure de silicium.

Le projet **BITHINK** de l'UE [8], auquel *Applied Materials Switzerland* a participé, s'est terminé en 2007. Il a été possible de ramener l'épaisseur des *wafers* de 280 à 90 μm . On peut ainsi produire 3500 *wafers* par mètre de silicium solide, soit une surface totale de *wafers* de 1.45 m^2 par kg de silicium. Pour des cellules solaires à deux faces, de rendement 13%, cela conduit à une consommation de silicium de 3.9 – 4.6 g/W_c . Des valeurs inférieures à 4 g/W_c sont même possibles si le rendement peut être amélioré jusqu'à atteindre 15%.

c) Composés II-VI (CIGS)

L'Unité de Physique des couches minces de l'EPFZ travaille depuis des années à divers projets de l'UE relatifs aux cellules solaires à base de semi-conducteurs composés (CIGS, CdTe). Dans le projet **Large area flexible CIGS** [9] de l'OFEN, qui est la continuation du projet **FLEXCIM** achevé en 2006, les chercheurs étudient comment augmenter la surface des cellules solaires CIGS déposées sur des substrats souples de grande dimension. Il s'agit d'améliorer les équipements de dépôt sous vide et d'augmenter le rendement et la fiabilité des cellules CIGS. On vise un rendement de 12% sur des substrats de polyimide. On recherche par ailleurs d'autres solutions pour les contacts électriques au dos des cellules. Lors du dépôt de grandes surfaces, il est important d'obtenir des propriétés suffisamment homogènes sur toute la surface du substrat, la composition de la couche et son épaisseur, par exemple. L'écart type mesuré de ces paramètres sur une surface de 30 x 30 cm^2 est de 2 – 6%. Les premières cellules complètes préparées sur cette même surface avaient un rendement dépassant 8%; la reproductibilité doit cependant encore être améliorée (Fig. 2).

Dans le nouveau projet **Thin film CIGS solar cells with a novel low cost process** [10] de l'OFEN, l'Unité de Physique des couches minces met au point un procédé entièrement nouveau pour la fabrication de cellules solaires CIGS. Dans une réaction à échange d'ions, du cuivre provenant d'une solution aqueuse est introduit dans des films minces de séléniure d'indium. Ces derniers sont produits par co-évaporation. Dans la couche précurseur préparée à l'aide de la réaction à échange d'ions, la concentration du cuivre dépend beaucoup du substrat utilisé. La structure et la composition des couches ainsi produites ont été déterminées par des méthodes d'analyse de surface. Le meilleur rendement atteint jusqu'ici pour ces cellules CIGS était de 4.1%. Mais les contacts de molybdène créés au dos à l'aide de la réaction à échange d'ions se sont avérés instables.

Le projet **LARCIS** [11] de l'UE s'occupe de procédés de production industrielle des cellules solaires CIGS applicables aux grandes surfaces. L'Unité de Physique des couches minces de l'EPFZ porte ses efforts sur l'optimisation des contacts électriques au dos des cellules, à base de molybdène ou d'autres matériaux dont notamment le TiN, le ZrN et leurs combinaisons avec le molybdène. Tant pour les contacts au TiN que pour ceux au ZrN, la combinaison avec le molybdène élève systématiquement la tension à vide V_{oc} de la cellule et le facteur de forme FF, donc aussi le rendement, par rapport aux mêmes cellules sans molybdène. Les meilleurs rendements sont obtenus avec une couche de 10 nm de molybdène traitée au sodium: 13.9% dans le cas du ZrN et 13.8% dans celui du TiN. On a étudié plusieurs façons d'appliquer le traitement au sodium.

Dans le projet européen intégré **ATHLET** [12], l'Unité de Physique des couches minces s'occupe de deux sous-projets consacrés aux cellules solaires CIGS. Il s'agit, d'une part, de développements complémentaires portant sur les cellules souples sur polyimide et, d'autre part, de l'étude de nouveaux procédés pour la préparation de couches tampons à base de In_2S_3 et pour le dépôt de cellules solaires sur des couches TCO. D'autres développements sont consacrés à l'extension des procédés aux grandes surfaces et à la mise au point de cellules tandems. La meilleure cellule solaire CIGS a été fabriquée avec une couche tampon de 60 nm de In_2S_3 ; son rendement était de 14.1%.

La société start-up *FLISOM* étudie l'interconnexion des cellules solaires CIGS à substrat souple à l'aide d'un réseau métallique. C'est un projet nouveau soutenu par le fonds *Naturstrom* de l'Xpo et baptisé **Development of flexible CIGS solar modules with metal grids** [13]. Plusieurs procédés font l'objet de ces études.

d) Cellules solaires à colorant ou organiques

L'ISIC de l'EPFL a poursuivi le développement de **cellules solaires nanocristallines** à colorant activateur [14]. Au cours de l'année sous revue, les efforts ont porté plus spécialement sur la synthèse du colorant et la stabilité à long terme et haute température (env. 80 °C) des électrolytes utilisés. La durée de vie souhaitée pour ces cellules est de 10 à 20 ans. Succédant à des résultats jusqu'ici décevants, un rendement photovoltaïque de 7.6% a pu être réalisé par l'ISIC en 2007 à l'aide d'électrolytes à base de liquides ioniques; c'est un record pour les cellules solaires à colorant sans solvant. Une nouvelle approche dans laquelle des mélanges eutectiques de sels liquides ont été utilisés comme électrolyte redox a permis d'obtenir un rendement de 8.2%. En outre, une première série de cellules tandems combinées avec des cellules solaires CIGS a été préparée, au cours de laquelle un rendement de 15% a été mesuré.

Le nouveau projet CCEM **ThinPV** [15, 16], coordonné par le LFEM/EMPA de Dübendorf et co-financé par *swisselectric research*, regroupe les différents intervenants suisses de la recherche sur les cellules solaires en couches minces. La collaboration de l'ISIC de l'EPFL et du LFEM/EMPA de Dübendorf a permis la synthèse d'un nouveau colorant utilisant du squaraine asymétrique. Malgré l'étroitesse de la bande spectrale de ce colorant, une bonne conversion a été obtenue, correspondant à un rendement photovoltaïque de 4.5%. Le Laboratoire des polymères fonctionnels du LFEM/EMPA s'occupe également de recherches de base sur les cellules solaires organiques. Il s'agit principalement de l'utilisation de cyanine comme colorant et de la nanostructuration de la jonction entre matériaux donneurs et accepteurs. En 2007, on a montré que le dopage du colorant cyanine peut conduire à une intensification considérable du courant photoélectrique, et donc du rendement. Par le dopage, le rendement d'une cellule solaire fabriquée en combinant des fullerènes C₆₀ avec le colorant cyanine a passé de 0.14% à 1.2%. Le LFEM/EMPA mène en outre une étude CTI de faisabilité sur le thème **Transparent and flexible solar cell electrodes made from precision fabric** [17].

Solaronix continue à participer au projet **FULLSPECTRUM** [18] de l'UE, un *Projet intégré* dans le domaine du photovoltaïque qui réunit différentes approches (III-V *multijunctions*, thermophotovoltaïque, *intermediate band cells*, concepts moléculaires) qui ont toutes pour objectif une meilleure utilisation du spectre solaire. Les rendements visés pourraient atteindre les 40%. Au sein de ce projet, *Solaronix* participe plus spécialement aux travaux de soutien dans le module consacré aux nouveaux concepts moléculaires. Il s'agit là de l'étude du rôle des cellules solaires à colorant dans les processus à 2 photons et dans les concentrateurs plans. *Solaronix* s'occupe de la mesure des caractéristiques courant-tension, de la sensibilité spectrale et de la stabilité des concentrateurs plans.

Le nouveau projet **OrgaPvNet** [19] de l'UE est un réseau réunissant les intervenants européens du domaine des cellules solaires organiques, dans le but de définir les futures stratégies en la matière. *Solaronix* est l'une des 4 PME participant à ce projet, qui réunit en tout 22 partenaires. Jusqu'ici, l'activité principale a été l'organisation de divers ateliers au cours desquels ont été abordés aussi bien les aspects techniques et scientifiques des cellules solaires organiques que ceux relevant de leur marché.

Le projet **Napolyde** [20] de l'UE, du nom du domaine traité, le dépôt de polymères nanostructurés (*Nanostructured Polymer Deposition*), consiste en des recherches interdisciplinaires en vue des applications au domaine de l'énergie et des *smart devices*. Il regroupe 23 partenaires travaillant dans des domaines très différents comme la microélectronique, les traitements de surface ou la biomédecine et considère aussi bien les petites applications que celles à grande échelle. Les participants suisses sont *Solaronix* et le *CSEM*. Le photovoltaïque est l'un des domaines d'application visés explicitement. De petits modules (10 x 10 cm²) de cellules à colorant interconnectées de manière monolithique ont été fabriqués; leur rendement est de 5.6%.

L'Institut d'Héliotechnique SPF de la HSR de Rapperswil met sur pied un centre de compétences sur la dissociation de l'eau au moyen de cellules hybrides PV-PEC. C'est un projet de l'OFEN baptisé **PECNet** [21] qui, technologiquement parlant, est rattaché surtout à la photo-électrochimie; il est possible qu'il ait cependant aussi un rapport avec le photovoltaïque. Dans un premier temps, on a regroupé les différentes compétences et le savoir-faire, puis saisi les publications sur le sujet. En même temps que le *Energy Centre*, le *PEChouse* est mis sur pied à l'ISIC de l'EPFL, comme centre de coordination.

MODULES SOLAIRES ET INTEGRATION AU BATIMENT

Aujourd'hui comme hier, les **installations intégrées au bâtiment** sont les applications les plus importantes du photovoltaïque en Suisse. Mais qu'entend-on par intégration au bâtiment ? Des panneaux solaires appliqués contre un élément de construction ou une véritable intégration ? Tandis que, dans le cadre des bourses d'électricité solaire ou courant vert, les solutions en toiture plate les plus avantageuses ont souvent été choisies ces dernières années, les recherches se poursuivent dans le but de réduire le prix de revient des solutions basées sur une intégration poussée. Puisqu'il existe désormais toute une série de systèmes de montage pour le bâtiment (voir aussi le chapitre P+D), les efforts se reportent de plus en plus sur le module solaire lui-même.

Swiss Solar Systems (3S) a participé au projet **BIPV-CIS** de l'UE [22], qui est arrivé à son terme en 2007. Son objectif était l'amélioration des caractéristiques de l'intégration au bâtiment des cellules solaires en couches minces. La croissance rapide du marché du photovoltaïque n'a pas permis la réalisation de tous les objectifs de ce projet. 3S veut promouvoir l'intégration du photovoltaïque au bâtiment. Il s'agit pour cela de mettre au point des produits adéquats, comme par exemple des éléments de toiture photovoltaïques et des vitrages isolants photovoltaïques avec leurs raccordements électriques et le câblage correspondant. Le projet a aussi permis l'établissement d'un inventaire des systèmes photovoltaïques les plus courants du marché et d'un aperçu des standards de construction européens importants pour le photovoltaïque. L'élément de toiture développé par 3S pour l'intégration du photovoltaïque au bâtiment est basé sur un laminé photovoltaïque de type classique, à partir duquel le produit fini est fabriqué par injection sous pression, en une seule opération. La conception est terminée, les dessins de construction en sont à un stade avancé et l'évaluation des sous-traitants les plus importants a été faite. Il a fallu pour cela procéder à de nombreux essais de matériaux. Ces travaux vont se poursuivre en Suisse, malgré l'achèvement du projet européen.

Dans le cadre de projets P+D, quelques nouveaux concepts et produits en rapport avec l'intégration du photovoltaïque au bâtiment ont été mis à l'épreuve (voir plus loin).

TECHNIQUE DES SYSTEMES ELECTRIQUES

D'une manière générale, les **thèmes principaux de la technique des systèmes électriques** sont l'assurance qualité des composants (modules, onduleurs), des systèmes (dimensionnement, production d'énergie) et des installations (observations de longue durée). Dans un marché en forte expansion, les enseignements tirés de l'étude de ces questions pratiques sont de la première importance pour la sécurité, la fiabilité et la productivité des installations futures et la standardisation des produits. Ces enseignements, avec le fait que le coût des composants et des systèmes continue de baisser, permettront au photovoltaïque de devenir compétitif à moyen et long terme grâce à des installations fonctionnant pendant de longues années. L'assurance qualité est d'autant plus importante que le nombre des produits de qualité insuffisante que l'on trouve sur le marché a augmenté ces derniers temps [64].

Pendant l'année sous revue, l'ISAAC de la SUPSI a achevé le projet **Centrale LEEE-TISO 2003-2006** [23]. Ce laboratoire certifié pour les mesures selon ISO 17025 est équipé d'un simulateur solaire de la classe A; en avril 2007, il a obtenu à nouveau son accréditation officielle. Ses mesures des caractéristiques courant-tension de modules solaires pour le compte de tiers sont une prestation appréciée; leur nombre, 342 en 2007, est en constante progression. En outre, pour certains produits, d'autres paramètres comme le coefficient de température ou le comportement pour différentes valeurs de l'irradiance ont été déterminés.

Le 10^e cycle des essais en plein air de 14 modules solaires du commerce (8 mc-Si, 2 sc-Si, 1 HIT, 2 a-Si, 1 CdTe) est arrivé à sa conclusion en 2007. Après 15 mois de mesures, la puissance stabilisée des modules était de 0.7% à 8.2% inférieure à leur puissance nominale, la moyenne des écarts étant de -3.7%. Les performances de tous les modules sont ainsi conformes aux données garanties par les fabricants. Dans les premières heures de leur exploitation, presque tous les modules de silicium cristallin mesurés au cours des 5 derniers cycles d'essais ont présenté une légère dégradation initiale, de 1.1% en moyenne. En ce qui concerne la production annuelle d'énergie – exprimée en kWh/kW_c – les différences entre les 14 types différents de modules sont de 10% si l'on prend comme référence la puissance nominale, et même moins si c'est la puissance effectivement mesurée qui sert de référence (Fig. 3). L'ISAAC a poursuivi en 2007 ses travaux relatifs à l'intégration du photovoltaïque au bâtiment. Une base de données répertoriant les produits a été constituée (www.bipv.ch, Fig. 4).

L'ISAAC a participé, au cours de l'année sous revue, aux travaux du projet **PERFORMANCE** de l'UE [24]. C'est un *Projet intégré* d'une durée de quatre ans, coordonné par le *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme* à Freiburg (Allemagne); il concerne tous les travaux de caractère prénormatif, des cellules solaires aux systèmes et des mesures instantanées aux analyses portant sur le long terme. L'ISAAC est impliqué dans les études portant sur les performances et la production d'énergie des modules photovoltaïques ainsi que dans la modélisation. 6 laboratoires européens d'essais, tous différemment équipés, ont pris part en 2007 à un *Round Robin Test* de modules de silicium cristallin. D'un laboratoire à l'autre, les puissances maximum mesurées varient de $\pm 2\%$. Il est prévu de réaliser d'autres tests similaires, pour améliorer les procédures et pour comparer les résultats obtenus pour diverses valeurs de l'irradiance. On désire ramener les écarts entre les laboratoires à $\pm 1\%$ de la valeur mesurée. Ces mesures sont aussi faites avec des modules « couches minces », ce qui pose des exigences plus sévères au procédé de mesure. Un *Round Robin Test* de la modélisation et de la prédiction de la production d'énergie a donné des valeurs variant de $\pm 5\%$ si l'on considère tous les types de modules ($\pm 3\%$ pour les seuls modules cristallins).

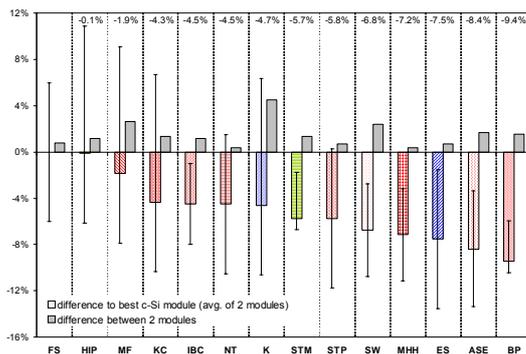


Figure 3: Variation de la production annuelle d'énergie (kWh/kW_c) d'un module solaire à l'autre, pour 14 modules différents (Source: ISAAC)

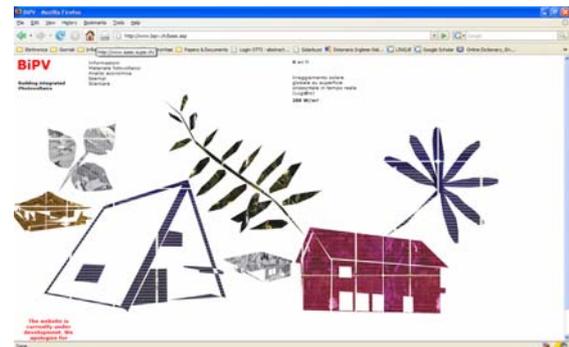


Figure 4: La page d'accueil du site Internet BIPV www.bipv.ch (Source: ISAAC)

Le **rendement** et la **production annuelle d'énergie** des modules photovoltaïques font aussi l'objet d'investigations au PSI [25], dans un projet qui s'est achevé en 2007. Des mesures effectuées dans des conditions diverses sur différents modules du commerce sont utilisées pour paramétrer un modèle semi-empirique du rendement. Le modèle a été validé à l'aide de modules à cellules de silicium cristallin. Des mesures ont aussi été faites sur des modules « couches minces ». Elles ont servi à la détermination du rendement des modules en fonction de l'irradiance, de la température et de la masse d'air optique. On a pu en déduire ensuite un certain nombre de conclusions quant à la production d'énergie pour différentes conditions météorologiques.

Le Laboratoire photovoltaïque de la HTI de Berthoud (HESB-TI) a continué la réalisation du projet **PVSYSTE Technique des systèmes photovoltaïques** [26]. Les mesures effectuées sur plus de 60 installations PV, sans interruption depuis 1992 pour plusieurs d'entre elles, se poursuivent. La deuxième étape de l'installation du *Stade de Suisse*, dont la puissance est désormais de 1.35 MW_c , a été intégrée au programme des mesures. La statistique des pannes des onduleurs a été mise à jour; il est réjouissant de constater qu'on n'en a enregistré qu'un petit nombre en 2007. Pour tester les onduleurs solaires, le Laboratoire photovoltaïque de la HESB-TI dispose d'une installation d'essai de 60 kW_c située en toiture et de deux simulateurs ultra-stables de générateurs solaires, de 20 et 25 kW respectivement, commandés par ordinateur. Ces simulateurs permettent de reproduire à tout instant la caractéristique d'un générateur solaire, avec des paramètres ajustables à volonté. Mais cette infrastructure ne suffit plus pour les essais des grands onduleurs centraux dont la puissance nominale dépasse souvent les 100 kW . Pour pouvoir aussi tester à pleine puissance ces onduleurs modernes, le laboratoire a commencé la construction d'un simulateur de générateur solaire d'une puissance nominale de 100 kW (Fig. 5). Jusqu'ici, les sources de courant (15 sources de 10 A et une de 5 A) ont été montées et testées (Fig. 6). Les tiers recourent de plus en plus souvent aux prestations du Laboratoire photovoltaïque en lui commandant des séries de mesures sur des onduleurs.

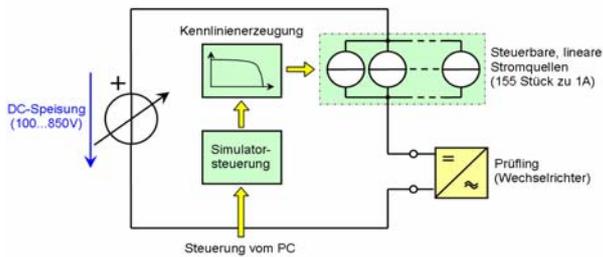


Figure 5: Schéma-bloc du simulateur de 100 kW
(Source: HESB-TI)

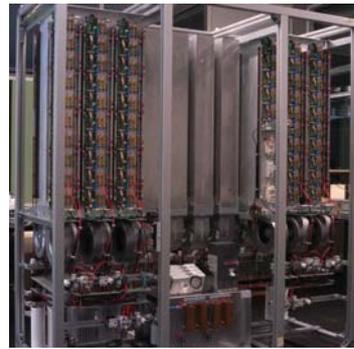


Figure 6: Le simulateur de 100 kW en cours de montage (décembre 2007) (Source: HESB-TI)

Enecolo a achevé en 2007 l'étude de faisabilité d'un onduleur intégrant une alimentation sans coupure [27]. L'objectif du projet **SIMIBU** était la combinaison d'un onduleur et d'une telle alimentation UPS. Tant que le réseau est disponible, l'onduleur fonctionne comme un onduleur solaire normal et l'alimentation UPS est en veilleuse. Celle-ci ne devient active qu'en cas de panne du réseau. Le même onduleur alimente alors les appareils auxquels il est raccordé, jusqu'à ce que le réseau public fonctionne à nouveau (Fig. 7). La faisabilité du concept à un coût raisonnable a pu être démontrée grâce à la collaboration avec *Sputnik Engineering*. Les applications potentielles se situent dans les régions où les coupures de courant sont fréquentes, dans les pays en voie de développement où le raccordement à un réseau n'existe pas, mais reste une option pour le futur, et dans les régions où le réseau est surchargé pendant la journée et où, par conséquent, le courant de pointe est cher. Une installation pilote devrait prouver maintenant l'aptitude fonctionnelle du système.

Indépendamment, le projet **SOS-PVI** (*Security of Supply Photovoltaic Inverter*) de l'UE [28] poursuit un objectif similaire, avec *Maxwell Technologies* comme partenaire suisse (Fig. 8). Cinq prototypes d'onduleurs de ce type y sont mis au point. A part la construction de l'onduleur proprement dit, les aspects techniques étudiés englobent notamment des questions relatives à la courbe de charge dans certains réseaux ainsi que les boucles de réglage nécessaires.

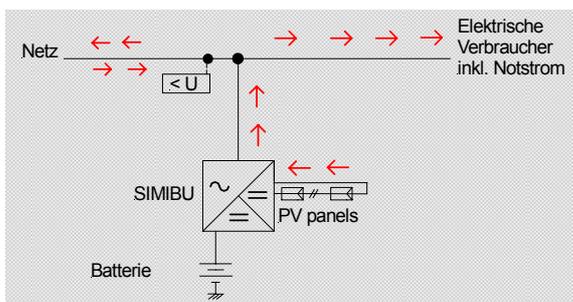


Figure 7: Courants électriques dans un onduleur UPS avec alimentation sans coupure, raccordé au réseau (Source: Enecolo)

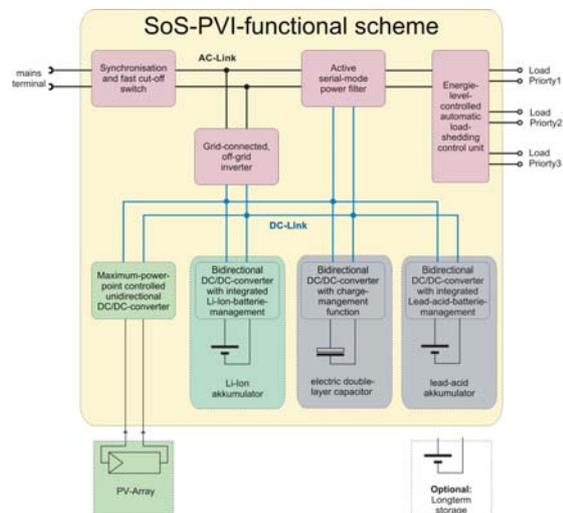


Figure 8: Architecture de l'appareillage du projet SOS-PVI (Source: Maxwell Technologies)

ETUDES ET PROJETS COMPLEMENTAIRES

Pendant l'année sous revue, *Enecolo* a réalisé le projet **PV-BUK** [29]. Ses objectifs étaient la détermination des coûts effectifs d'exploitation et d'entretien des installations photovoltaïques, une estimation de leur évolution future et l'élaboration d'un catalogue de mesures susceptibles de les réduire. On a rassemblé autant de renseignements que possible sur ces coûts en Suisse et en Allemagne, en étudiant la littérature et en interrogeant, oralement ou par écrit, des experts et des propriétaires d'installations. Il en ressort que les frais d'exploitation par kWh d'électricité solaire produite diminuent quand la

taille de l'installation s'accroît et quand la productivité (kWh/kW_c) augmente. Pour une installation de $10 kW_c$, ils se montent à 10 ct./kWh environ, pour une de $30 kW_c$ à 8 ct./kWh et pour une de $100 kW_c$ à 6 ct./kWh. La plus grande partie des frais d'entretien est causée par le remplacement de composants défectueux, notamment les onduleurs.

ESU-Services a achevé en 2007 la **mise à jour de Photovoltaik Ecoinvent Data V2.0** [30]. De nouvelles analyses du cycle de vie (*Life Cycle Analysis – LCA*) ont été faites sur la base de l'inventaire de cycle de vie de technologies photovoltaïques industrielles utilisées actuellement. L'objectif était de publier dans la base de données *Ecoinvent* [65] des analyses environnementales en rapport avec l'industrie du photovoltaïque qui soient aussi à jour que possible. Pour la première fois, des données concernant la fabrication de modules „couches minces“ (CIS et CdTe) et leur utilisation dans des installations ont été saisies. Quant aux données relatives aux modules mono- et polycristallins, elles ont été mises à jour. La figure 9 présente de manière suggestive la durée d'amortissement énergétique. Le projet a aussi permis de démontrer dans quelle mesure la consommation totale d'énergie associée au cycle de vie des produits photovoltaïques a pu être systématiquement abaissée au cours des 15 dernières années (Fig. 10). Ce projet s'est déroulé en collaboration avec l'Association européenne des industries photovoltaïques (EPIA). Il est une contribution à un nouveau projet AIE-PVPS sur le même sujet [31].

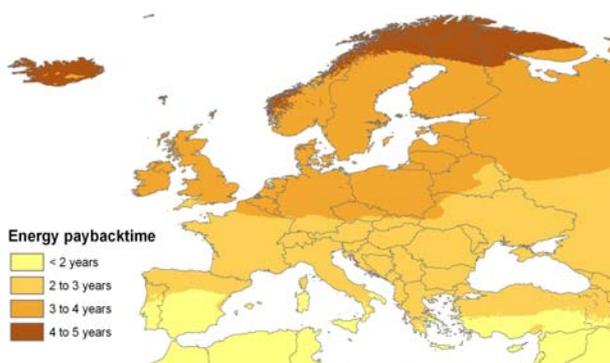


Figure 9: Durée d'amortissement énergétique d'une installation de $3 kW_c$ à cellules polycristallines en toiture à pans inclinés en fonction de son emplacement en Europe (base de calcul: palette énergétique UCTE) (Source: ESU Services)

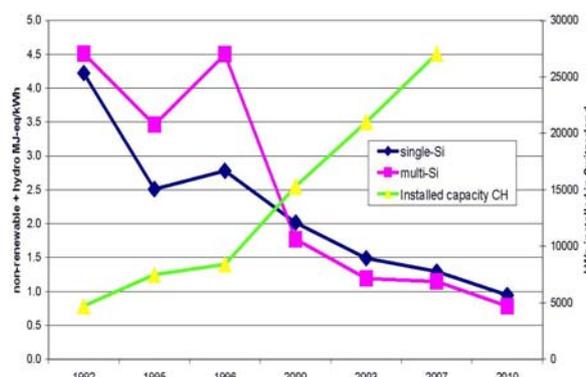


Figure 10: Evolution de la consommation totale d'énergie associée au cycle de vie des produits photovoltaïques (Source: ESU Services)

Le projet **ENVISOLAR** [32] de l'Agence spatiale européenne (ESA), auquel *Enecolo* a participé, s'est terminé en 2007. L'objectif de ce projet était une utilisation plus fréquente des données de rayonnement solaire provenant de satellites par l'industrie du solaire. Les services mis au point dans le cadre du projet devraient simplifier les analyses de site et le choix des implantations. Ils devraient aussi compléter les mesures automatiques en continu sur les installations et rendre possible la prédiction de la production d'énergie. Le rapport publié par ce projet donne un excellent aperçu des différents procédés applicables [66]. En Suisse, il existe un rapport étroit entre ce projet et le service de mesures en continu SPYCE [67] qu'exploitent ensemble *Enecolo* et *Meteotest*.

L'étude de faisabilité réalisée par le LESO de l'EPFL, qui avait pour objet l'utilisation de **concentrateurs du type quantum dot** [33] dans les applications photovoltaïques, est terminée. Une modélisation et des essais ont permis d'examiner s'il serait intéressant de fabriquer par cette méthode, sur des verres, des concentrateurs de grande surface qui agiraient de manière latérale. Il s'agissait également d'évaluer la production d'électricité possible. Les couches *Quantum Dot* ont été préparées par la technique Sol-Gel. Sur la base des premiers résultats, on peut s'attendre à un rendement du système d'au moins 6%.

L'intégration du photovoltaïque au bâtiment prend de plus en plus d'importance. C'est pourquoi *Zag-solar*, en collaboration avec le réseau BRENET, a élaboré le **concept d'un centre de compétences pour les installations solaires (thermiques et photovoltaïques) intégrées au bâtiment** [34]. Le point principal de ce projet est l'assurance de la qualité et la possibilité de certifier des produits. A côté de ces activités, le centre s'occuperait d'information et de formation, de base ou continue.

Dans le cadre du *Projet européen intégré FULLSPECTRUM* [35], le PSI participe, dans le module correspondant, aux travaux internationaux sur le thème du thermophotovoltaïque (TPV). En se basant sur les résultats de projets antérieurs, cet institut étudie plusieurs aspects relevant de la technique des systèmes à l'aide d'une installation d'essai fonctionnant au gaz naturel. Le prototype construit à cet effet comprend le filtre infrarouge, l'émetteur, l'interconnexion des cellules, leur dispositif de refroidissement et le système de saisie des résultats de mesure. Les cellules solaires utilisées par le PSI sont à base de silicium, tandis que les autres instituts partenaires perfectionnent des cellules à base de GaSb.

Le projet à valeur de symbole **SOLARIMPULSE** [36] de Bertrand Piccard et divers partenaires s'est poursuivi pendant l'année sous revue. Son but est un vol autour du globe dans un avion propulsé à l'énergie photovoltaïque. Un autre projet de type visionnaire, baptisé **PlanetSolar** [37], est réalisé par un groupe romand autour de son promoteur Raphaël Domjan. PlanetSolar, c'est le nom d'un futur bateau solaire qui fera le tour du monde. Ces deux projets émanent d'initiatives privées. Cependant, une collaboration s'est établie avec les Hautes Ecoles pour résoudre un certain nombre de problèmes techniques concrets. C'est ainsi que **SOLARIMPULSE** et l'EPFL réalisent ensemble le projet CTI **Ultralight Photovoltaic Structures** [38], dont le but est de développer des structures en sandwich ultra-légères avec intégration d'éléments photovoltaïques.

Bien que les deux projets doivent relever des défis technologiques énormes, ils rencontrent auprès du public un écho considérable de par leur caractère spectaculaire. En fait, ils se font d'une certaine manière concurrence. Dans le même ordre d'idée, mentionnons le projet **Solartaxi** [39] encore plus concret, en ce sens qu'un véhicule solaire a quitté Lucerne en été 2007 pour faire le tour du monde. Ce « taxi solaire » a, depuis lors, atteint l'Australie.

COOPÉRATION INTERNATIONALE AIE, CEI, UE

La participation au Programme photovoltaïque de l'AIE (AIE PVPS) s'est poursuivie pendant l'exercice, sous le signe de la continuité tant au niveau des projets qu'à celui du *Comité exécutif (ExCo)* [68]. La Suisse continue à assurer la présidence de ce programme mondial. Le Pool suisse AIE PVPS créé en 2005 pour financer conjointement la participation de notre pays à différents projets du Programme a pu être reconduit. Font partie actuellement de ce pool les Services industriels de la Ville de Zurich (ewz), les Cantons de Genève et de Bâle-Ville, la *Société Mont-Soleil* et l'Association professionnelle SWISSOLAR. L'idée à la base de la création du pool est d'associer plus étroitement plusieurs groupes cibles aux travaux de AIE PVPS.

Dans la Tâche 1 AIE PVPS, la Suisse est représentée par *Nova Energie*; cette Tâche est chargée des **activités générales d'information** [40]. Pendant l'exercice, un nouveau rapport national sur le photovoltaïque en Suisse jusqu'en 2006 a été préparé [69]. Il a servi de base à la douzième édition du rapport annuel international („*Trends Report*“) sur l'évolution des marchés du photovoltaïque dans les pays de l'AIE [70]. Ce rapport a de nouveau été utilisé par le monde de la finance, notamment pour ses analyses de la situation actuelle du photovoltaïque [71]. Au cours de l'année sous revue, plusieurs ateliers ont été organisés. A l'occasion de la 22^e Conférence européenne du photovoltaïque à Milan, l'un d'eux a eu pour sujet l'accès aux données concernant le marché du PV et l'interprétation de celles-ci. Organisé conjointement par le Japon et la Suisse, un autre a eu lieu fin 2007 à Fukuoka à l'occasion de la conférence asiatique du photovoltaïque [72]. Le bulletin *IEA PVPS-Newsletter* [73] donne périodiquement des renseignements sur les travaux du programme AIE PVPS et tout ce qui l'entoure. Il est distribué en Suisse à 250 exemplaires. Le site Internet AIE PVPS [74] a été mis à jour en 2007.

C'est *TNC* qui a fait office d'expert suisse dans la Tâche 2 sur les **expériences d'exploitation** [41]. Ce projet est arrivé à son terme en 2007. La base de données PVPS *Performance Database*, qui est aussi accessible en ligne [75], compte 505 installations photovoltaïques de 22 pays, d'une puissance installée totale de 13.5 MW_c, les données d'exploitation se rapportant à un total d'environ 1600 années. Les données suisses concernent 66 installations d'une puissance totale de 2 MW_c. Le sous-projet *Photovoltaic System Cost over Time* a permis de rassembler des données en provenance des sources les plus diverses permettant de suivre l'évolution du prix des installations PV et de leurs frais d'entretien. Pour conclure la Tâche 2, différentes publications ont été préparées [76, 77, 78, 79]. Comme l'assurance qualité et la fiabilité des installations photovoltaïques sont cruciales pour l'évolution future du marché, il est prévu de définir un nouveau projet dans la ligne de la Tâche 2.

Dans le cadre de la plate-forme interdépartementale *REPIC* [80] créée par le SECO, la DDC, l'OFEV et l'OFEN pour la promotion des énergies renouvelables dans la coopération internationale, *entec* assure la participation suisse à la Tâche 9 qui s'occupe de la **coopération au développement dans le domaine du photovoltaïque** [42]. La Suisse est responsable de la coordination des travaux avec diverses organisations bilatérales et multilatérales. Dans le cadre de ce projet, des réunions ont été organisées en 2007 en Allemagne, en France et en Belgique. Dans ses travaux, la Tâche 9 met l'accent sur les services en matière d'énergie dans divers domaines d'application et adopte fréquemment des approches qui ne se limitent pas au photovoltaïque. Pendant l'année sous revue, l'attention s'est portée plus spécialement sur l'approvisionnement en eau. La Suisse et l'Allemagne ont organisé sur le sujet un atelier en Thaïlande, au cours duquel les expériences faites jusqu'ici ont été discutées librement et examinées de manière critique. D'une manière générale, on cherche à améliorer la mise en réseau avec les milieux concernés par l'approvisionnement en eau.

Planair représente la Suisse dans la Tâche 10 **Le photovoltaïque dans l'environnement urbain** [43] du Programme AIE PVPS. Pour la Suisse, les aspects en rapport avec l'urbanisme et le réseau électrique figurent au premier plan des préoccupations. Grâce à l'association de la Ville de Neuchâtel à l'élaboration de la contribution suisse, les questions qui se posent sont abordées concrètement dans cette optique. La Tâche 10 entretient des contacts étroits avec le projet **PV-Upscale** [81] de l'UE, qui poursuit des objectifs semblables au niveau européen. En Suisse, deux ateliers interdisciplinaires ont eu lieu, à Neuchâtel et Zurich, respectivement. Ils ont permis de discuter les aspects de l'urbanisme en rapport avec le photovoltaïque. Pendant l'année sous revue, la Tâche 10 a publié plusieurs nouveaux rapports [82, 83, 84]. Relevons à ce sujet l'analyse systématique des plus-values apportées par le photovoltaïque au-delà de la production d'énergie proprement dite. Pour la première fois, il a été possible de les formuler quantitativement et de manière différenciée en fonction des pays.

Sputnik représente la Suisse dans la Tâche 11 AIE PVPS consacrée aux **installations photovoltaïques hybrides intégrées à des mini-réseaux** [44]. C'est un domaine qui prend de plus en plus d'importance dans le monde, même si ce n'est pas vraiment le cas en Suisse. Les questions abordées vont très loin sur le plan technique; elles concernent la conception des installations, le réglage automatique et la pénétration du photovoltaïque dans les mini-réseaux électriques.

ESU-Services représente la Suisse dans la Tâche 12 AIE PVPS nouvellement créée, consacrée aux aspects du photovoltaïque en rapport avec **l'environnement, la sécurité et la santé** [31]. L'objectif du projet est l'élaboration et la publication de données fiables sur ces sujets importants, qui soient harmonisées à l'échelle internationale et aussi à jour que possible pour ce qui concerne les procédés industriels. En la matière circulent encore, en effet, des affirmations contradictoires et divergentes quantitativement parlant. La Tâche 12 s'occupe en outre des méthodes de recyclage des modules photovoltaïques.

Meteotest [45] et le CUEPE de l'Université de Genève [46] réalisent ensemble la contribution de la Suisse à la Tâche 36 **Solar Resource Knowledge Management** du Programme de chauffage et climatisation solaire de l'AIE (AIE SHC). Dans ce projet, les différentes méthodes de préparation des données de rayonnement solaire et les notions de base sur lesquelles elles s'appuient sont retravaillées globalement et rendues plus largement disponibles. La Tâche 36 fait partie du programme AIE SHC; de par son contenu, elle intéresse cependant toutes les technologies solaires; c'est pourquoi une collaboration a été instituée avec les autres programmes de l'AIE consacrés à l'énergie solaire (AIE PVPS et AIE PACES). Dans ce projet, la qualité de différents modèles de rayonnement et des produits qui les utilisent est comparée et optimisée. Pendant l'année sous revue, les travaux ont été consacrés principalement à la prédiction du rayonnement et à la turbidité de l'atmosphère.

SWISSOLAR représente la Suisse dans le Comité technique 82 de la CEI (CEI/TC 82) chargé de la **normalisation photovoltaïque** mondiale [47]. Le travail est réparti entre 6 groupes de travail (*Glossary, Modules, Non-concentrating systems, PV energy storage systems, Balance-of-system components, Concentrator modules*). Dans chaque domaine de la technique, les normes sont une partie importante du développement des produits, des essais et de la vérification de la qualité. Toute une série de normes importantes internationalement reconnues manquent encore à l'industrie photovoltaïque qui se développe rapidement. Cette situation s'améliore cependant nettement, du moment que les intervenants manifestent de plus en plus d'intérêt pour la normalisation. Malgré la CEI, il n'a pas été possible d'empêcher l'adoption de nombreuses normes photovoltaïques nationales, dont la plupart ont été lancées dans le cadre de programmes nationaux en matière d'énergie et aussi partiellement financés par ceux-ci. Ces dernières années, on a remarqué au sein de la CEI une volonté de plus en plus marquée d'harmoniser ces normes nationales. Il faut distinguer entre les règles concernant les performances et celles qui touchent la sécurité des utilisateurs et la qualité des composants et des installations. Traditionnellement, les questions relatives à la sécurité sont réglées plutôt au niveau

national. A quelques exceptions près, dans d'autres domaines, les comités de normalisation de la CEI n'ont pas réussi non plus à faire passer de manière contraignante au niveau national des normes CEI relevant de la sécurité. Par contre, l'UE a fait avancer les choses en ce sens que, depuis quelques années, le vote parallèle pour l'approbation des normes CEI et CENELEC a été introduit. Actuellement, 28 documents en rapport avec le photovoltaïque sont en préparation au niveau de la CEI. La Suisse suit ces travaux par l'intermédiaire de la commission de normalisation TK 82 [85].

C'est la direction du Programme photovoltaïque (OFEN, *NET Nowak Energie & Technologie*) qui assure la participation de la Suisse au projet européen **PV-ERA-NET** [48]; par le biais du schéma ERA-NET [86], il réunit les centres de coordination des programmes de 13 pays et les ministères auxquels ils sont rattachés. La Suisse dirige le premier lot de ce projet, consacré à l'échange d'informations sur les programmes photovoltaïques européens. En 2007, l'échange d'informations s'est poursuivi, de même que la mise à jour d'une base de données répertoriant les projets. La mise au point de modèles de coopération entre les différents programmes nationaux s'est achevée. Une première mise au concours commune *POLYMOL* a été organisée sur le thème des cellules solaires organiques et à polymères; la Suisse y a participé; 9 propositions de projets ont été enregistrées. Le choix des projets à encourager aura lieu dans la première moitié de 2008. Dans le cadre de la plate-forme européenne du photovoltaïque, relevons encore la publication du document *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology* (SRA) [63], qui est considéré comme une référence européenne de base. Il contient, d'une part, une description complète des thèmes de la recherche photovoltaïque pour le court, le moyen et le long terme. On y trouve, d'autre part, des renseignements sur l'évolution de la technologie et de la rentabilité ainsi que sur les rapports entre la recherche (nationale et européenne) privée et publique.

3. Coopération nationale

Les projets et manifestations de l'année sous revue ont permis de continuer à affiner la coopération au niveau national entre les différents intervenants: les Hautes Ecoles universitaires, les Hautes Ecoles spécialisées, les instituts de recherche et l'économie privée. La collaboration avec les entreprises industrielles a pu être renforcée considérablement; de nouveaux projets CTI y ont contribué, tandis que l'industrie mandatait directement certains instituts de recherche. On constate que de nouvelles entreprises industrielles s'intéressent au photovoltaïque, suite à la progression mondiale des marchés de cette technologie.

La Direction du programme a entretenu ses contacts réguliers avec de nombreux offices fédéraux ou cantonaux et avec les compagnies d'électricité. Relevons ici les échanges réguliers avec le Secrétariat d'État à l'éducation et à la recherche (SER), la CTI, l'OFEV, la DDC et le SECO, ainsi qu'avec l'Association des entreprises électriques suisses (AES), *swisselectric* et la *Société Mont-Soleil*. Grâce à ces contacts variés, le Programme continue à bénéficier d'une assise large et solide, ce qui est primordial.

4. Coopération internationale

La coopération internationale – pour le Programme photovoltaïque une tradition – s'est poursuivie pendant l'année sous revue. La collaboration institutionnelle au sein de l'AIE, de la CEI et des réseaux européens de coordination des programmes PV a déjà été relevée. De nombreux projets, en cours ou nouveaux, ont aussi permis de poursuivre au sein de l'UE une collaboration dont l'efficacité n'est plus à démontrer. En 2007, on dénombrait 11 projets relevant du 6^e Programme-cadre de recherche et de développement technologique de l'UE, dont 3 (FULLSPECTRUM, PV-ATHLET, PERFORMANCE) sont des *Projets intégrés*. Un autre projet a été réalisé avec l'ESA. La Suisse entretient des contacts réguliers avec les responsables des programmes des pays de l'UE, ainsi qu'avec les instances compétentes de la Commission européenne.

La Suisse est représentée aussi bien dans le comité directeur que dans les différents groupes de travail de la Plate-forme européenne de la technologie photovoltaïque [87]. Les plates-formes technologiques sont un nouvel instrument de promotion du développement technologique de l'UE, dont le but est l'élargissement du cercle des promoteurs de certaines technologies et l'adoption d'une stratégie commune par tous les intervenants; les milieux de la recherche, l'industrie, les milieux de la finance et les représentants des pouvoirs publics conjuguent leurs efforts en soutenant conjointement une telle plate-forme et définissent de manière coordonnée les projets de R+D et leur mise en œuvre. Il faut relever ici l'engagement massif de l'industrie dont le rôle en matière de plates-formes technologiques

est essentiel. L'année sous revue a vu la publication du *Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology (SRA)* [63]. Dans le cadre du *Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)* [88] proposé par la Commission européenne, les propositions présentées par les responsables du photovoltaïque ont servi de base à l'élaboration des mesures à prendre pour atteindre les objectifs énergétiques 2020 de l'UE.

D'autres contacts ont été entretenus avec des organismes internationaux en rapport avec la coopération au développement (entre autres: Banque mondiale, FEM, IFC, UNDP, UNEP, GTZ, KfW, REEEP). De manière générale, on peut constater que la Suisse continue à se placer en bonne position dans l'environnement photovoltaïque international.

5. Projets pilotes et de démonstration (P+D)

Comme l'année dernière, deux nouveaux projets P+D de l'OFEN ont pu être lancés en 2007. Le nombre total de ces nouveaux projets lancés depuis 2003 s'élève ainsi à 4, auxquels on peut ajouter un autre projet P+D encouragé par le fonds *Naturstrom* de l'Axp. Rien de comparable, donc, avec la période précédant 2003, au cours de laquelle 10 projets au moins venaient s'ajouter chaque année au programme P+D. Il est réjouissant de constater qu'une partie de ces 'anciens' projets influencent encore aujourd'hui, des années plus tard, le marché du photovoltaïque. Actuellement, le Programme photovoltaïque P+D est réduit à la portion congrue: juste quelques projets, qui se trouvent pour la plupart dans leur phase terminale. Cette évolution est très regrettable, car un maillon essentiel du transfert de technologie s'en trouve très affaibli, entre recherche et développement, d'une part, produits et procédés industriels, donc marché, de l'autre. L'efficacité de cette partie du programme continue donc à être limitée et les entreprises suisses ont de plus en plus de difficultés à innover et à commercialiser de nouveaux produits relevant des applications photovoltaïques.

L'un des deux nouveaux projets P+D de l'OFEN est basé sur les résultats intéressants du projet P+D 'Installation CPT à modules à cellules en couches minces, intégrés à une toiture plate' [49]. On y étudie dans le détail la dégradation et le comportement du type 'recuit' (*annealing*) de ces modules. L'autre projet est consacré à l'étude du comportement, en conditions réelles d'exploitation, d'un onduleur UPS avec alimentation sans coupure, raccordé au réseau. Il est apparenté au projet de recherche SIMIBU [27].

Les projets P+D qui subsistent encore continuent à traiter pour la plupart de **l'intégration du photovoltaïque au bâtiment**.

NOUVEAUX PROJETS P+D

- Onduleur UPS avec alimentation sans coupure: mise à l'épreuve de la pratique (étude du comportement dans la pratique, lors d'une coupure de courant, d'un onduleur UPS avec alimentation sans coupure, raccordé au réseau; direction: *Enecolo*) [50]
- Modules à cellules amorphes: dégradation et comportement du type 'recuit' (mesures et analyses portant sur l'installation CPT Solar, à modules intégrés en toiture plate; direction: *ISAAC*) [51]
- Installation Flexcell[®] expérimentale de 2 kW_c à cellules souples amorphes, intégrée à un élément de toiture 'Thermoform'; direction: *VHF-Technologies*) [52] (Fig. 11)

PROJETS P+D EN COURS

Parmi les projets en cours, relevons la performance du bâtiment scolaire Ekkharthof à Kreuzlingen, qui met en évidence les possibilités de ce concept de bâtiment à consommation d'énergie nulle (construction Minergie avec installation photovoltaïque et pompe à chaleur): le bilan énergétique de l'année 2007 est caractérisé par une production dépassant les prévisions et une consommation plus faible que prévue, si bien qu'en fin de compte, ce bâtiment est un producteur net d'énergie [53] (Fig. 12).

Les projets P+D en cours comprennent, dans l'ordre chronologique:

Installations

- Installation photovoltaïque du bâtiment scolaire Ekkharthof à consommation d'énergie nulle, à Kreuzlingen (intégration d'une installation PV au concept énergétique d'un bâtiment scolaire à consommation d'énergie nulle; direction: *Böhni Energie und Umwelt*) [53] (Fig. 12)
- Installation en toiture de la halle de gymnastique de Wiesendangen, avec des modules à cellules en couches minces (utilisation d'éléments de toiture BIOSOL XXL, constitués de modules UNI-Solar en couches minces combinés avec des cadres Solrif; direction: *Enecolo*) [54] (Fig. 13)
- Installation pilote Solight de 12 kW_c (mise en œuvre pilote de deux variantes Solight différentes; direction: *Energiebüro*) [55] (Fig. 14)

Campagne de mesures

- Campagne de mesures Wittigkofen (mesures détaillées et analyse, avec affichage des données, de l'installation de 80 kW_c de Berne-Wittigkofen montée en façade; direction: *Bureau d'ingénieurs Hostettler*) [56]

Etudes – Outils d'aide à la conception – Projets divers

- Statistique photovoltaïque suisse 2006 (direction: *Bureau d'ingénieurs Hostettler*) [57]



Figure 11: Toiture Flexcell expérimentale de 2 kW_c (Source: VHF-Technologies)



Figure 12: Le bâtiment scolaire Ekkharthof à Kreuzlingen, à consommation d'énergie nulle (Source: *Böhni Energie und Umwelt*)



Figure 13: Toiture de la halle de gymnastique de Wiesendangen (Source: *Enecolo*)



Figure 14: Deux variantes d'installation Solight (Source: *Energiebüro*)

PROJETS P+D ACHEVES EN 2007

Les projets P+D suivants ont été achevés en 2007 (dans l'ordre chronologique):

Installations

- Petites alimentations électriques autonomes à panneaux solaires et piles à combustible (exploitation pilote de petits systèmes PV autonomes, complétés par des piles à combustible, pour l'alimentation en autarcie d'équipements de mesurage éloignés de tout réseau; direction: *Muntwyler Energietechnik*) [58]
- Installation de 17.6 kW_c de l'EPFZ en toiture plate, avec des modules à cellules en couches minces (installation peu visible en toiture plate, à cellules amorphes; direction: *BE Netz*) [59]
- Nouveau système PV pour modules à cellules en couches minces à monter en façade (développement d'un système universel pour modules à cellules en couches minces, à monter en façade avec ou sans isolation thermique; direction: *Zagsolar / Wyss Aluhit*) [60]

6. Evaluation 2007 et perspectives 2008

A l'échelle du monde, 2007 a été pour le photovoltaïque une année fructueuse de plus. L'industrie du PV a pu continuer à se développer dans un marché dynamique en forte croissance. Le goulet d'étranglement que représente la disponibilité du silicium brut pour les cellules cristallines est toujours bien présent. Cette situation devrait cependant se détendre ces prochaines années, puisque des investissements destinés à accroître les capacités de production de silicium solaire sont en cours dans le monde entier. Malgré tout, le renversement de tendance s'est maintenu et le prix des installations complètes a continué à baisser en 2007. Parallèlement, à cause de cette situation tendue, une opportunité („*window of opportunity*“) se présente pour les cellules solaires en couches minces. En 2007, de nombreux projets industriels nouveaux ont été annoncés, totalisant une capacité de production d'environ 3 GW_c/an. Les premières unités de production d'une capacité annuelle dépassant le GW_c sont en discussion. Preuve en est, par exemple, les nouvelles grosses commandes reçues pendant l'année sous revue par *oerlikon solar* pour ses équipements de dépôt des cellules solaires en couches minces de silicium amorphe.

Grâce aux débats suscités par la loi sur l'approvisionnement en électricité et la promotion des énergies renouvelables que celle-ci prévoit, le photovoltaïque a occupé le devant de la scène en Suisse aussi. Les décisions prises en 2007 par le parlement fédéral laissent augurer, après de nombreuses années de stagnation, une amélioration du marché du photovoltaïque. La rétribution à prix coûtant du courant produit prendra effet en 2009. Bien que des limites quantitatives étroites aient été fixées à cette rétribution, elle devrait animer le marché suisse du photovoltaïque et donc aussi stimuler le développement technologique.

C'est aussi dans ce contexte qu'il faut juger la situation du photovoltaïque suisse: grâce à une large assise, la recherche et la technologie se sont placées jusqu'ici à un niveau élevé, en comparaison internationale également. Les nombreux projets CTI et européens témoignent de la mise en œuvre industrielle et d'une ouverture internationale. D'un autre côté, un marché intérieur encore en stagnation et le manque de moyens de financement pour les projets P+D sont des obstacles de taille pour la progression en Suisse même. Et pourtant, malgré ces conditions difficiles, on peut constater que l'activité industrielle s'accroît dans le domaine du PV en Suisse aussi. Une enquête a permis d'estimer les exportations de la branche en 2007 à 500 millions de francs au minimum. Si l'on tient compte en outre du marché intérieur, le chiffre d'affaires de cette industrie suisse se monte à 600 millions de francs au moins.

C'est surtout dans le domaine des cellules solaires en couches minces que la mise en œuvre des résultats de la recherche photovoltaïque suisse sous la forme de produits industriels a été couronnée de succès ces dernières années. Ces faits sont tout à fait dans la ligne du Programme et de ses objectifs à long terme. L'année sous revue a vu l'annonce de deux projets industriels concrets qui, pour la première fois, prévoient de produire des cellules solaires en couches minces aussi en Suisse à l'échelle industrielle: 25 MW à Yverdon chez *Flexcell (VHF-Technologies)* et 30 MW près de Locarno chez *Pramac*. Une autre piste laisse bien augurer, même si la situation se présente là de manière plus difficile: l'intégration du photovoltaïque au bâtiment; ce marché attend encore son heure de gloire, tant au plan national qu'international. Ceci pourrait toutefois changer ces prochaines années, puisque de

nouvelles conditions cadres sont mises en place en Suisse et dans quelques autres pays, notamment en France.

Ce sont les efforts consentis jusqu'ici par le Programme photovoltaïque suisse qui constituent le point de départ technique et scientifique permettant aux innovations et produits suisses d'être présents sur le marché du PV en rapide expansion. La longue expérience pratique acquise par la construction et l'exploitation de nombreuses installations PV est un savoir-faire grâce auquel les installations actuelles sont fiables et atteignent une productivité élevée (kWh/kW_c). Les conditions techniques préalables sont ainsi réunies pour assurer la compétitivité du photovoltaïque suisse avec ses produits et son savoir-faire technique et scientifique, sur le marché international également.

Comme jusqu'ici, le Programme photovoltaïque s'efforcera à l'avenir, par un financement largement diversifié, de conserver une taille critique. Pour cela, il recourra à toutes les sources de crédits possibles et les engagera simultanément, de manière optimale et bien ciblée. Le nouveau Plan directeur de la recherche énergétique 2008 – 2011 de la CORE définit les orientations de la recherche photovoltaïque à partir de 2008 [89]. Le plan directeur détaillé correspondant de la recherche photovoltaïque sera élaboré au début de 2008 et soumis à l'approbation de la CORE au cours de l'été. Il devra prendre en considération les développements les plus récents à l'échelle nationale et internationale et fixer en conséquence les priorités pour les prochaines années. Un échange de vues en profondeur est prévu avec les milieux de la recherche et de l'industrie pendant cette élaboration.

L'échange d'expériences et d'informations à l'échelle nationale est toujours d'actualité. Lucerne a accueilli en novembre 2007 le 7^e Symposium photovoltaïque national, avec un grand nombre de participants. Cette manifestation a été consacrée notamment aux nouvelles conditions cadres en Suisse pour le photovoltaïque, ce qui explique l'intérêt qu'elle a suscité. Le site Internet du photovoltaïque (<http://www.photovoltaiic.ch>) rassemble toutes les informations et rapports les plus importants; il est un outil essentiel de communication régulièrement mis à jour. En septembre, à Milan, le photovoltaïque suisse a été bien présent par ses contributions, lors de la 22^e Conférence européenne du photovoltaïque [90].

7. Liste des projets de recherche

(RA) Rapport annuel 2007 disponible

(RF) Rapport final disponible (Les rapports finaux peuvent être téléchargés à l'adresse www.energieforschung.ch - sous le numéro de projet indiqué)

Les rapports annuels et les rapports finaux peuvent être téléchargés un à un à l'adresse <http://www.photovoltaiic.ch>. De plus amples renseignements sont disponibles aux adresses Internet indiquées ci-après.

- [1] C. Ballif, J. Bailat, F.J. Haug, S. Fay, R. Tscharnner, (ballif@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **Thin film silicon solar cells: advanced processing and characterization** (RA, RF Projet 101'191) www.unine.ch/pv.
- [2] F.J. Haug, C. Ballif, (franz-josef.haug@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **Flexible photovoltaics: next generation high efficiency and low cost thin film silicon modules** (RA) www.unine.ch/pv.
- [3] S. Olibet, C. Ballif, (sara.olibet@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **High efficiency thin-film passivated silicon solar cells and modules - THIFIC: Thin film on crystalline Si** (RA) www.unine.ch/pv.
- [4] C. Ballif, F. J. Haug, V. Terrazzoni-Daudrix, (ballif@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **FLEXCELLENCE: Roll-to-roll technology for the production of high efficiency low cost thin film silicon photovoltaic modules** (RA) www.unine.ch/flex/
- [5] N. Wyrsh, C. Ballif, (Nicolas.wyrsh@unine.ch), IMT, UNI-Neuchâtel, Neuchâtel: **ATHLET: Advanced Thin Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics** (RA) <http://www.hmi.de/projects/athlet/> / www.unine.ch/pv.
- [6] A. Bidville, K. Wasmer, P. M. Nasch, M. Van der Meer, C. Ballif, J. Michler, (kilian.wasmer@empa.ch), Empa, Thun: **SIWIS: Ultra Thin Silicon Wafer Cutting by Multi-Wire Sawing** (RA) <http://www.empathun.ch>.
- [7] A. Dimitrov, P. Hoffmann, P. Nasch, (anne.dimitrov@hesge.ch), EIG / EPFL, Genève: **SIRE: Silicon recycling from wafering waste to produce reusable photovoltaic feedstock** (RA).
- [8] P. Nasch, S. Schneeberger, (stefan.schneeberger@amat.com), APPLIED MATERIALS SWITZERLAND, Cheseaux-sur-Lausanne: **BITHINK: Bifacial thin industrial multi-crystalline silicon solar cells** (RA) <http://www.hct.ch/> / <http://www.amat.com/>.
- [9] D. Brémaud, M. Kalin, A. N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: **Large Area flexible CIGS: Flexible CIGS solar cells on large area polymer foils with in-line deposition methods and application of alternative back contacts** (RA) <http://www.tfp.ethz.ch>.

- [10] A. N. Tiwari, M. Kälin, (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: **Thin Film CIGS Solar Cells with a Novel Low Cost Process** (RA) <http://www.tfp.ethz.ch>.
- [11] D. Brémaud, A. N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: **LARCIS: Large-Area CIS Based Thin-Film Solar Modules for Highly Productive Manufacturing** (RA) <http://www.tfp.ethz.ch>.
- [12] D. Brémaud, R. Verma, S. Bücheler, S. Seyrling, A. N. Tiwari, (tiwari@phys.ethz.ch), ETH, Zürich: **ATHLET: Advanced Thin-Film Technologies for Cost Effective Photovoltaics** (RA) <http://www.hmi.de/projects/athlet/> / <http://www.tfp.ethz.ch>.
- [13] M. Kaelin, (marc.kaelin@flisom.ch), FLISOM, Zürich: **Development of flexible CIGS Solar Modules with metal Grids** (RA) <http://www.flisom.ch>.
- [14] M. Grätzel, A. Mc Evoy, (michael.graetzel@epfl.ch), EPFL, Lausanne: **Dye-sensitised Nanocrystalline Solar Cells** (RA) <http://isic.epfl.ch/>.
- [15] ²Y.-H. Yum, ¹P. Walter, ¹S. Huber, ¹D. Rentsch, ¹T. Geiger, ¹F. Nüesch, ¹F. De Angelis, ²M. Grätzel, ²M. K. Nazeeruddin, (frank.nueesch@empa.ch), ¹EMPA, Dübendorf, ²EPFL, Lausanne: **ThinPV - Efficient Far Red sensitization of Nanocrystalline TiO₂ films by an unsymmetrical squaraine dye** (RA) <http://www.empa.ch>
- [16] ¹B. Fan, ¹R. Hany, ¹F. Nüesch, ²J.-E. Moser, (frank.nueesch@empa.ch), ¹EMPA, Dübendorf, ²EPFL, Lausanne: **ThinPV - Doping of cyanine solar cells: enhancing charge transport** (RA) <http://www.empa.ch>
- [17] F. Nüesch, (frank.nueesch@empa.ch), EMPA, Dübendorf: **Transparent and Flexible Solar Cell Electrodes made from Precision Fabric** <http://www.empa.ch>
- [18] T. Meyer, A. Meyer, (toby@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum** (RA) <http://www.fullspectrum-eu.org/> / www.solaronix.com
- [19] T. Meyer, (toby@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **ORGAPVNET: Coordination Action towards stable and low-cost organic solar cell technologies and their application** (RA) www.solaronix.com
- [20] T. Meyer, A. Meyer, (toby@solaronix.com), SOLARONIX, Aubonne: **NAPOLYDE: Nano structured polymer deposition processes for mass production of innovative systems for energy production & control and for smart devices** (RA) <http://www.napolyde.org/> / <http://www.solaronix.com>.
- [21] M. Spirig, A. Luzzi, (info@solarenergy.ch), INSTITUT FÜR SOLARTECHNIK SPF, Rapperswil: **PECNet: Aufbau eines Schweizer Kompetenznetzwerks für die Solare Wasserspaltung mittels hybrider PV-PEC Zellen** (RA) <http://www.solarenergy.ch>.
- [22] T. Szacsavay, (sz@3-s.ch), 3S, Lyss: **BIPV-CIS- Improved integration of PV into existing buildings by using thin film modules for retrofit** (RA) <http://www.3-s.ch>.
- [23] D. Chianese, A. Bernasconi, N. Cereghetti, A. Realini, G. Friesen, E. Burà, I. Pola, K. Nagel, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: **Centrale di test ISAAC-TISO: Qualità e resa energetica di moduli fotovoltaici** (RA) <http://www.isaac.supsi.ch>
- [24] G. Friesen, (gabi.friesen@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: **PERFORMANCE - ISAAC Activities** (RA) <http://www.pv-performance.org/> / www.isaac.supsi.ch.
- [25] ¹W. Durisch, ¹J.-C. Mayor, ²King Hang Lam, (wilhelm.durisch@psi.ch), ¹PSI, Villigen, ²University of Hong Kong: **Wirkungsgrad und jährliche Stromproduktion von Photovoltaikmodulen** (RA, RF Projet 101'431) <http://www.psi.ch/>
- [26] H. Häberlin, L. Borgna, D. Gfeller, M. Kämpfer, U. Zwahlen, (heinrich.haeblerlin@bfh.ch), BERNER FACHHOCHSCHULE, Burgdorf: **Photovoltaik Systemtechnik 2007-2010 (PVSYSTE 07-10)** (RA) <http://www.pvtest.ch>.
- [27] ¹P. Toggweiler, ¹S. Stettler, ²P. Felder, (info@enecolo.ch), ¹ENECOLO, Mönchaltorf, ²SPUTNIK ENGINEERING, Biel: **Solar Inverter mit integriertem BackUp SIMIBU** (RA) <http://www.solarstrom.ch>.
- [28] P. Gaillard, (pgaillard@maxwell.com), MAXWELL TECHNOLOGIES, Rossens: **SOS-PVI: Security of Supply Photovoltaic Inverter** (RA) <http://www.maxwell.com>
- [29] S. Stettler, P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **PV-BUK - Betriebs- und Unterhaltskosten von PV-Anlagen** (RA) <http://www.solarstrom.ch>.
- [30] N. Jungbluth, M. Tuchs Schmid, (jungbluth@esu-services.ch), ESU-SERVICES, Uster: **Update Photovoltaic in view of ecoinvent data v2.0** (RA, RF Projet 101'805) <http://www.esu-services.ch>.
- [31] N. Jungbluth, (jungbluth@esu-services.ch), ESU-SERVICES, Uster: **Schweizer Beitrag IEA PVPS Programm Task 12 - Umwelt-, Sicherheits- und Gesundheitsaspekte** <http://www.esu-services.ch>.
- [32] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **ENVISOLAR - Environmental Information Services for Solar Energy Industries** (RF) <http://www.envisolar.com/> / <http://www.solarstrom.ch>.
- [33] A. Schüler, A. Kostro, B. Huriet, (andreas.schueler@epfl.ch), EPFL - LESO-PB, Lausanne: **Evaluation du potentiel de concentrateurs à Quantum Dots pour la production d'électricité photovoltaïque** (RA, RF Projet 101'806) <http://lesowww.epfl.ch>.
- [34] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **Center of competence for building integrated solar installations** (RA) <http://www.zagsolar.ch>
- [35] W. Durisch, (wilhelm.durisch@psi.ch), PSI, Villigen: **FULLSPECTRUM: A new PV wave making more efficient use of the solar spectrum** <http://www.fullspectrum-eu.org/> / <http://www.psi.ch/>
- [36] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com), SOLAR IMPULSE, Lausanne: **Solarimpulse** <http://www.solar-impulse.com>.
- [37] R. Domjan, (info@planetsolar.org), PLANETSOLAR, Neuchâtel: **PlanetSolar** <http://www.planetsolar.org/>.
- [38] A. Borschberg, (andre.borschberg@solarimpulse.com), SOLAR IMPULSE, Lausanne: **Ultralight Photovoltaic Structures** <http://www.solar-impulse.com>.
- [39] L. Palmer, (solartaxi@gmail.com) **Solartaxi** <http://www.solartaxi.com>

- [40] P. Hüsser, (pius.huesser@novaenergie.ch), NOVA ENERGIE, Aarau: **Schweizer Beitrag zum IEA PVPS Programm - Task 1** (RA) www.iea-pvps.org / <http://www.novaenergie.ch/>.
- [41] Th. Nordmann, L. Clavadetscher, (nordmann@tnc.ch), TNC CONSULTING, Erlenbach: **IEA PVPS Programm Task 2 Schweizer Beitrag 2007** (RA) <http://www.tnc.ch>.
- [42] S. Nowak, (stefan.nowak@netenergy.ch), NET, St. Ursen: **REPIC: Renewable Energy Promotion in International Co-operation** (RA) <http://www.repic.ch>
- [43] P. Renaud, P. Bonhôte, (pierre.renaud@planair.ch), Planair, La Sagne: **IEA PVPS Task 10 – Swiss contribution** (RA) <http://www.planair.ch>.
- [44] H. Barth, Sputnik, *Biel: IEA PVPS Task 11 : Hybride Photovoltaik Systemen in Mininetzen*
- [45] J. Remund, M. Rindlisbacher, D. Domeisen (remund@meteotest.ch), METEOTEST, Bern: **IEA SHC Task 36: Solar resource knowledge management** (RA) <http://www.meteotest.ch>.
- [46] P. Ineichen, (pierre.ineichen@cuepe.unige.ch), CUEPE, Genève: **Solar Resource Management, IEA Solar Heating & Cooling Programme, Task 36** <http://www.unige.ch/cuepe>.
- [47] M. Real, T. Hostettler, (alphareal@access.ch), SWISSOLAR, Zürich: **Normenarbeit für PV Systeme** (RA) <http://www.swissolar.ch>.
- [48] ¹S. Nowak, ¹M. Gutschner, ¹S. Gnos; ²U. Wolfer, (stefan.nowak@netenergy.ch), ¹NET, St. Ursen, ²BFE, Ittigen: **PV-ERA-NET: Networking and Integration of National and Regional Programmes in the Field of Photovoltaic (PV) Solar Energy Research and Technological Development (RTD) in the European Research Area (ERA)** (RA) <http://www.pv-era.net> / <http://www.netenergy.ch>.

8. Liste des Projets P+D

(RA) Rapport annuel 2007 disponible

(RF) Rapport final disponible (Les rapports finaux peuvent être téléchargés à l'adresse www.energieforschung.ch - sous le numéro de projet indiqué)

Les rapports annuels et les rapports finaux peuvent être téléchargés un à un à l'adresse <http://www.photovoltaique.ch>. De plus amples renseignements sont disponibles aux adresses Internet indiquées ci-après.

- [49] D. Chianese, I. Pola, E. Burà, A. Bernasconi, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: **Flat roof integration CPT solar** (RA, RF Projet 100'493) <http://www.isaac.supsi.ch>
- [50] P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **Praxistest Backup Wechselrichter** <http://www.solarstrom.ch>.
- [51] D. Chianese, (domenico.chianese@supsi.ch), SUPSI, DACD, ISAAC-TISO, Canobbio: **Degradations- und Annealingverhalten von Modulen mit amorphen Zellen** <http://www.isaac.supsi.ch>.
- [52] P. Goulpié, D. Fisher, (pascal.goulpie@flexcell.com), VHF-TECHNOLOGIES, Yverdon, **Toiture expérimentale 2kW Flexcell** (RA) <http://www.flexcell.ch>
- [53] Th. Böhni, J. Rümmele, (boehni@euu.ch), BÖHNI ENERGIE UND UMWELT, Frauenfeld: **Nullenergieschulhaus Heilpädagogisches Zentrum Ekkharthof Kreuzlingen** (RA) <http://www.euu.ch>.
- [54] S. Stettler, P. Toggweiler, (info@enecolo.ch), ENECOLO, Mönchaltorf: **Dachintegration mit amorphen Dünnschichtzellen Turnhalle Wiesendangen** (RA) <http://www.solarstrom.ch>.
- [55] Ch. Meier, R. Frei, (info@energieburo.ch), ENERGIEBÜRO, Zürich: **Preparation and Realisation of the Test- and Pilot Installation SOLIGHT** (RA) <http://www.energieburo.ch>.
- [56] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, Bern: **Messkampagne Wittigkofen**
- [57] Th. Hostettler (Hostettler_Engineering@Compuserve.com), INGENIEURBÜRO HOSTETTLER, Bern: **Photovoltaic Energy Statistics of Switzerland 2006** (RA)
- [58] U. Muntwyler, (muntwyler@solarcenter.ch), MUNTWYLER ENERGIETECHNIK, Zollikofen: **Autonome Stromversorgung mit Photovoltaik und Brennstoffzellen** <http://www.solarcenter.ch>.
- [59] P. Schudel, A. Kottmann, (info@benetz.ch), BE NETZ, Luzern: **17.6 kWp Installation with Thin-Film-Modules on the Flat Roof at the CNB-Building of the ETHZ** (RA, RF Projet 100'176) <http://www.benetz.ch>.
- [60] R. Durot, (r.durot@zagsolar.ch), ZAGSOLAR, Kriens: **Photovoltaic- Façade, Mounting System for Thin-Film-Modules** (RA) <http://www.zagsolar.ch>.

9. Bibliographie

- [61] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2004 bis 2007**, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2004, <http://www.energieforschung.ch>.
- [62] **Forschungskonzept Photovoltaik 2004 – 2007**, Bundesamt für Energie, 2005, <http://www.photovoltai.ch>.
- [63] **Strategic Research Agenda for Photovoltaic Solar Energy Technology**, The European Photovoltaic Technology Platform, 2007, http://www.eupvplatform.org/fileadmin/Documents/PVPT_SRA_Complete_070604.pdf
- [64] **Qualitätsanforderungen an PV-Module**, Willi Vaaßen, TÜV Rheinland, 2008, Vortrag 12. Fachkongress Zukunftsenergien, NRW, <http://www.energieagentur.nrw.de/database/data/datainfopool/FK2008-B3Vaassen.pdf>
- [65] **Ecoinvent** Datenbank, <http://www.ecoinvent.org>
- [66] <http://www.envisolar.com>, http://www.envisolar.com/factsheets/Envisolar_brochure.pdf
- [67] <http://www.spvce.ch>.
- [68] **Annual Report 2007**, IEA PVPS, 2008, <http://www.iea-pvps.org/>.
- [69] **National Survey Report on PV Power Applications in Switzerland 2006**, P. Hüsler, (pius.huessler@novaenergie.ch), Nova Energie, Mai 2007.
- [70] **Trends in Photovoltaic Applications in selected IEA countries between 1992 and 2006**, IEA PVPS Task 1–16:2007, <http://www.iea-pvps.org>.
- [71] **Nachhaltigkeitsstudie – Solarenergie 2007**, M. Fawer-Wasser, Sarasin, November 2007
- [72] **Workshop PVPS@PVSEC-17- Status of PV in the Asia-Pacific Region**, 6th December 2007, Fukuoka, Japan, <http://www.iea-pvps.org/>
- [73] **IEA PVPS Newsletter**, zu beziehen bei Nova Energie, Schachenallee 29, 5000 Aarau, Fax 062 834 03 23, (pius.huessler@novaenergie.ch).
- [74] <http://www.iea-pvps.org>
- [75] **Performance Database**, IEA PVPS Task 2, May 2007, download: <http://www.iea-pvps-task2.org>
- [76] **Cost and Performance Trends in Grid-connected Photovoltaic Systems and Case Studies**, Report IEA-PVPS Task 2-06:2007, December 2007, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [77] **Long-Term Reliability of Photovoltaic Systems, Deutschland und Österreich**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [78] **User Perceptions of Photovoltaic System Performance, Japan**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [79] **Performance Prediction of Grid-connected Photovoltaic Systems Using Remote Sensing, Kanada und Frankreich**, Report IEA-PVPS Task 2, <http://www.iea-pvps-task2.org>.
- [80] <http://www.repic.ch>
- [81] <http://www.pvupscale.org>
- [82] **Country Specific Added Value Analysis of PV Systems**, IEA PVPS Task 10-02-2008, January 2008, <http://www.iea-pvps.org>
- [83] **Urban BIPV in the New Residential Construction Industry**, IEA PVPS Task 10-03-2008, January 2008, <http://www.iea-pvps.org>
- [84] **Examples of community-scale PV installation in urban area: PV community database**, IEA PVPS Task 10-04-2008, January 2008, <http://www.iea-pvps.org>
- [85] **Schweizer Nationalkomitee - Technische Fachkommission TK 82**, Kontakt: Electrosuisse, Sekretär des TK 82, Herrn Josef Schmucki (Josef.Schmucki@electrosuisse.ch, 044 956 11 74), Vorsitzenden des TK 82, Herrn Peter Toggweiler (Peter.Toggweiler@enecolo.ch, 044 994 90 01).
- [86] http://ec.europa.eu/research/fp6/index_en.cfm?p=9_eranet.
- [87] <http://www.eupvplatform.org>.
- [88] **European Strategic Energy Technology Plan (SET Plan)**, http://ec.europa.eu/energy/res/setplan/index_en.htm
- [89] **Konzept der Energieforschung des Bundes 2008 bis 2011**, Eidgenössische Energieforschungskommission CORE, 2007, <http://www.energieforschung.ch>.
- [90] **Die 22th European Photovoltaic Solar Energy Conference & Exhibition Mailand 03. - 07.09.2007 aus Schweizer Sicht**, zu beziehen bei der Programmleitung Photovoltaik, c/o NET, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, info@netenergy.ch, <http://www.photovoltai.ch>.

10. Informations complémentaires

La direction du programme vous renseigne volontiers:

Dr. Stefan Nowak, NET Nowak Energie & Technologie SA, Waldweg 8, 1717 St. Ursen, Suisse
Tél. ++41 (0) 26 494 00 30, Fax ++41 (0) 26 494 00 34, Email: stefan.nowak@netenergy.ch

Rédaction du rapport annuel: Manuela Schmied Brügger, Stephan Gnos,
NET Nowak Energie & Technologie SA, info@netenergy.ch

Traduction: J.-M. Suter, Suter Consulting, Aarstrasse 98, 3005 Berne, Suisse

11. Abréviations utilisées et sites Internet

Termes généraux

EPF Ecole Polytechnique Fédérale

Institutions nationales

AES	Association des entreprises électriques suisses	http://www.strom.ch
CCEM	Competence Center for Energy and Mobility	http://www.ccem.ch
CEI	Commission Electrotechnique Internationale	http://www.iec.ch
CORE	Commission fédérale pour la recherche énergétique	http://www.bfe.admin.ch
CRPP	Centre de Recherche en Physique des Plasmas EPFL	http://crppwww.epfl.ch
CTI	Agence pour la promotion de l'innovation	http://www.kti-cti.ch
CSEM	Centre Suisse d'Electronique et de Microtechnique SA	http://www.csem.ch
CUEPE	Université de Genève - Groupe Energie	http://www.unige.ch/cuepe
DACD SUPSI	Architecture Construction and Design Departement	http://www.dacd.supsi.ch
DDC	Direction du développement et de la coopération	http://www.deza.admin.ch
EPFL	Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne	http://www.epfl.ch
EPFZ	Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich	http://www.ethz.ch
HESB-TI	Haute école spécialisée bernoise - Technique et informatique	http://www.ti.bfh.ch
HSR	Haute école Technique Rapperswil	http://www.hsr.ch
HTI Berthoud	Haute école Technique et Informatique Berthoud	www.hti.bfh.ch
IMT	Institut de Microtechnique Université de Neuchâtel	http://www2.unine.ch/imt
ISIC	Institute of Chemical Sciences and Engineering	http://isic.epfl.ch
ISAAC	Institute for Applied Sustainability to the Built Environment	http://www.isaac.supsi.ch
LESO	Laboratoire d'Energie solaire et de physique du bâtiment	http://leso.epfl.ch
LFEM	Laboratoire fédéral d'essai des matériaux et de recherche	http://www.empa.ch
NTB	Haute école Technique Buchs	http://www.ntb.ch
OFEN	Office fédéral de l'énergie	http://www.ofen.admin.ch
OFEV	Office fédéral de l'environnement	http://www.bafu.admin.ch
PSI	Paul Scherer Institut	http://www.psi.ch
SER	Secrétariat d'Etat à l'éducation et à la recherche	http://www.sbf.admin.ch
SECO	Secrétariat d'Etat à l'économie	http://www.seco.admin.ch
SUPSI	Scuola universitaria professionale della Svizzera Italiana	http://www.supsi.ch

Organisations internationales

AIE	Agence internationale de l'énergie	http://www.iea.org
AIE SHC	IEA Solar Heating and Cooling	http://www.iea-shc.org
AIE PACES	SolarPACES	http://www.solarpaces.org
AIE PVPS	Photovoltaic Power Systems Implementing Agreement (IEA)	http://www.iea-pvps.org
EMPA	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt	http://www.empa.ch
ESA	European Space Agency	http://www.esa.int
FEM	Le Fonds pour l'environnement mondial	http://www.gefweb.org
GTZ	Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit	http://www.gtz.de
IEA SHC	IEA Solar Heating and Cooling	http://www.iea-shc.org
IEA PACES	SolarPACES	http://www.solarpaces.org
IEA PVPS	Photovoltaic Power Systems Implementing Agreement (IEA)	http://www.iea-pvps.org
IFC	International Finance Corporation	http://www.ifc.org
KfW	Kreditanstalt für Wiederaufbau	http://www.kfw.de
UE (RTD)	Union Européenne (Programme cadre de RTD) Service Communautaire d'Information sur la Recherche et le Développement	http://www.cordis.lu
REEEP	Renewable energy & energy efficiency partnership	http://www.reeep.org
UNDP	United Nations Development Programme	http://www.undp.org
UNEP	United Nations Environment Programme	http://www.unep.org

12. Sites Internet complémentaires

	Photovoltaïque suisse	http://www.photovoltaiic.ch
	SuisseEnergie	http://www.suisse-energie.ch
	Recherche énergétique de la Confédération	http://www.recherche-energetique.ch
FNS	Fond National Suisse	http://www.snf.ch
Conseil des EPF	Conseil des écoles polytechniques fédérales	http://www.ethrat.ch
OFS	Office fédéral de la statistique	http://www.bfs.admin.ch
IGE	Institut Fédéral de la Propriété Intellectuelle	http://www.ige.ch
METAS	Office fédéral de métrologie et d'accréditation	http://www.metas.ch
Swissolar	Association suisse de l'énergie solaire	http://www.swissolar.ch
SSES	Société suisse pour l'énergie solaire	http://www.sses.ch
	US Department of Energy	http://www.eere.energy.gov/solar
ISES	International Solar Energy Society	http://www.ises.org
ESRA	European Solar Radiation Atlas	http://www.helioclim.net/esra