



Les systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment

L'intégration des systèmes photovoltaïques dans l'habitat et leur connexion directe au réseau électrique constituent une solution en plein essor qui ouvre de nouvelles perspectives, autres que la seule production d'électricité, à l'utilisation de l'énergie solaire dans les pays développés.

Exemple d'intégration architecturale de générateurs photovoltaïques sous forme de panneaux "brise-soleil" à l'Institut de science et génie des matériaux et des procédés du CNRS (IMP-CNRS), à Perpignan. Capable de produire 15 000 kWh/an, l'installation est raccordée au réseau EDF.



Patrick Weiler/Ademe 2003

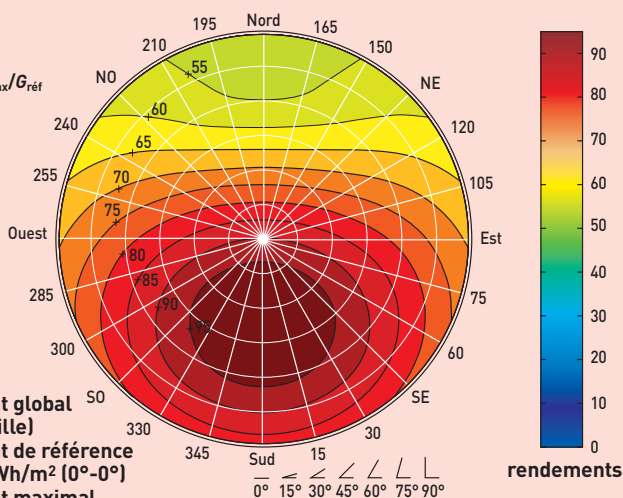
Le système photovoltaïque est l'interface entre l'utilisateur et la ressource. Il "met en forme" l'énergie captée par les **modules photovoltaïques** selon les types d'applications. Dans le cas des systèmes intégrés

au bâtiment, en plus d'une association de modules, un onduleur permet de convertir le courant continu en courant alternatif pour une utilisation sur le réseau électrique. L'utilisateur peut alors consommer l'énergie qu'il produit, indifféremment, pour des applications spécifiques comme l'alimentation d'une climatisation, ou la réinjecter dans le réseau électrique si, par exemple, les conditions de rachat par l'exploitant du réseau lui sont favorables. L'arrêt du 13 mars 2003 fixe le prix de rachat du **kilowattheure** photovoltaïque à 0,1525 € en France métropolitaine et à 0,3050 € en Corse et dans les départements d'outre-mer (DOM).

disque solaire Lyon

rendement - $G_{max}/G_{réf}$
 100% - 1,11
 95% - 1,05
 90% - 1,00
 85% - 0,94
 80% - 0,89
 75% - 0,83
 70% - 0,78
 65% - 0,72
 60% - 0,67

ensoleillement global
 albédo 0,15 (ville)
 ensoleillement de référence
 $G_{réf} = 1191 \text{ kWh/m}^2 (0^\circ-0^\circ)$
 ensoleillement maximal
 $G_{max} = 1321 \text{ kWh/m}^2$ pour une orientation de 0° et une inclinaison de 38°



CEA

Figure 1. Diagramme simplifié illustrant le compromis entre performance et intégration d'un générateur photovoltaïque en fonction de son inclinaison (les cercles concentriques correspondent à des incréments de 15° de 0° à 90°) et de son orientation pour un lieu donné, ici Lyon. Il met en évidence, par rapport au maximum théorique (orientation Sud et inclinaison de 38°), la décroissance des rendements (échelle de couleurs) liée à une orientation et une inclinaison non optimales.

Optimiser le critère performance/intégration

Derrière la simplicité apparente du dispositif, l'optimisation du critère performance/intégration est aujourd'hui privilégiée. Elle garantit en toute sécurité, à la fois à l'utilisateur et à l'exploitant du réseau, une production d'électricité solaire annuelle, et donc un retour sur investissement, tout en favorisant les solutions d'intégration qui permettent de substituer les panneaux photovoltaïques à d'autres éléments du bâtiment (tuiles, parapets, éléments décoratifs de façades...), diminuant ainsi le coût global du système installé. Des architectures et des intégrations qui préservent les expositions en face Sud du générateur photovoltaïque seront ainsi privilégiées (figure 1).

Un marché mondial en plein essor

Les pays les plus avancés dans le domaine de l'intégration du photovoltaïque dans l'habitat sont le Japon (puissance installée de 638 MW en fin d'année 2002), l'Allemagne (puissance installée de 277 MW en 2002), suivis par de nouveaux promoteurs de cette forme de valorisation de l'électricité solaire : États-Unis (212 MW), Pays-Bas (26,5 MW), Espagne, Suisse... Le marché mondial des systèmes connectés au réseau a, en 2000, dépassé en volume le marché des systèmes isolés et représente aujourd'hui une puissance installée de près de 1 800 MW (estimation 2003). La puissance installée en France, en 2002, s'établissait à 17 MW (chiffres AIE PVPS). L'objectif de la **Commission européenne** est d'atteindre 3 GW d'ici 2010.

Les axes de recherche pour réduire les coûts

Les axes de recherche et de développement portant sur les systèmes intégrés au bâtiment visent principalement la baisse des prix de revient et l'élargissement des services rendus. Cette diminution des prix s'obtient en jouant sur les couples coûts/performances des composants constituant le système mais aussi sur des facteurs plus globaux d'architecture de ces systèmes, de gestion des flux d'énergie et de procédés d'intégration.

Dans l'ordre d'importance des coûts d'investissement initiaux d'un système photovoltaïque intégré à l'habitat, en toiture par exemple, c'est-à-dire à la place des tuiles, le générateur photovoltaïque représente en moyenne 60 %, l'onduleur 10 à 15 %, les autres composants électroniques de sécurité et de suivi 10 %, l'intégration représentant en moyenne 20 % du coût global et pouvant atteindre 50 % pour les cas les plus difficiles. La substitution des tuiles par des modules photovoltaïques permet de réduire de 10 à 30 % le coût global.

La recherche sur les modules photovoltaïques a des retombées directes sur les coûts des systèmes connectés au réseau tant en termes d'augmentation des performances et du **rendement de conversion des cellules** (plus de puissance pour un prix constant), qu'en termes de diminution des prix de production en travaillant sur les procédés de fabrication (module photovoltaïque moins cher à puissance équivalente, voir *Des cellules de haute technologie pour des modules moins chers*, p. 116). Il est raisonnable aujourd'hui d'estimer qu'il existe une marge de gain permettant de réduire de 30 % le coût d'un système complet. Sur les autres composants, il s'agit de minimiser les pertes de conversion. Les onduleurs dits *solaires* sont bien plus performants que les onduleurs standard. Leur rendement dépasse 95 % pour une consommation à vide⁽¹⁾ de quelques pour cent de leur puissance nominale, alors que le rendement des onduleurs pour alimentation sans interruption dépasse à peine 80 % pour une consommation à vide supérieure d'un ordre de grandeur. Le prix est en conséquence.

(1) Consommation à vide : consommation propre de l'onduleur en état de marche (et non de veille).



Oliver Sébar/Ademe 2000



IEA-pvps.org/Apex-BP Solar



STMicroelectronics



Oliver Sébar/Ademe



Solarte

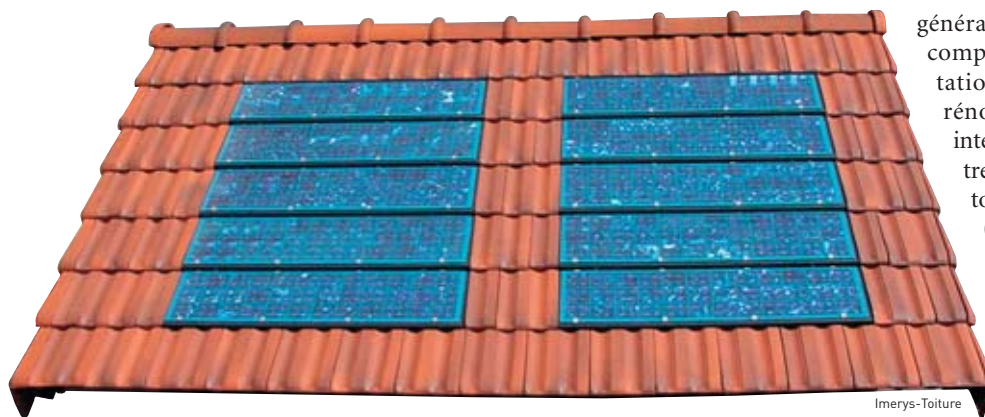
Types d'intégration du solaire photovoltaïque au bâtiment : en toiture (ensemble pavillonnaire aux Pays-Bas dans la ville nouvelle de Nieuwland) ; en auvent de terrasse (système photovoltaïque de 4 kW intégré au réseau dans une villa sur l'île de la Réunion) ; en façade (bâtiment de STMicroelectronics à Grenoble dans l'Isère) ; en toiture en association avec des matériaux durables comme le bois et le verre (Maison des énergies à Saint-Alban-Leyse en Savoie) ; en éléments de paroi (210 modules photovoltaïques produisant 9 000 kWh/an équipent la nouvelle Maison du tourisme à Alès dans le Gard).

Les moyens d'action et les réponses techniques

Dans le cas des systèmes complets, les principaux leviers technologiques qui guident les actions de recherche sont essentiellement de trois ordres.

L'intégration des systèmes au réseau électrique

Le premier levier correspond à l'intégration des systèmes au réseau électrique. À court et moyen terme, c'est l'un des moyens d'action les plus efficaces. Les recherches consistent à développer des dispositifs électroniques de conversion assurant une qualité de connexion au réseau irréprochable, permettant au système de se déconnecter automatiquement en cas de défaillance, afin de ne pas maintenir en tension la branche du réseau auquel il est raccordé. Elles visent aussi à utiliser au mieux les flux d'énergie de tous les composants, en tentant de faire produire les modules photovoltaïques au plus près de leur puissance maximale, de concevoir des onduleurs ayant des rendements élevés sur des plages d'ensoleillement élargies. Vue du côté de l'exploitant du réseau électrique, la généralisation massive de ce type de générateurs sur le réseau électrique constitue une crainte vis-à-vis de la gestion de la qualité du réseau (délestage, tension et fréquence). Ceci n'est pas spécifique à l'électricité solaire



Tuiles solaires photovoltaïques Imerys-Toiture conçues pour s'intégrer au mieux aux toitures traditionnelles. Elles peuvent être mises en place par les couvreurs habituels.

générateur photovoltaïque comme un composant à part entière d'une habitation, tant pour le neuf que pour la rénovation. Une étude de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) montre que le potentiel d'intégration sur toiture des systèmes photovoltaïques (où la surface totale des toits serait équipée d'un générateur photovoltaïque respectant le compromis performance/architecture) est de l'ordre de 30 à 40% pour les différents pays européens (figure 2), préfigurant ce que pourrait être un urbanisme solaire à l'échelle d'une ville ou d'une zone d'aménagement complète.

mais revêt une importance particulière avec l'avènement de sources d'énergie décentralisées de nature différente (éolien, hydraulique, solaire, microturbinés, groupes électrogènes...) et de petite taille (de quelques kW à quelques MW). Des projets européens, visant à développer de nouveaux concepts de réseaux de distribution électrique, ont démarré dès l'année 2000. Le Laboratoire intégration systèmes (CEA/LIS) en est un des participants. Ces nouveaux concepts seraient un peu à l'image de ce qu'est l'Internet pour le secteur des télécommunications : tout le monde pourrait se connecter n'importe où et n'importe quand. Cela passe non seulement par une meilleure connaissance de la fiabilité du système et la mise en place de dispositifs de communication, de surveillance et d'aide à l'utilisateur, mais aussi par une certaine standardisation des composants et une approche d'assurance de la qualité et de normalisation de plus en plus présente. Une partie des études du LIS est consacrée à l'élaboration des normes internationales de tests des systèmes photovoltaïques.

L'intégration à l'habitat

Le deuxième levier concerne l'intégration à l'habitat. À moyen terme, cette solution semble la plus prometteuse. Il s'agit, par exemple, de réduire les phases d'installation grâce à des dispositifs permettant à l'industrie du bâtiment de s'approprier le

L'architecture globale du système dans son environnement

Le troisième levier s'exerce sur l'architecture globale du système dans son environnement. C'est certainement le point le plus innovant, qui donnera le jour à des produits dont l'architecture sera éloignée de celle des premiers systèmes. Les recherches consistent à combiner les différentes solutions apportées par les systèmes photovoltaïques (toits mais aussi brise-soleil, vérandas ayant des impacts sur le confort thermique et l'ambiance lumineuse du bâtiment dans son ensemble). La mise en œuvre de méthodes de gestion globales au bâtiment, tant au niveau de son enveloppe externe que de son confort interne, et de méthodes "prédictives", c'est-à-dire visant à prévoir l'état futur des ressources ou du système, constitue aujourd'hui un axe important des études menées au LIS.

Des produits de plus en plus diversifiés sont en cours de développement pour permettre une intégration plus simple et modulaire dans les bâtiments : tuiles, ardoises ou couvertures "solaires", fenêtres de toit ou de façade semi-transparentes, et même des composants multifonctionnels assurant simultanément une ou plusieurs des fonctions telles que rigidité mécanique du bâtiment, isolation, protection solaire, climatisation, communication, captation de l'énergie thermique et production d'électricité photovoltaïque. Aujourd'hui l'optimum technico-économique d'un système mixte thermique-photovoltaïque, c'est-à-dire capable de produire à la fois de la chaleur et de l'électricité, est constitué de la mise en place d'un dispositif solaire thermique à côté d'un dispositif photovoltaïque. Un tel système occupe donc plus de place. Le LIS, en association avec le Laboratoire échangeur thermique (LETh), étudie des solutions hybrides qui combinent les deux dispositifs, offrant la possibilité de rendre techniquement performante et économiquement rentable une **cogénération** 100% solaire.

Les réponses techniques permettront au produit final de mieux correspondre aux besoins d'ensemble, voire de trouver de nouvelles applications. Si les améliorations apportées aux systèmes complets sont plutôt liées au processus d'innovation technologique, les gains pressentis dans le domaine de la conversion photovoltaïque sont du ressort de la recherche amont.

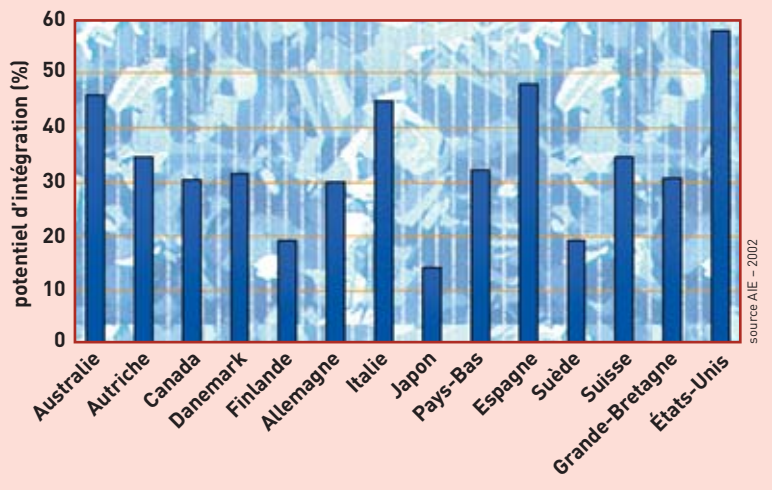


Figure 2. Potentiel d'intégration des toits solaires dans les pays les plus avancés dans le domaine de l'intégration du photovoltaïque dans l'habitat. Le pourcentage pour la France serait de l'ordre de 35%.

> Pascal Boulanger
 Direction de la recherche technologique
 CEA centre de Grenoble