



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

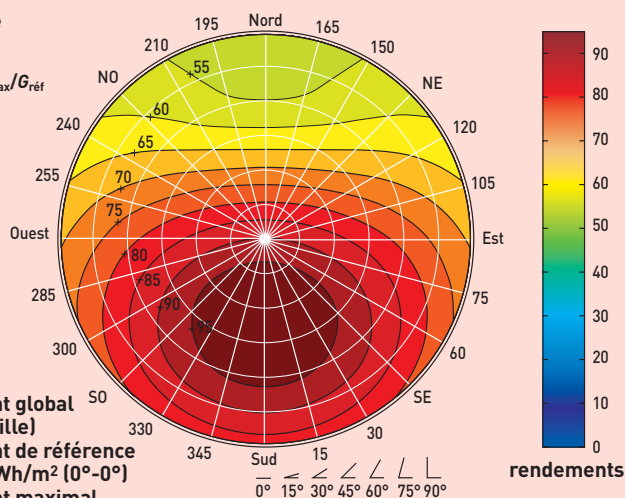
ensoleillement global albédo 0,15 (ville)

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).



Olivier Sébar/Ademe 2000



IEA-pvps.org/Apex-BP Solar



STMicroelectronics



Olivier Sébar/Ademe



Solarte

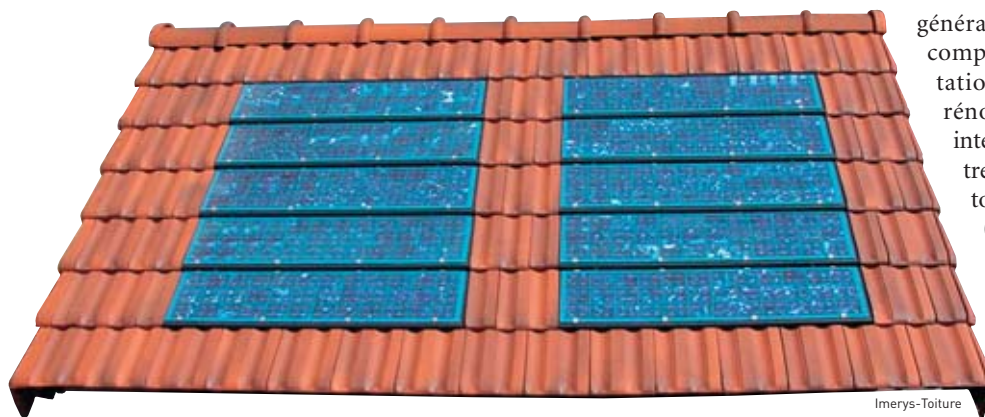
Types d'intégration du solaire photovoltaïque au bâtiment : en toiture (ensemble pavillonnaire aux Pays-Bas dans la ville nouvelle de Nieuwland) ; en auvent de terrasse (système photovoltaïque de 4 kW intégré au réseau dans une villa sur l'île de la Réunion) ; en façade (bâtiment de STMicroelectronics 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.

mais revêt une importance particulière avec l'avènement de sources d'énergie décentralisées de nature différente (éolien, hydraulique, solaire, microturbines, 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

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.

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.

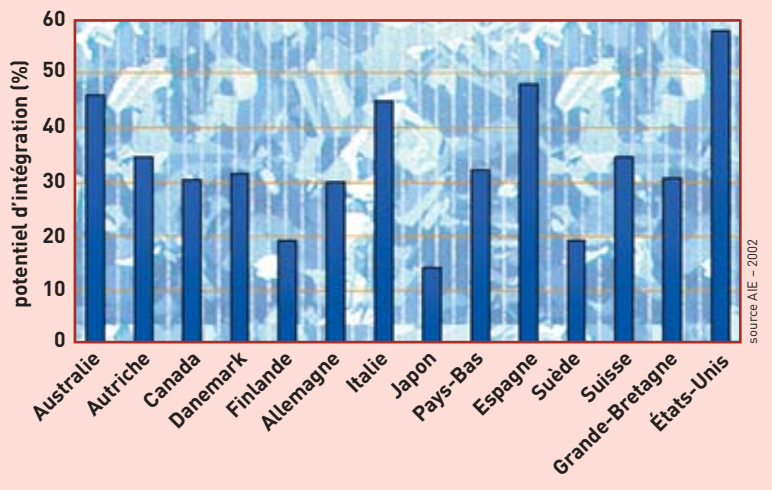


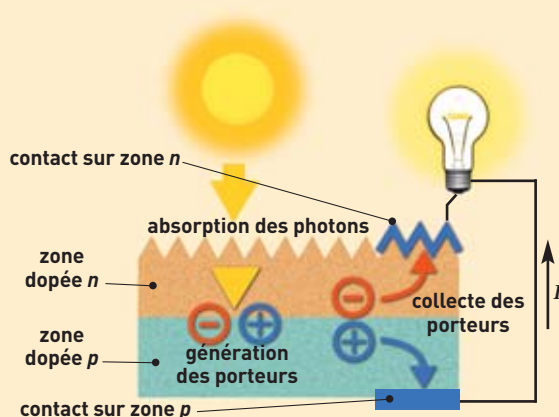
Figure 2. Potentiel d'intégration des toits solaires dans les pays les plus avancés dans le domaine de l'intégration du photovoltaïque dans l'habitat. Le pourcentage pour la France serait de l'ordre de 35%.

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

D Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque ?

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites

respectivement *dopée de type n* et *dopée de type p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone *p*. Une jonction (dite *p-n*) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones *n* et *p*, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi



un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone *n* rejoignent les trous de la zone *p* via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel : le courant électrique circule (figure).

L'effet repose donc à la base sur les propriétés semi-conductrices du matériau et son dopage afin d'en améliorer la conductivité. Le silicium employé aujourd'hui dans la plupart des cellules a été choisi pour la présence de quatre électrons de valence sur sa couche périphérique [colonne IV du tableau de Mendeleïev]. Dans le silicium solide, chaque atome – dit tétravalent – est lié à quatre voisins, et tous les électrons de la couche périphérique participent aux liaisons. Si un atome de silicium est

remplacé par un atome de la colonne V (phosphore par exemple), un de ses cinq électrons de valence ne participe pas aux liaisons ; par agitation thermique, il va très vite passer dans la bande de conduction et ainsi devenir libre de se déplacer dans le cristal, laissant derrière lui un trou fixe lié à l'atome de dopant. Il y a conduction par un électron, et le semi-conducteur dit *dopé de type n*. Si au contraire un atome de silicium est remplacé par

un atome de la colonne III (bore par exemple) à trois électrons de valence, il en manque un pour réaliser toutes les liaisons, et un électron peut rapidement venir combler ce manque et occuper l'orbitale vacante par agitation thermique. Il en résulte un trou dans la bande de valence, qui va contribuer à la conduction, et le semi-conducteur est dit *dopé de type p*. Les atomes tels que le bore ou le phosphore sont donc des dopants du silicium. Les cellules photovoltaïques sont assemblées pour former des modules.

N.B. Voir dans *Les cellules photovoltaïques organiques : vers le tout polymère...* le principe des cellules photovoltaïques organiques ([encadré, p. 122](#)).

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque organique

Après absorption des **photons** par le **polymère**, des **paires électron-trou** liées (excitons) sont générées, puis dissociées. Compte tenu des limitations propres aux matériaux organiques (durée de vie des excitons, faible mobilité des charges), seule une faible fraction des paires électron-trou générées par les photons contribue effectivement au photocourant. L'une des idées majeures est de distribuer en volume les sites de photogénération pour améliorer la dissociation des excitons. Cette démarche est basée sur l'augmentation de la surface de la **jonction**, grâce à la mise en œuvre d'un réseau interpénétré de type donneur/accepteur (D/A) assurant le transport des trous (P^+) vers l'**anode** (ITO) et le transport des électrons (e^-) vers la **cathode** métallique (en aluminium Al, par exemple). Si le rendement quantique de séparation des charges photo-induites des systèmes associant un polymère **semi-conducteur** (de type PPV ou polythiophène) à un dérivé du fullerène (PCBM) est ainsi proche de l'unité, l'enjeu est désormais de limiter les phénomènes de recombinaison et de piégeage qui limitent le transport et la collection des charges aux électrodes, afin d'augmenter l'efficacité globale des dispositifs qui demeure encore aujourd'hui faible (inférieure à 5%). L'essor de la filière est également très fortement conditionné par la maîtrise et la compréhension des mécanismes de vieillissement des cellules mais aussi par la maîtrise des technologies en couches minces pour la protection des dispositifs vis-à-vis de l'oxygène et de la vapeur d'eau atmosphériques.

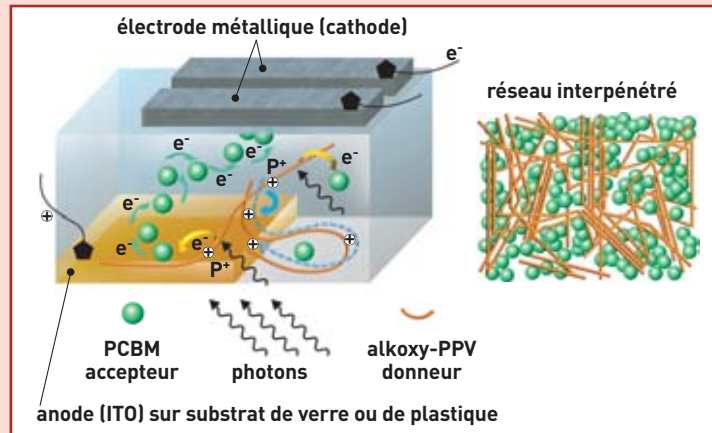


Figure tirée d'une présentation de S. Sariciffici (www.ios.at)

La ligne bleue en pointillés correspond au parcours des trous dans le matériau.