

Un nouveau matériau de construction producteur d'énergie – le SiTh, à base de couches minces de silicium (Silicon Thin-Films)

L'énergie photovoltaïque est désormais reconnue dans le monde entier comme une énergie d'avenir dont la compétitivité se rapproche de celle des autres formes d'énergie décarbonée. La France fait partie des pays qui ont été des pionniers dans ce secteur, dans les années Quatre-vingt, et elle y retrouve aujourd'hui une vraie dynamique : l'instauration (en 2006) d'un tarif d'achat de l'électricité photovoltaïque par le réseau, puis le Grenelle de l'Environnement, réflexion globale sur un nouveau modèle de croissance plus vert et plus durable, ont lancé un mouvement, qui débouche aujourd'hui sur une vraie croissance du secteur photovoltaïque : le parc raccordé au réseau est passé de quelques mégawatts-crête (MWc) en juin 2007, à 18 MWc à la mi-2008, puis à 106 MWc à la mi-2009.

par **Claire TUTENUIT*** et **Hugues-Antoine GUINOISEAU****

Les avantages de l'électricité photovoltaïque (PV) sont nombreux :

- son acceptabilité sociale : elle est populaire et bien admise par la population (il y a même une véritable attente sociale à son égard) ; c'est l'énergie la plus populaire, et la plus « socialement inclusive » pour les Français : ils se l'approprient facilement et elle véhicule des messages positifs, en participant à la sensibilisation aux questions énergétiques et climatiques ;

- son abondance : elle est quasiment illimitée et gratuite pendant vingt (voire trente) ans, une fois consenti l'investissement initial.

L'ensemble des économistes de l'énergie la voit donc comme un élément incontournable du mix énergétique

* Présidente de Solsia.

** Directeur du Développement de Solsia.

de l'avenir. Elle reste néanmoins coûteuse, du fait d'un coût d'investissement élevé.

L'enjeu des vingt prochaines années est donc celui de la **réduction du coût de production du kWh photovoltaïque**. C'est ce à quoi travaillent de nombreux laboratoires et industriels dans le monde, avec d'ores et déjà des résultats prometteurs : le prix d'acquisition des panneaux, exprimé en euro par Watt-crête (€/Wc), est passé de plusieurs euros à moins de 2 euros en une dizaine d'années ; il reste néanmoins des progrès à faire pour atteindre la « **parité réseau** » (c'est-à-dire le moment où le coût de production de l'électricité photovoltaïque rejoint celui des autres sources d'énergie, sans perdre ses avantages en termes de protection de l'environnement et d'acceptabilité sociale). La technologie des SiTh (*Silicon Thin-Films*), qui émerge aujourd'hui au niveau industriel, est bien placée pour y parvenir la première. Ses avantages esthétiques, énergétiques et écologiques en complètent l'intérêt économique. Les caractéristiques techniques et les bons rendements énergétiques de ce matériau dans de multiples cas de figure (orientation Est/Ouest, inclinaisons allant de verticale à quasi-horizontale, ombres portées, etc.) lui confèrent une vaste gamme d'utilisations. La pérennité de l'acceptabilité sociale du photovoltaïque dépendant dans une large mesure de son intégration aux constructions, l'esthétique du produit et sa complémentarité avec les matériaux traditionnels sont donc d'une importance cruciale pour l'avenir du PV en France. Les panneaux SiTh ont toute leur place sur les bâtiments existants, ainsi d'ailleurs que sur toutes les surfaces déjà artificialisées, situées, par définition, à proximité des populations ; l'intérêt du SiTh réside dans le fait qu'il rend possible la mise en valeur énergétique du plus grand nombre de bâtiments.

La France a été (avec les Etats-Unis) un des leaders mondiaux de ce secteur dans les années Quatre-vingt ; les travaux de ses laboratoires ont conduit à la naissance et aux premiers succès de cette technologie SiTh. Le laboratoire français Solems a construit, en Allemagne, en association avec MBB, la première usine de panneaux en SiTh (qui fonctionne encore aujourd'hui), créant ainsi le premier industriel de ce secteur, devenu aujourd'hui Schott Solar. Le laboratoire Solems est également à l'origine de la naissance d'un équipementier de ce secteur, Unaxis (devenu entre-temps Oerlikon), qui est aujourd'hui un des premiers fabricants mondiaux de lignes de production de ce type de panneaux photovoltaïques.

Cette technologie, que la barrière du coût de développement des équipements de production a longtemps handicapée, est relancée, depuis trois ou quatre ans, par le développement et la maturité du marché des écrans plats, dont la fabrication s'appuie sur les mêmes technologies (dépôt de couches minces sous vide au moyen de torches à plasma). Les équipementiers ayant mis au point des lignes de production intégrées et automatisées pour répondre aux besoins du marché des écrans plats, les utilisent aujourd'hui pour fabriquer des pan-

neaux photovoltaïques de type SiTh. Cela a relancé l'intérêt mondial pour les couches minces de silicium, qui sont en passe de devenir particulièrement compétitives.

Le silicium amorphe est à la base des technologies SiTh : il s'agit aujourd'hui d'augmenter les rendements qu'il permet d'obtenir (qui varient aujourd'hui entre 6 et 7 %) et d'en abaisser le coût, tout en améliorant ce matériau de base et en le combinant avec d'autres couches conductrices, ou permettant d'améliorer la captation du spectre lumineux et sa transformation en électricité. Etant donné les très faibles épaisseurs en jeu (la totalité des couches déposées mesure moins d'un micron d'épaisseur), il est avantageux d'empiler plusieurs couches de matériaux afin de produire des panneaux dits « tandem », comportant des jonctions doubles, voire triples. Ces panneaux améliorés visent des rendements de plus de 12 %, pour des coûts de revient au Wc encore plus compétitifs que ceux des leaders actuels.

Aujourd'hui, alors que le marché français se développe sous l'effet de politiques incitatives et de l'engagement européen pris par la France d'atteindre 23 % d'énergies renouvelables dans son mix énergétique, le photovoltaïque SiTh apparaît comme une filière d'excellence possible pour la France (voir l'encadré 1).

DE L'IMPORTANCE DE L'ESTHÉTIQUE DES PANNEAUX

L'acceptabilité sociale du photovoltaïque passe par une bonne intégration des panneaux aux paysages tant urbains que ruraux, d'abord grâce à leur couleur et à leur aspect. Pour un pays comme la France, dont le territoire est déjà occupé de façon dense par des usages agricoles, forestiers et urbains, l'équipement photovoltaïque des toitures et d'autres surfaces artificialisées évitera l'accroissement de la pression foncière qui résulterait de l'installation de panneaux photovoltaïques au sol.

Pour que la couverture des toitures soit acceptée, dans la durée, par la population, l'aspect des panneaux est essentiel : la gamme de teintes des SiTh, allant du brun au brun foncé, est un atout de poids ; le verre qui les recouvre peut être traité antireflet, ce qui en améliore à la fois l'esthétique et la productivité : leur intégration aux paysages (centrales au sol) comme aux toitures est des plus aisées et leur généralisation changera peu les ambiances de couleur auxquelles nous sommes habitués.

Dans la gamme des bruns, des variantes sont possibles, mais, plus les panneaux sont d'une teinte foncée, plus ils produisent. Il est possible également de traiter des panneaux SiTh afin de les rendre semi-transparents, ou d'une couleur différente ; des arbitrages entre aspect esthétique et coût sont possibles.

Encadré 1 : Solsia

Solsia est le premier industriel français de la filière des panneaux photovoltaïques SiTh. Il vise l'industrialisation des savoir-faire de Solems, qui, depuis les années Quatre-vingt-dix, est actif sur le marché des petits systèmes utilisant les couches minces de silicium, et il est, en même temps, un acteur de la recherche et du développement des procédés de cette filière.

Son ambition est de produire les panneaux SiTh les plus performants au niveau mondial, mettant en œuvre des technologies, procédés et dispositifs innovants dans trois directions :

- un rendement accru ;
- une productivité supérieure ;
- le coût de production du Wc le plus bas du marché.

Son programme de R&D est orienté dans ces trois directions.

Solsia prévoit de livrer ses premiers panneaux dès 2011, et la mise en service de ses premières lignes de production industrielle de panneaux dès le deuxième semestre 2012.

vingt ans. Le bilan énergétique de ce type de panneaux est donc très positif. La faible consommation d'énergie de leur production est une des raisons de leur compétitivité.

Le graphique 1 de la page suivante restitue les résultats d'une analyse de cycle de vie, publiés par le laboratoire américain *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Ces résultats montrent que les panneaux SiTh de la prochaine génération auront un temps de retour énergétique inférieur à un an (en moins d'un an, un panneau de ce type aura produit la quantité d'énergie qui aura été nécessaire à sa fabrication).

DES PROPRIÉTÉS ÉNERGÉTIQUES FAVORABLES AU MARCHÉ DES TOITURES

Les panneaux à base de SiTh ont un comportement supérieur à celui des autres types de panneau, grâce, tout d'abord, à leur coefficient de température particulièrement bas : lorsqu'ils s'échauffent (ce qui est le cas, dans des conditions d'ensoleillement propices à la production électrique), ils conservent leur rendement. Leur coefficient de température n'est que de 0,21 (au lieu de 0,42 dans le cas des panneaux au silicium cristallin).

La seconde propriété qui joue en leur faveur est de bien capter et transformer les rayonnements lumineux diffus ou inclinés.

La conséquence de ces caractéristiques est une meilleure productivité des panneaux SiTh, à puissance donnée, conduisant ainsi à abaisser le coût de l'électricité produite.

Ces propriétés physiques du silicium en couches minces ont principalement deux conséquences pour l'utilisation des panneaux SiTh :

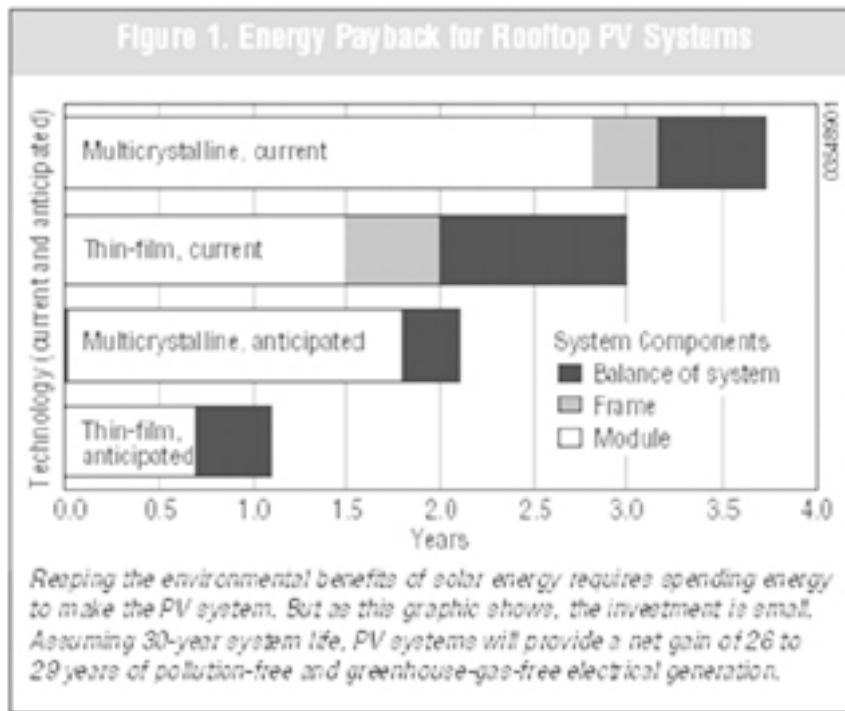
- leur utilisation en toiture est facilitée par le fait que, contrairement aux panneaux cristallins, il n'est pas nécessaire d'en ventiler la face inférieure (à la différence des panneaux cristallins, les panneaux SiTh ne subissent pas de pertes de rendement liées à l'échauffement) ; la pose en surimposition est possible sans que cela entraîne une surépaisseur du panneau, ce qui représente un avantage de plus, du point de vue de l'esthétique ;
- ce sont les panneaux les plus généralistes, car le silicium amorphe capte bien l'ensoleillement diffus : ils peuvent être utilisés dans les régions où l'ensoleillement est variable ; ils ont une bonne productivité, même lorsqu'ils sont orientés vers l'Est, l'Ouest ou le Sud, ou encore lorsqu'ils sont fortement inclinés. Ils sont donc tout particulièrement adaptés au marché des toitures, où l'inclinaison diffère souvent de l'optimum (qui est de 35°), et où l'orientation des panneaux est déterminée par des considérations très éloignées des impératifs de la production photovoltaïque classique.

DES AVANTAGES ENVIRONNEMENTAUX APPRÉCIABLES

Au-delà de leur esthétique, les panneaux photovoltaïques à base de SiTh ont de réelles qualités environnementales.

Tout d'abord, leur composition ne fait appel qu'à des matériaux ne présentant aucun risque : contrairement à d'autres technologies « couches minces », leur implantation sur les toitures est possible sans restriction ; en fin de vie, ils peuvent être insérés dans les circuits ordinaires de traitement des déchets du bâtiment et envoyés dans les installations de recyclage du verre ordinaire. Cela permet de les employer sans obligation de traçabilité et de retour vers une filière de recyclage spécifique, évitant ainsi une procédure qui pourrait s'avérer lourde dans un secteur, le bâtiment, qui se caractérise par ses très nombreux acteurs.

L'autre avantage des panneaux SiTh est que leur *process* de production, qui s'opère à basse température, consomme peu d'énergie : la quantité d'énergie électrique nécessaire à la fabrication d'un panneau (communément appelée « énergie grise ») est inférieure à celle produite en deux ans par ce même panneau. En outre, leur durée de vie (proche des trente ans) est garantie sur



Graphique 1.

Ces propriétés physiques confèrent aux SiTh leur principal atout : leur meilleure productivité. Pour une puissance donnée et avec une orientation optimale (comme celle qui serait retenue dans le cas d'une centrale au sol), ils produisent en moyenne 10 % d'électricité de plus que les panneaux traditionnels à base de silicium cristallin. Avec des orientations différentes, cet écart est encore plus grand.

Dans l'optique de l'atteinte de la « parité réseau », le critère déterminant est celui du coût du kWh d'électricité photovoltaïque produit. Son calcul doit être réalisé localement, bien sûr, car il dépend des conditions d'ensoleillement du site considéré. Mais, que ce soit au Nord (grâce à leur capacité à capter l'ensoleillement diffus), ou au Sud (grâce à leur meilleur coefficient de température), les panneaux SiTh ont une production d'au moins 10 % supérieure à celle des panneaux traditionnels.

Le graphique 2 de la page suivante montre les résultats d'une étude publiée par Schott Solar, une entreprise qui produit aussi bien des panneaux PV au silicium cristallin que des panneaux SiTh à base de silicium amorphe (aSi).

Si la France (comme l'Europe) voit certaines de ses régions bénéficier d'un fort ensoleillement, l'essentiel de son territoire jouit d'un ensoleillement modéré, pour lequel les panneaux SiTh sont la solution idoine. Dans l'esprit d'un rapprochement de la production de l'électricité photovoltaïque des lieux de sa consommation, les SiTh sont ainsi très bien placés. Ils permettent d'élargir le marché des panneaux PV à des implantations potentielles, d'où ils étaient jusqu'à aujourd'hui exclus : les régions situées au Nord de la Loire, les toitures plates et les façades, les bâtiments présentant des orientations diverses.

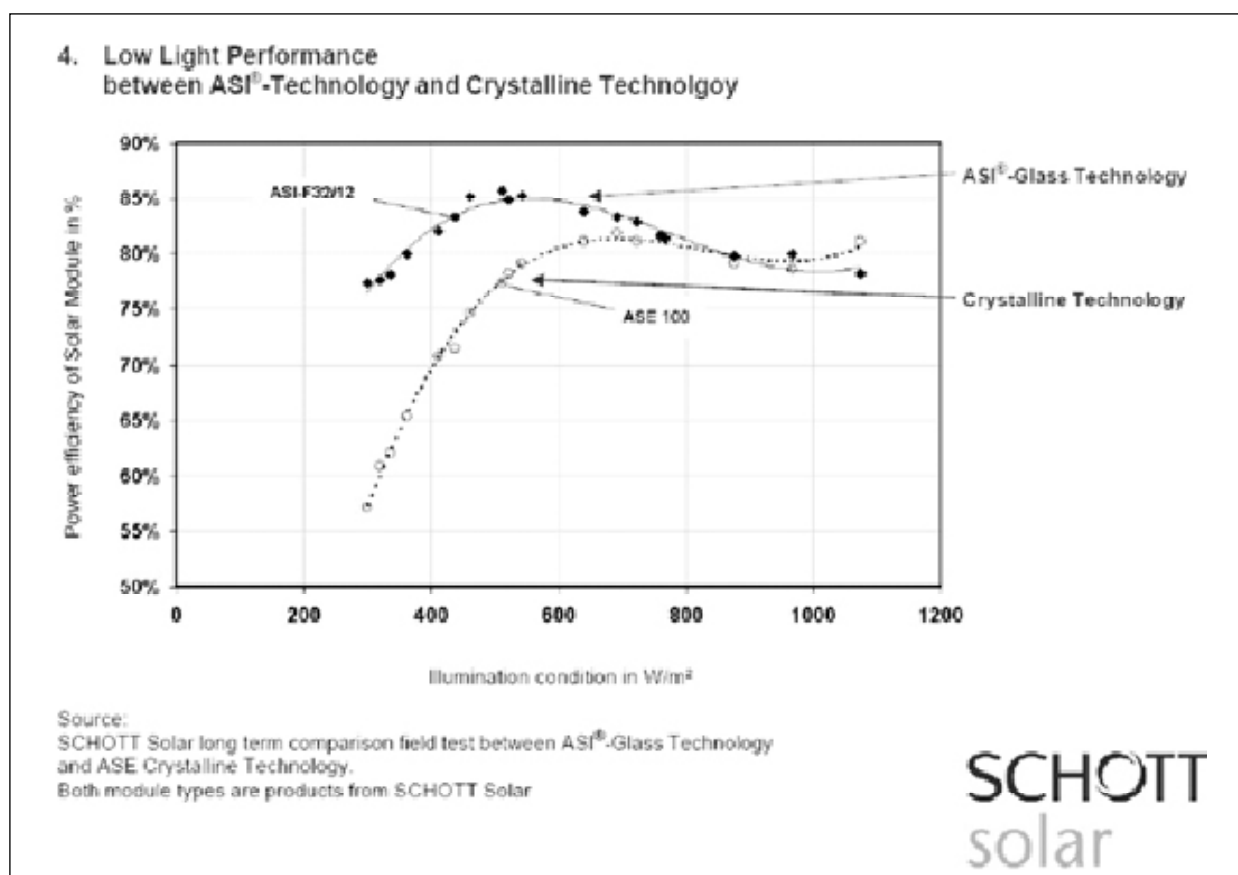
VERS LA « PARITÉ RÉSEAU »

Au-delà de leurs caractéristiques physiques favorables, les avantages des panneaux SiTh sont aussi d'ordre économique.

Leur coût de production (ramené au watt-crête) est très compétitif, en raison des quatre facteurs suivants :

- les quantités de matériaux (notamment celles de silicium) utilisées pour leur fabrication sont moindres : les couches minces sont d'une épaisseur de l'ordre du micron, alors que les cellules photovoltaïques métalliques les plus fines mesurent plus de 100 microns d'épaisseur ;
- la consommation d'énergie liée à leur production est moindre, car le procédé est à basse température et ne passe pas par l'étape du silicium métallique, qui est très fortement consommatrice d'énergie ;
- le processus industriel de leur production est beaucoup plus intégré et automatisé : toutes les couches sont déposées entre deux plaques de verre dans une même usine, qui fournit des panneaux complets, prêts à être branchés ;
- comme cela a été indiqué plus haut, les équipements nécessaires à leur production, très intégrés et automatisés, et donc nécessitant des investissements lourds, ont vu leur développement financé par le marché des écrans plats : ils sont donc performants, fiables et compétitifs.

Quand on ajoute l'écart de productivité à cet écart de prix au Wc, l'avantage des panneaux SiTh fait plus que compenser l'inconvénient de leur moindre densité énergétique, ce qui explique le succès actuel des couches minces, dont l'entreprise américaine First Solar est aujourd'hui le plus bel exemple de réussite.



Graphique 2.

L'avantage des SiTh est encore plus grand en termes de **prix au m²** : lorsqu'il s'agit de couvrir le toit d'un bâtiment neuf, il est beaucoup plus avantageux de le faire avec des panneaux SiTh, dont le prix au m² est très inférieur : un m² de panneaux SiTh de nouvelle génération présente un coût de l'ordre de 150 euros (100 Wc x 1,5 €), tandis qu'un m² de panneau au silicium cristallin a un coût d'environ 300 euros (150 Wc x 2 €). Avec les panneaux SiTh, le surcoût d'investissement, par rapport au coût d'une toiture ordinaire, est modeste, ce qui améliore l'économie du projet et la capacité des propriétaires à le financer. L'encadré 2 (voir en page suivante) montre que la « parité réseau » est assez facilement atteinte lorsque seul un surcoût par rapport à l'installation d'une toiture ordinaire doit être pris en compte, comme c'est le cas avec les panneaux SiTh.

En France, la construction des bâtiments est régulée par des réglementations thermiques (RT), qui évoluent régulièrement. Conséquences de nos engagements européens à réduire de 20 % nos émissions de gaz à effet de serre et de porter à 23 % la part de notre énergie renouvelable à l'horizon 2020, ces RT vont dans le sens des économies d'énergies (RT 2005 et RT 2012) et, à moyen terme, vers la production d'énergie par les bâtiments eux-mêmes (RT 2012 et RT 2020).

Ces RT, contraignantes pour les entreprises du bâtiment, impliquent des coûts de réalisation supérieurs, qui sont répercutés sur le client final, lequel voit la facture de son m² à construire (ou à rénover) augmen-

ter de manière régulière. Le PV intégré au bâti, avec injection dans le réseau du courant électrique produit, est un bon moyen de réduire ce coût. Tous les installateurs proposent aujourd'hui des montages financiers simples, qui consistent à financer l'installation du PV au moyen d'un emprunt qui sera remboursé par le produit de la vente du courant produit à EDF (ou/et grâce aux économies de consommation électriques réalisées).

UNE FILIÈRE TECHNOLOGIQUE À DÉVELOPPER

Les panneaux SiTh ont aujourd'hui une faiblesse : leur densité énergétique relativement modeste, c'est-à-dire un rendement qui reste aujourd'hui plus faible que celui des autres types de panneaux : ce rendement est de 6 ou 7 % pour des panneaux standard, au lieu de 13 à 16 % pour des panneaux traditionnels, voire 17 % à 19 % pour des hétérojonctions. Cela renchérit les coûts d'installation à puissance donnée et réduit un peu l'avantage compétitif des panneaux SiTh, et surtout, cela constitue un handicap, aux yeux des développeurs de projets, dont l'objectif, une fois qu'ils ont acquis un site, est de maximiser la puissance qu'ils peuvent y installer.

Il paraît ainsi peu réaliste d'envisager, après 2012, de pouvoir commercialiser – hormis sur quelques marchés

Encadré 2**Vers la « parité réseau » pour le résidentiel neuf**

Pan de toiture neuve de 30 m²
 Panneaux SiTh à 10 % de rendement, 100 Wc/m²

Coût de la toiture neuve : 50 €/m² + pose
 Coût de la toiture SiTh : 150 €/m² + pose +
 équipement électrique 1 €/Wc

Investissement supplémentaire lié à l'équipement PV = 30 * 100 + 3 000 = 3 000 + 3 000 = 6 000 € HT = 6 300 € TTC

Sur une maison de 200 000 € TTC, le surcoût est de 3,15 %.

Puissance : 30 m² * 100 Wc/m² = 3 kWc
 Production annuelle : 1 000 h * 3 kWc = 3 MWh

Production sur 20 ans = 60 MWh (les panneaux continuent à produire pendant une dizaine d'années ensuite).

Coût moyen de l'électricité = 7 000 / 60 = 110 €/MWh = 11 ct/kWh

Electricité réseau : 12 ct/kWh (avec de fortes probabilités de hausse).

A noter : en France, la moitié environ du coût d'un kWh est liée à la distribution, l'autre moitié étant liée à la production du courant. Produire une électricité décentralisée contribue, dans bien des cas, à en réduire les coûts de transport.

de niche – des panneaux dont le rendement serait inférieur à 10 % ou dont les coûts de production seraient supérieurs à 1 €/Wc.

C'est pour réduire cette faiblesse que l'antériorité française dans cette filière peut être un avantage décisif :

grâce à la R&D poursuivie depuis les années Quarante, dans les laboratoires français, d'abord le LPICM (1), suivi du LGEP (2) et aujourd'hui du CEA et de l'INES, la France dispose de procédés et savoir-faire innovants, qui peuvent apporter à ce handicap plusieurs remèdes :

- améliorer les rendements, afin de les porter à environ 12 % industriellement (cela peut être fait grâce à des dispositifs tandems, consistant à superposer deux diodes de couches minces (à base de silicium) dans le même panneau) ;
- accroître encore (d'au minimum 20 %) la production d'énergie des panneaux, pour une même puissance installée, c'est-à-dire obtenir un équivalent rendement Wc/m² de 14,5 %.

Les grands acteurs industriels français, comme L'Air Liquide, un des leaders mondiaux dans le domaine des gaz industriels servant à la fabrication des SiTh, ou comme Saint-Gobain, dont les substrats verriers pour panneaux photovoltaïques évoluent afin d'atteindre de meilleures performances, ou encore comme Schneider-Electric, avec l'ensemble du système de mise en œuvre des panneaux PV, disposent d'atouts considérables pour permettre l'émergence et la réussite, au niveau mondial, d'une filière française fondée sur cette technologie innovante des SiTh. De même, plusieurs grands acteurs de la construction s'intéressent au photovoltaïque et sont ainsi susceptibles d'acquérir une réelle avance dans le domaine de l'intégration des SiTh aux bâtiments.

L'effort français de R&D dans la filière photovoltaïque, aujourd'hui en forte croissance, devrait permettre de mettre sur le marché, dès 2012, ces produits améliorés à un coût compétitif et de proposer ainsi aux développeurs et à l'industrie du BTP des panneaux photovoltaïques bénéficiant d'un couple rendement/prix, qui les amènera vers la « parité réseau » dans de nombreuses régions françaises.

(1) Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces, laboratoire commun au CNRS et à l'Ecole Polytechnique, installé à Palaiseau.

(2) Le Laboratoire de Génie Electrique de Paris (LGEP) est un laboratoire commun au CNRS et à SUPELEC.