

# Le soleil comme source d'énergie

## Le photovoltaïque

*Dominique Plée est directeur scientifique au département de recherche d'Arkema, entreprise de chimie française dont les trois pôles d'activité sont : les produits vinyliques, la chimie industrielle et les produits de performance. Arkema concentre notamment ses efforts sur l'optimisation des cellules photovoltaïques, aussi bien sur leur rendement que sur leur résistance et leur longévité.*

Dans tous les domaines et pas seulement celui de l'habitat, la question énergétique est vouée à occuper durablement le devant de la scène. L'équation mondiale ressemble de plus en plus à un casse-tête avec d'une part la demande des pays émergents, de la Chine et de l'Inde, qui doublera d'ici 2050, d'autre part les problèmes posés par l'usage massif des combustibles fossiles : épuisement des ressources, perturbations climatiques (ces sujets sont abordés dans les **Chapitres d'A. Ehrlacher** et de **D. Quénard**).

Les leviers d'action pour faire face à ce problème mondial

sont d'augmenter la production globale d'énergie, de diversifier les sources et d'économiser l'énergie. La tenue des objectifs européens requiert un fort investissement dans la recherche et le développement. En effet, l'Europe s'est fixée d'atteindre d'ici 2020 l'objectif ambitieux des « 3 fois 20 » (paquet énergie climat), à savoir :

- une diminution de 20 % des gaz à effet de serre par rapport au niveau de 1990 ;
- une amélioration de 20 % de l'efficacité énergétique ;
- une contribution des énergies renouvelables à hauteur de 20 % dans la consommation finale d'énergie.

## L'EUROPE ET LE PLAN SET OU « PLAN STRATÉGIQUE POUR LES TECHNOLOGIES ÉNERGÉTIQUES »

Afin d'atteindre les objectifs européens en matière de lutte contre le changement climatique, de sécurité d'approvisionnement en énergie et de compétitivité des entreprises européennes (les « 3 fois 20 »), la Commission a présenté en 2007 le plan SET ou « plan stratégique pour les technologies énergétiques », qui a été adopté par le Conseil de l'Union européenne en 2008. Ce plan stratégique vise à accélérer le développement et le déploiement au meilleur coût des technologies à faible intensité carbonée. Il comprend des mesures portant sur la planification, la mise en œuvre, les ressources et la coopération internationale en matière de technologies énergétiques.

### Des obstacles à franchir

Or, certaines contraintes freinent le développement et la diffusion des technologies énergétiques, qu'il s'agisse du sous-investissement chronique qui touche ce secteur depuis les années 1980, des délais importants de commercialisation des nouveaux produits, du surcoût qu'ils entraînent souvent sans toujours assurer un meilleur rendement énergétique, des obstacles juridiques et administratifs, ou encore de leur acceptation sociale.

De plus, face à la concurrence de certains pays industrialisés et des économies émergentes, les États membres de l'Union européenne doivent adopter une approche commune efficace. Le temps est en outre un facteur décisif dans l'adoption de cette approche pour que les objectifs européens soient atteints.

### Des objectifs pas à pas

Le plan SET fixe les objectifs suivants pour l'Europe :

- à court terme : renforcer la recherche pour réduire les coûts et améliorer les performances des technologies existantes, et favoriser la mise en œuvre commerciale de ces technologies. Les actions à ce niveau devraient porter notamment sur les biocarburants de deuxième génération, la capture, le transport et le stockage du carbone, l'intégration des sources d'énergie renouvelables dans le réseau électrique et l'efficacité énergétique en matière de construction, de transport et d'industrie ;
- à plus long terme : soutenir le développement d'une nouvelle génération de technologies à faible intensité carbonée. Les actions à réaliser devraient se concentrer, entre autres, sur la compétitivité des nouvelles technologies en matière d'énergies renouvelables, le stockage de l'énergie, la durabilité de l'énergie de fission, l'énergie de fusion, ainsi que le développement des réseaux transeuropéens de l'énergie.

### Des moyens pour l'innovation technologique

La réalisation de ce plan SET implique un effort collectif et des actions au niveau du secteur privé, des États membres et de l'Union européenne, ainsi qu'au niveau mondial. Ce plan propose tout d'abord une nouvelle méthode de gouvernance en matière de technologies énergétiques, basée sur une **planification stratégique commune**. Dans cette optique, un groupe de pilotage, créé par la Commission en 2008 et constitué de représentants des États membres, permet de renforcer la cohérence en concevant des actions communes, en mettant des ressources à disposition et en évaluant les progrès.

Grâce à une **augmentation des ressources**, tant financières qu'humaines, et à l'encouragement des formations de chercheurs, la Commission encourage et lance progressivement de nouvelles initiatives industrielles européennes – dans les secteurs de l'énergie éolienne, de l'énergie solaire, de la bioénergie, du piégeage, du transport et du stockage de CO<sub>2</sub>, du réseau électrique et de la fission nucléaire – qui prendront la forme de partenariats public-privé ou de programmes communs entre États membres.

Les défis technologiques à relever par l'Union européenne au cours des dix prochaines années ont été définis dans le plan SET (**Encart** : « *L'Europe et le plan SET* ») et la production d'électricité voltaïque y figure en bonne place.

Les atouts pour la génération d'électricité photovoltaïque reposent en grande partie sur une recherche en plein développement qui permet d'améliorer constamment le rendement des cellules photovoltaïques. Nous avons maintenant pris conscience que nous consommons sans les reconstituer les énergies fossiles (gaz naturel, charbon, pétrole), dont le stockage s'est effectué durant des millions d'années. C'est la différence des deux vitesses – formation/consommation – qu'il faut bien avoir à l'esprit : c'est la cause de l'augmentation rapide de la quantité de dioxyde de carbone dans l'atmosphère, puis dans les mers<sup>1</sup> (le cycle dans ce dernier cas est de l'ordre de dix siècles). Nous avons là une des raisons du développement du concept des énergies renouvelables – l'éolien, l'hydraulique, le solaire, la biomasse<sup>2</sup>, la géothermie... (**Figure 1**).

Sauf pour la géothermie, le soleil est le plus souvent le véritable réservoir d'énergie des énergies renouvelables : c'est l'énergie solaire qui est à l'origine de la montée en al-



**Figure 1**

*Éolien, hydraulique, solaire, géothermie... les énergies renouvelables sont amenées à se développer de plus en plus pour remplacer les énergies fossiles.*

titude de l'eau retenue par les barrages pour faire tourner les turbines ; c'est aussi l'origine des vents et de l'énergie éolienne correspondante, tout autant que de l'échauffement des panneaux solaires thermiques (et de l'eau chaude qu'ils délivrent dans la maison).

Ce chapitre est consacré aux panneaux solaires photovoltaïques, dans lesquels le rayonnement solaire provoque une séparation des charges électriques dans un semi-conducteur<sup>3</sup>, avec circulation d'un courant électrique (**Encart** : « *Les panneaux photovoltaïques, ou comment transformer la lumière en électricité* »). Il se focalise en particulier sur la filière utilisant le silicium cristallin, qui est encore actuellement le semi-conducteur le mieux connu et le plus utilisé, tandis que le **Chapitre de D. Lincot** est consacré aux filières sans silicium.

Commençons par un rapide état des lieux des différentes technologies photovoltaïques et de leur développement.

1. Voir aussi l'ouvrage *La chimie et la mer, ensemble au service de l'homme*. Chapitre de S. Blain. Coordonné par Minh-Thu Dinh-Audouin, EDP Sciences, 2009.

2. Voir le **Chapitre de D. Gronier**, **Encart** : « *La biomasse, ressource renouvelable de demain ?* ».

3. Voir la note 1 du chapitre 2.

## LES PANNEAUX PHOTOVOLTAÏQUES, OU COMMENT TRANSFORMER LA LUMIÈRE EN ÉLECTRICITÉ

### De la découverte de l'effet photovoltaïque aux cellules photovoltaïques

C'est A.-C. de Becquerel (**Figure 2**) qui fit la première observation d'un photo-courant dès 1839, avec une électrode en platine et l'autre en cuivre oxydé, plongées dans une solution conductrice acide. Les propriétés semi-conductrices du sélénium furent mises en évidence un peu plus tard (1877) par W.G. Adams et R.E. Day.



**Figure 2**

*Antoine-César de Becquerel (1788-1878), physicien français qui a découvert l'effet photovoltaïque, à savoir l'apparition d'une tension aux bornes d'un matériau semi-conducteur.*

Il fallut attendre le  $xx^e$  siècle pour voir émerger des résultats importants. La contribution théorique d'A. Einstein fut d'expliquer en 1905, en particulier grâce à la notion du quantum élémentaire d'énergie de Planck porté par le photon, que la longueur d'onde du rayonnement incident doit être inférieure à une valeur limite pour provoquer l'émission d'un électron par un métal, et que le courant d'électrons produit est proportionnel au nombre de photons reçus (au flux lumineux).

La connaissance de la première « jonction p-n » dans le silicium dut attendre 1941, et l'obtention d'une cellule photoélectrique (**Figure 3**) à bon rendement (construite par les chercheurs du laboratoire américain Bell Telephone Laboratories) s'est faite en 1955.



**Figure 3**

*La première cellule photovoltaïque provient de la Bell Telephone Laboratories ou « Bell Labs ». L'assemblage de cellules conduit à un module photovoltaïque*

### Comme marche un semi-conducteur ?

En purifiant intensivement un composé tel que le silicium (qui comporte quatre électrons périphériques), puis en y introduisant une impureté bien choisie, on obtient un semi-conducteur. Il est dit de type n (comme « négatif ») si l'impureté est de l'arsenic ou du phosphore par exemple, qui possèdent cinq électrons périphériques, donc par rapport au silicium un électron excédentaire (appelé donneur) susceptible de circuler assez facilement c'est-à-dire de passer facilement, par une faible absorption d'énergie, du niveau de la bande de valence au niveau de la bande de conduction (pour plus de détails, voir le **Chapitre de D. Lincot**). Il est dit de type p quand il s'agit du bore, qui n'a que trois électrons périphériques, ce qui entraîne un déficit de charge négative donc l'équivalent d'une charge positive dans la bande de valence.

## Qu'est-ce que la jonction p-n ?

Une partie d'un semi-conducteur étant dopée n et l'autre p (les deux étant séparées par un plan dit de jonction), le courant ne circule que dans un sens : de la partie n où ils sont excédentaires vers la partie p (le courant, lui, circule par convention dans l'autre sens).

Pour que cette circulation se fasse, il faut au préalable que, par l'absorption de l'énergie portée par les photons du rayonnement solaire, les électrons du semi-conducteur aient été portés de leur niveau fondamental (bande de valence) jusqu'à la bande de conduction d'énergie plus élevée, créant ainsi une paire « électron-trou » (électron et trou sont appelés excitons. Voir aussi le *Chapitre de M. J. Ledoux*). Généralement, cette paire électron-trou revient à l'état initial en réémettant l'énergie absorbée sous forme d'énergie thermique : le semi-conducteur s'échauffe au soleil.

## Comment récupérer l'énergie électrique ?

Récupérer tout ou partie de cette énergie sous forme électrique est justement l'objectif de la conversion photovoltaïque. Comment faire ? Tout simplement en séparant les paires électron-trou créées et en forçant les électrons à circuler dans un circuit extérieur. Le champ électrique très fort existant à l'interface entre les deux zones permet de faire circuler les électrons dans le circuit extérieur et crée ainsi le photo-courant. La différence de potentiel étant notée  $U$  et l'intensité  $I$ , la puissance est :  $P = UI$ . On obtient une cellule solaire qui possède une caractéristique courant-tension. La puissance maximale correspond à un point particulier de cette caractéristique appelé point de fonctionnement. Le rapport de cette puissance à la puissance lumineuse incidente définit le rendement de la cellule photovoltaïque.

## Les différents types de semi-conducteurs utilisés

Le silicium\* monocristallin, polycristallin et même amorphe représente 85 % du marché. Il existe des filières sans silicium, l'une fondée sur le tellure de cadmium (CdTe), l'autre sur des diséléniures de cuivre et d'indium (CIGS), alliages du type  $Cu(In, Ga)Se_2$ .

\* Le silicium (Si) est l'élément le plus abondant dans la croûte terrestre, présent notamment dans le sable et le quartz.

## 1 Les technologies photovoltaïques : où en sommes-nous ?

### 1.1. Les différentes filières

Même pour la filière silicium, il faut distinguer plusieurs types de matériaux (*Figure 4* et voir le *Chapitre de D. Lincot*). Le rendement (voir l'*Encart* : « *Les panneaux photovoltaïques, ou comment transformer la lumière en électricité* ») n'est pas le même pour ce type de semi-conducteur lorsqu'il est monocristallin (c-Si) – où le rendement le plus élevé peut aller jusqu'à 24 % –, polycristallin

ou amorphe<sup>4</sup> (a-Si), dont le rendement est le plus faible. L'intérêt du silicium amorphe est cependant de permettre une forte absorption des photons dans le visible – cent fois plus que le silicium cristallin –, ce qui permet la fabrication de cellules à l'aide de couches minces, de l'ordre du

4. Un matériau monocristallin est constitué d'un seul et unique cristal, par opposition avec un matériau polycristallin, constitué d'une multitude de petits cristaux de tailles et d'orientations variées. Dans un matériau amorphe, les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, contrairement aux matériaux cristallins.

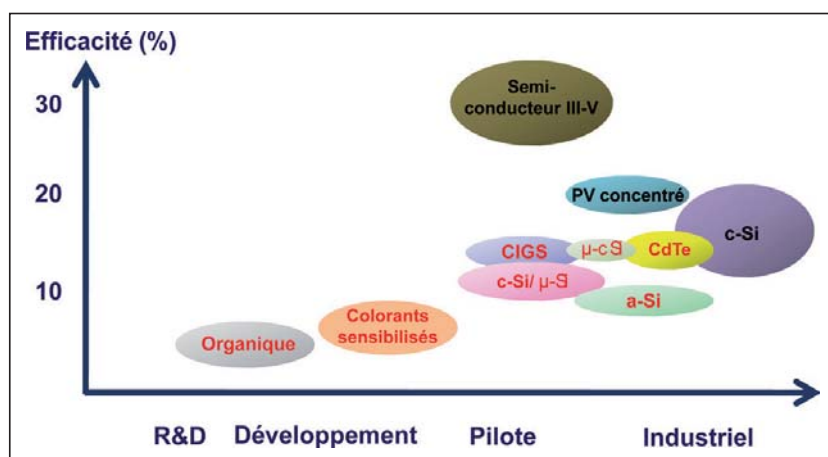


Figure 4

État de l'art pour le photovoltaïque.  
Les technologies de couches minces sont écrites en rouge.

micromètre d'épaisseur, et ce qui entraîne une baisse significative des coûts de production. Cela explique que malgré les rendements plus faibles qu'avec le silicium cristallin (de 6 à 7 %), cette filière tend à se développer dans le contexte d'une forte demande. La découverte récente d'autres formes structurales du silicium entre l'amorphe et le cristallin (polymorphe, microcristallin  $\mu$ -c Si) susceptibles d'améliorer le rendement des modules autour de 10 %, constitue une autre base de développement de la filière dite « couches minces ». Les filières sans silicium, dont celle fondée sur le CdTe ou les dérivés de CIGS, sont également bien adaptées à une utilisation en couches minces. À côté des substrats de verre, les supports souples très minces, métalliques ou plastiques, commencent à voir le jour. L'avantage de ces supports est leur poids, plus faible que le verre, ainsi que leur souplesse d'utilisation et de transport. Cependant, ces substrats entraînent des contraintes supplémentaires (températures limitées, déformations, propriétés barrière...) qui doivent être surmontées.

Une autre filière, encore à l'état de la recherche et du développement, repose sur l'utilisation de semi-conducteurs organiques ou hybrides organique-inorganique. Quelques récentes démonstrations existent néanmoins sur des produits commerciaux, encore à petite échelle, qui atteignent des rendements autour de 3 %, tandis que le silicium cristallin monte, pour certains systèmes, à plus de 20 %, et les systèmes couches minces sont quant à eux compris entre 8 et 13 % pour les produits commerciaux.

La technologie photovoltaïque concentré correspond à une partie émergente encore très faible du silicium cristallin. La partie « semi-conducteurs III-V » des chimistes nécessite encore des concentrations solaires très élevées sur les cellules semi-conductrices.

## 1.2. Les facteurs de développement

### 1.2.1. Les facteurs politiques et économiques

Le photovoltaïque a connu une croissance importante, de 25 à 40 % depuis dix ans, mais cette croissance est due pour beaucoup à des subventions au niveau mondial et à beaucoup d'incitations des gouvernements de nombreux pays. Il est probable que dans l'avenir, le photovoltaïque va devoir vivre avec des subventions moins importantes et une aide des Pouvoirs publics plus limitée.

Par exemple en Espagne, dès 2008, à la suite de spéculations sur le photovoltaïque,

Le gouvernement a décidé de mettre des barrières en baissant les aides tarifaires (« feeds in tariffs », FIT) de 45 % pour les fermes solaires et de 5 % pour les particuliers. En Allemagne, on annonce une baisse de 11 % des FIT en 2011. En France, non seulement il y a une baisse de 12 % des subventions accordées pour le rachat du courant d'origine photovoltaïque, mais on annonce un moratoire sur les nouveaux projets, mis à part ceux des particuliers inférieurs à 3 kW, et une limitation globale souhaitée aux alentours de 500 MW/an.

Par ailleurs, quelques autres points importants méritent d'être notés : à la fin 2010, 70 % de la production des modules de silicium cristallin sont localisés en Asie, qui fournit 80 % des modules installés en France, ce qui pèse pour près d'un milliard d'euros dans le déficit commercial de la France. Ainsi l'on peut dire que les subventions gouvernementales françaises ont servi à financer l'industrie chinoise. Il faut donc imaginer des systèmes de subvention et des tarifs différents (voir aussi la conclusion du **Chapitre de J.-C. Bernier**), et cela, en sachant que le potentiel de production français est de l'ordre de 500 MW et que l'on a quelques acteurs français qui tournent chacun autour de 100 MW : Tennesol, Fonroche et Photowatt.

### 1.2.2. Les facteurs à considérer pour le développement du photovoltaïque

D'autres facteurs importants sont à considérer pour le développement du photovoltaïque :

- le coût de l'énergie photovoltaïque comparé au prix réseau, appelé **la parité réseau** (« grid parity »), dont dépend le taux de retour sur investissement. Ce retour varie selon les localisations géographiques et bien entendu selon les structures et technologies de coût locales. Pour raisonner au niveau européen, il faut par exemple prendre en compte le fait qu'au Sud, le watt-heure (Wh) photovoltaïque est moins cher qu'au Nord et que l'électricité du réseau italien est la parmi les plus chères, sinon la plus chère d'Europe ; la parité réseau ne sera donc pas obtenue à la même date en Allemagne et en Italie ;

- **l'intermittence** : l'électricité est produite de jour et l'alternance jour-nuit rend le stockage nécessaire, mais à quel coût et avec quelle technologie ? C'est un point important aujourd'hui en France : quand on pose des panneaux photovoltaïques sur un bâtiment, c'est dans 99 % des cas pour les raccorder au réseau. L'électricité non utilisée est revendue à EDF et le particulier reçoit une somme d'argent qui aujourd'hui est en moyenne de 0,4 € par kWh de différence entre ce qu'il consomme et ce qu'il revend. Avec un tel tarif, le retour sur investissement est de dix à quinze ans, selon la région où il se trouve ;

- **l'intégration aux bâtiments** qui comporte trois critères principaux : le poids relativement élevé des panneaux (16 kg/m<sup>2</sup>) qu'il faut alléger et l'étanchéité car le panneau intégré fait office de toit ;
- le panneau doit respecter à la fois les normes électriques



Figure 5

Comment intégrer des panneaux photovoltaïques à nos toits tout en assurant efficacité et esthétique ?  
 A) Système classique de panneaux avec possibilité de circulation d'air à l'arrière pour refroidissement ;  
 B et C) tuiles incorporant des cellules photovoltaïques.

et les normes bâtiments, ce qui n'est pas forcément facile. Un projet sur ce sujet, aidé par l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (Ademe), Photobat<sup>5</sup>, s'est terminé fin 2010 ;

– **les procédés de fabrication** doivent être réexaminés dans le contexte du développement durable car il y a émission de polluants ou de gaz à effet de serre, en particulier de CO<sub>2</sub> dans le cas de la purification du silicium. Des discussions

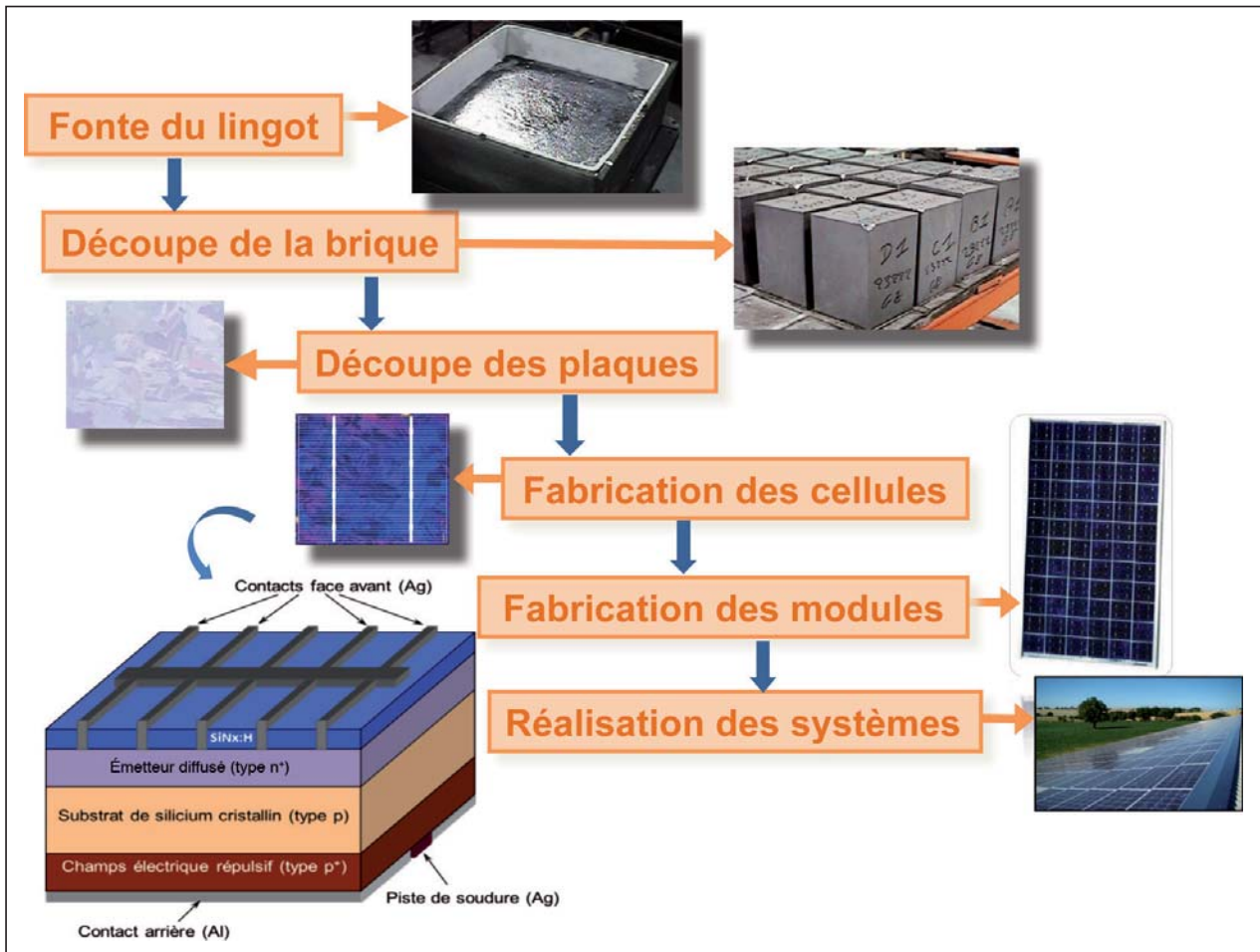
5. [www.tenerrdis.fr/rep-projets/ido-117/photobat.html](http://www.tenerrdis.fr/rep-projets/ido-117/photobat.html)

commencent à être menées autour de la disponibilité d'un certain nombre de métaux stratégiques : indium, gallium, tellure... Le tellure par exemple n'est jamais pur. Si l'on augmente sa production, on augmente donc aussi celle des autres métaux associés, avec peut être, le risque de déséquilibrer d'autres marchés. L'indium est un métal relativement rare, ce qui augmente notre dépendance par rapport aux pays producteurs ;

– **le devenir des panneaux en fin de vie** est une thématique de réflexion émergente : comment les recycle-t-on ?

– **l'intégration architecturale** : deux exemples sont présentés sur la *Figure 5*. Nous avons vu dans l'*Encart « Les panneaux photovoltaïques, ou comment transformer la lumière en électricité »* que la recombinaison des excitons génère de la chaleur, donc le rendement du panneau diminue avec la température ; on aura ainsi intérêt à prévoir des systèmes de panneaux avec circulation d'air à l'arrière pour les refroidir (*Figure 5A*). Un concept plus esthétique avait été développé par une société américaine, SRS Energy, qui fabriquait des tuiles incorporant des cellules photovoltaïques et s'emboîtant entre elles comme des tuiles standard. Leur performance au mètre carré est cependant moindre que pour les panneaux classiques car la cellule ne couvre pas la totalité de la surface de la tuile. Elles peuvent néanmoins séduire une certaine clientèle malgré leur prix élevé (*Figures 5B et 5C*).





## 2 Les panneaux en silicium cristallin : comment diminuer le coût pour atteindre la parité réseau ?

### 2.1. Les procédés de fabrication

Le silicium cristallin est d'abord fondu sous forme de gros lingots, lesquels sont alors taillés (sciage) en briques dans lesquelles on découpe des plaques ou gallettes fines (wafer) d'environ 200 microns d'épaisseur. Pour fabriquer les cellules photovoltaïques à partir de ces gallettes, on a ensuite recours à différents procédés (Figure 6) :

- **le dopage** par des impuretés bien choisies : à cinq électrons périphériques pour avoir une

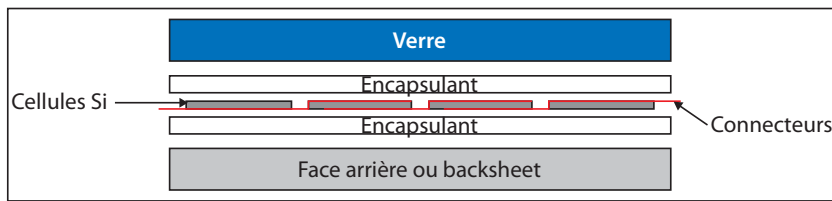
zone n à excès d'électrons, et à trois électrons périphériques pour avoir une zone p à défaut d'électrons (voir l'*Encart* : « **Les panneaux photovoltaïques, ou comment transformer la lumière en électricité** ») ;

- **l'encapsulation** : les cellules sont ensuite assemblées sous forme de modules, incorporant un certain nombre de matériaux polymères dont le rôle est de les protéger contre l'eau et l'oxygène de l'air, de permettre leur maintien en place et de protéger de la corrosion les nombreuses connexions électriques (qui sont souvent en cuivre) ;

- **la fabrication de la face arrière** du panneau (backsheet) : dans la majeure partie des cas, elle est constituée d'une couche de polymère

Figure 6

Procédé de fabrication des panneaux photovoltaïques en silicium cristallin : une fabrication verticalement intégrée.



**Figure 7**

Structure schématisée la plus classique d'un module photovoltaïque.

L'ensemble est laminé à chaud en plaçant successivement les différentes couches à partir du verre substrat puis en traitant pendant 10 à 15 minutes à 150 °C de façon à permettre à l'encapsulant de réticuler chimiquement.

fluoré blanc donc le rôle est de réfléchir et de récupérer les photons par l'arrière. Cette couche est anti-UV, antisalisure et à haute durabilité ;

– **l'assemblage des modules** en systèmes : incorporation des connectiques électriques et de tous les éléments en aval capables d'assurer la gestion électrique du système.

La **Figure 7** représente une coupe complète d'un module photovoltaïque où l'on retrouve au centre les cellules au silicium et leurs connecteurs protégés par les deux couches d'encapsulant à base de polymère, la face arrière réfléchissante et la face avant, en général constituée d'une plaque de verre. Les différentes opérations d'assemblage se font par laminage<sup>6</sup> à chaud pour positionner les différentes couches, en partant de la plaque de verre qui sert de support et en traitant 10 à 15 minutes à 150 °C pour produire la réticulation chimique<sup>7</sup> de l'encapsulant.

6. Le laminage est un procédé de fabrication par déformation plastique de matériaux par compression continue au passage entre deux cylindres tournant dans des sens opposés.

7. La réticulation chimique de chaînes polymères correspond à la formation d'un réseau tridimensionnel entre ces chaînes (qui peut se faire sous l'action de l'air ou encore par chauffage), qui se lient les unes aux autres par des liaisons chimiques covalentes et forment un gel (ou élastomère) où elles ne peuvent plus couler.

## 2.2. Comment rendre le photovoltaïque attractif et compétitif ?

Dans le **Tableau 1** figurent les prix moyens des technologies photovoltaïques européennes de la filière silicium comparées à celles des producteurs chinois et japonais. Les technologies couches minces apparaissent les moins chères, mais du fait de leurs rendements moins élevés, il faudra plus de surface pour obtenir la même énergie. On constate une baisse générale des prix sur l'année 2009 de l'ordre de 30 à 40 %.

Le coût de production du module européen, qui est de 1,2-1,3 €/W en 2010, se décompose de la façon suivante (**Figure 8**) :

- les matériaux non semi-conducteurs tels que les polymères et le verre ;
- les matériaux semi-conducteurs tels que le silicium ;
- les procédés mis en jeu pour réaliser les lingots, les briques et les galettes, en particulier le sciage, où le rendement est loin d'être de 100 % car il y a beaucoup de pertes de silicium au cours de l'opération ;
- la fabrication de la cellule ;
- si l'on estime le coût de vente moyen européen à une valeur de l'ordre de 1,65 €/W en 2010, il faut encore y ajouter l'aval, c'est-à-dire la structure porteuse éventuelle, la conversion électrique et l'installation. En Europe, ce prix est en moyenne de 1,5-1,8 €/W en 2010, soit un total de 3,15-3,45 €/W, auxquels il faut ajouter la marge des installateurs.

Pour rendre le photovoltaïque plus attractif, il faudrait

Tableau 1

Évolutions respectives des prix du silicium cristallin et des couches minces sur 2009. Remarque : les prix indiqués sont ceux des modules hors installation, sur le marché international.

Type de module	Prix moyen (€/W) déc. 2009	Variation janv.-déc. 2009
Silicium cristallin producteurs européens (rdt 16,5 %)	2,05	-35 %
Silicium cristallin producteurs chinois (rdt 16,5 %)	1,62	-45 %
Silicium cristallin producteurs japonais (rdt 16,5 %)	2,05	-35 %
Couches minces Cd-Te (rdt 11 %)	1,68	-20 %
Couches minces silicium amorphe (rdt 7 %)	1,46	-34 %

arriver, en 2015, à un prix de vente de 1,2-1,3 €/W, soit une diminution de 30 %. Pour y parvenir, il faudra augmenter le rendement et diminuer les coûts, ce qui implique la mise en œuvre d'autres technologies comme :

- des hétérojonctions<sup>8</sup>, relativement compliquées technologiquement et plus sensibles ;
- l'utilisation des contacts arrière pour récupérer tous les électrons par l'arrière et non plus par l'avant (évitant ainsi l'ombrage des grilles sur la face avant : voir la **Figure 13**) ;
- des galettes plus fines pour diminuer la quantité de silicium par watt. Aujourd'hui, les galettes sont de 180 microns d'épaisseur. Lorsqu'on la diminue, le matériau devient plus cassant et les rebuts augmentent ;
- le cuivre au lieu de l'argent pour véhiculer le courant et,

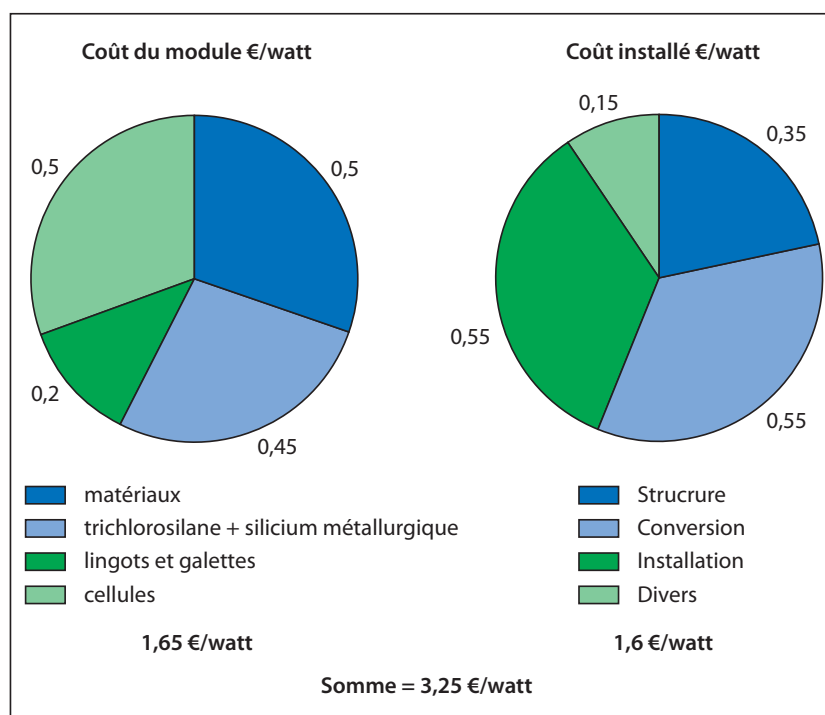
8. Une hétérojonction est une jonction formée de deux semi-conducteurs différents ou d'un métal avec un semi-conducteur.

d'un point de vue général, utiliser des matériaux moins coûteux sur tout le reste de la chaîne.

*Mais tout cela sera insuffisant si les coûts avals n'évoluent pas et si l'on ne met pas en place une gestion fiable de l'électricité produite afin d'éviter de solliciter trop l'électronique.*

Figure 8

Coût de la production des modules photovoltaïques en Union européenne en 2010 : 1,2-1,3 €/watt.



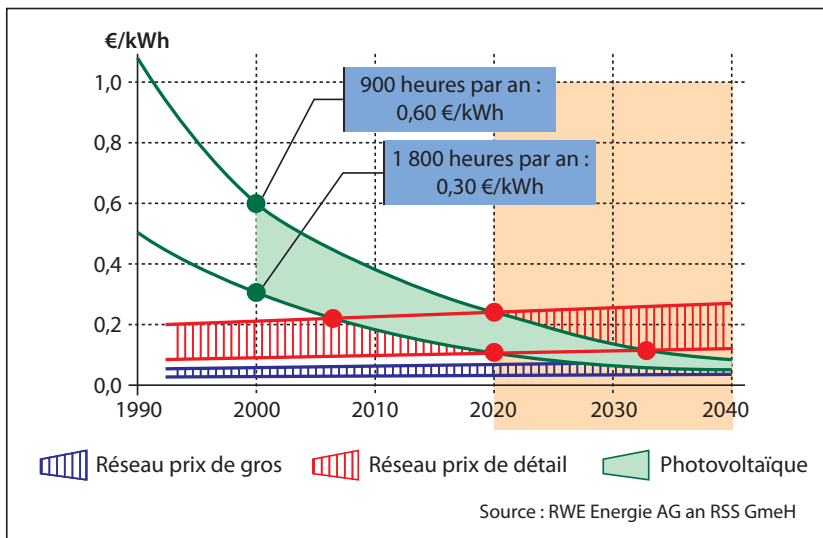


Figure 9

La parité réseau en fonction de l'ensoleillement (fourchettes de prix par kWh).

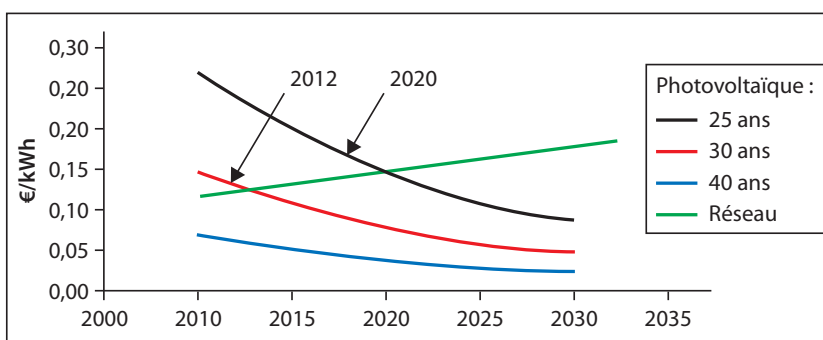
À partir de 2020, la parité réseau commencera à être atteinte par l'ensemble des pays européens.

Sur la **Figure 9**, on voit que la parité réseau varie en fonction de l'ensoleillement donc selon les années et selon le lieu géographique, mais **le principal paramètre à considérer est le coût du kilowatt-heure (kWh), dont la diminution ne sera assurée que par une augmentation de la durée de vie des panneaux**. Une étude allemande a montré que la parité réseau pourrait être atteinte en 2012 pour une durée de vie prévue des panneaux de trente ans et en 2020 pour une durée de vie de vingt-cinq ans. Si l'on pouvait concevoir des panneaux de durée de vie de quarante ans, la parité avec le réseau serait déjà atteinte aujourd'hui (**Figure 10**).

Il est donc fondamental d'accroître la durée de vie des systèmes pour atteindre la parité

Figure 10

Coût du kilowatt-heure (kWh) en euros en fonction de la durée de vie du panneau photovoltaïque en Allemagne.



réseau et diminuer le coût du kWh. Pour atteindre cet objectif, les chimistes et les électroniciens devront travailler pour améliorer : les protections, les encapsulations, les pâtes de métallisation et toute l'électronique du système.

La mesure du kWh est bien plus pertinente que celle du kW.

### 2.2.1. Comment augmenter la durée de vie des panneaux ?

Si l'on veut fabriquer des panneaux photovoltaïques qui dureront longtemps, il faut assurer une bonne protection des cellules : pour cela ils doivent :

- être insensibles à l'eau ;
- avoir une bonne inertie chimique ;
- avoir une transmittance<sup>9</sup> adaptée à la réponse spectrale des cellules ;
- être faciles à mettre en œuvre ;
- résister au fluage<sup>10</sup> ;
- être bien isolés thermiquement ;
- être traités ou être naturellement antisalissure ;
- être recyclables.

Dans le cahier des charges des systèmes de protection des cellules, les encapsulants jouent un rôle important, comme le montre la **Figure 11** qui donne les courbes de transmittance en fonction de la longueur d'onde pour

9. La transmittance lumineuse d'un matériau est la fraction de l'intensité lumineuse le traversant.

10. Le fluage est un phénomène physique qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante pendant une certaine durée.

trois encapsulants différents. L'éthylène vinylacétate (EVA) est aujourd'hui l'encapsulant le plus fréquemment utilisé ; il coupe à environ 350 nm le rayonnement solaire, soit les ultraviolets. Certains encapsulants (comme l'« encapsulant 1 ») laissent en revanche passer les ultraviolets, ce qui n'est pas forcément un avantage à long terme car d'une part, il faut tenir compte du spectre de réponse solaire de la cellule utilisée qui est peut être mauvais dans l'UV, et d'autre part les ultraviolets peuvent nuire aux structures sous-jacentes.

### 2.2.2. Comment diminuer le coût lié au silicium et à sa mise en œuvre ?

La croissance du marché a incité les producteurs de silicium à investir car les délais pour les nouvelles capacités ont provoqué une pénurie en 2007-2008. Si la croissance photovoltaïque ne dépasse pas 30 %, il devrait de nouveau y avoir une disponibilité de silicium (**Figure 12**) ; aujourd'hui, l'offre est supérieure à la demande et le prix risque donc de devenir plus « modéré », peut-être de 30 €/kg en 2012. Seuls les industriels avec des structures de coût et un savoir-faire bien établis seront compétitifs sur le long terme car les usines en question nécessitent des investissements très lourds et une compétence avérée.

Comment améliorer l'efficacité d'un panneau en silicium ? Plusieurs possibilités sont envisageables :

- en texturant la surface du silicium de manière à diminuer la réflexion de la lumière.

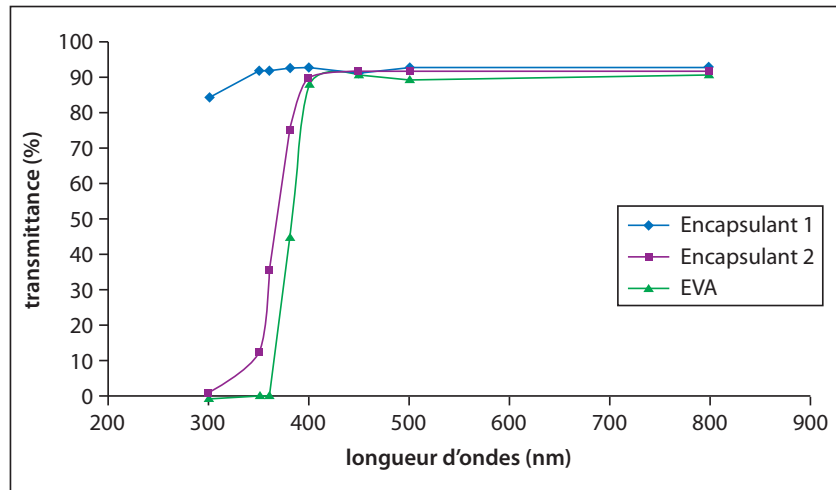


Figure 11

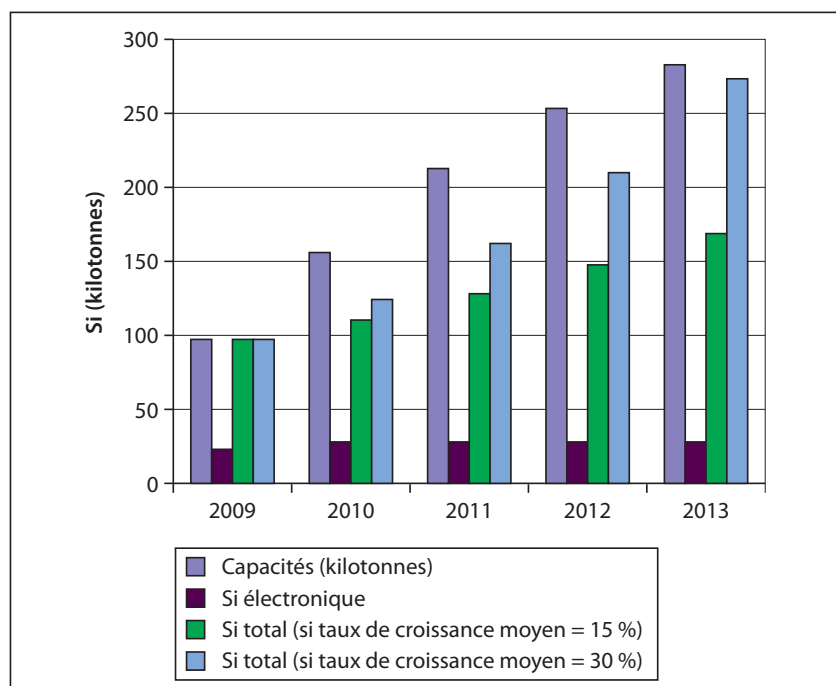
Étude comparative de différents types d'encapsulants pour protéger les cellules photovoltaïques. Il est important que l'encapsulant assure une transmittance optimale pour assurer un bon rendement tout en préservant les cellules de la dégradation par les rayons ultraviolets (en dessous de 400 nm de longueur d'onde).

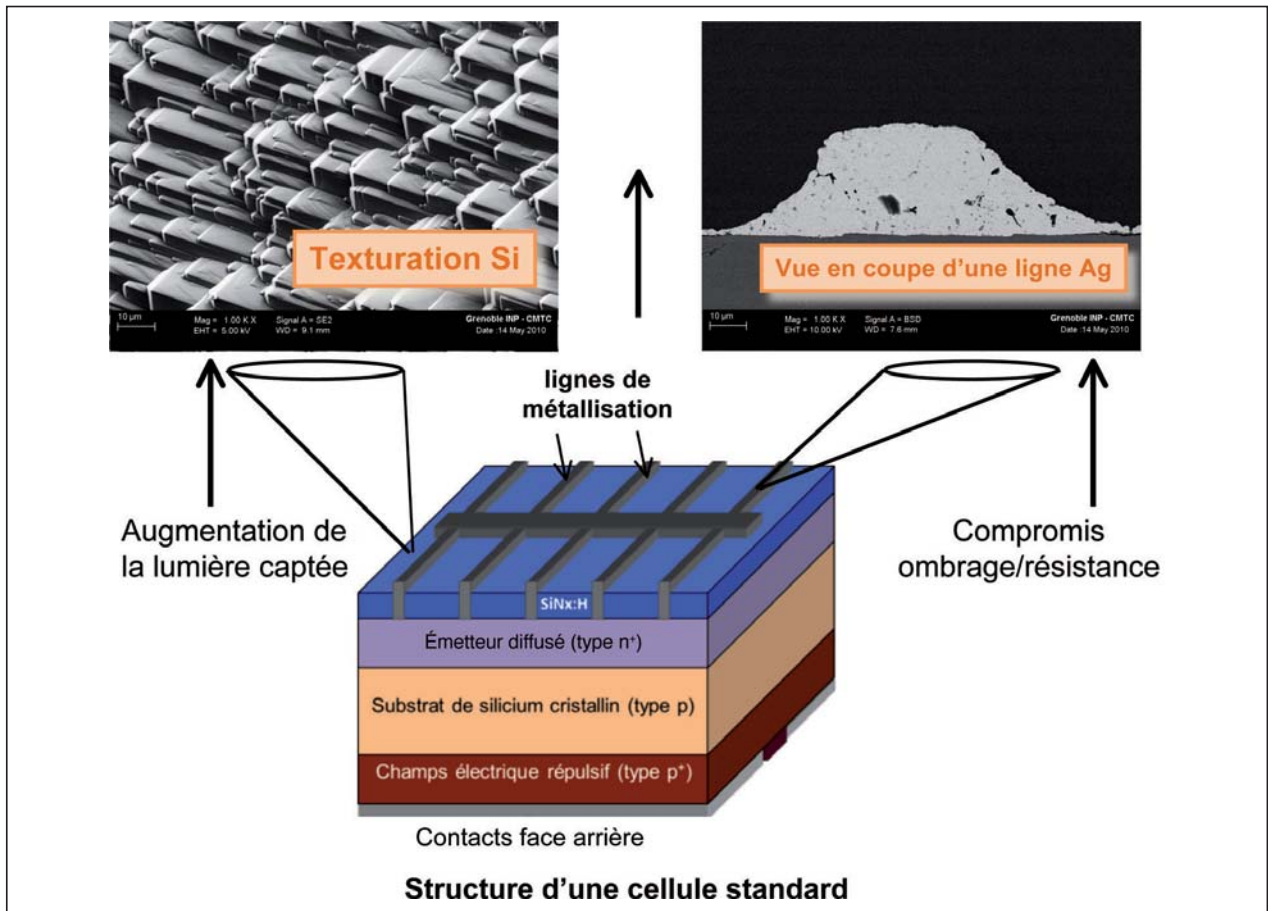
Les formes de pyramides que l'on voit sur la **Figure 13** à gauche, qui sont faites par attaque chimique, permettent de mieux capter les photons et d'augmenter le rendement de la cellule ;

- en diminuant les effets de l'ombrage : la **Figure 13** montre à droite la coupe d'une ligne de métallisation en argent qui sert à récupérer les électrons. Comme on le voit sur le schéma d'une cellule en bas de cette figure, ces lignes font de l'ombrage et diminuent la quantité de lumière captée.

Figure 12

Les problématiques des prix liées au silicium.





**Figure 13**

Pour augmenter le rendement des cellules photovoltaïques en silicium, on peut travailler sur la texturation de la partie silicium (image au microscope) : c'est une question de chimie ! On peut aussi trouver un compromis entre ombrage et résistance pour les lignes de métallisation.

L'idée est donc, soit de récupérer la totalité des électrons par l'arrière, moyennant différentes techniques à mettre au point, soit de diminuer la largeur de ces lignes mais avec l'inconvénient dans ce cas d'augmenter la résistance. Sur la **Figure 14** est représentée la perte de rendement en fonction de la largeur des lignes de métallisation (courbe verte) ;

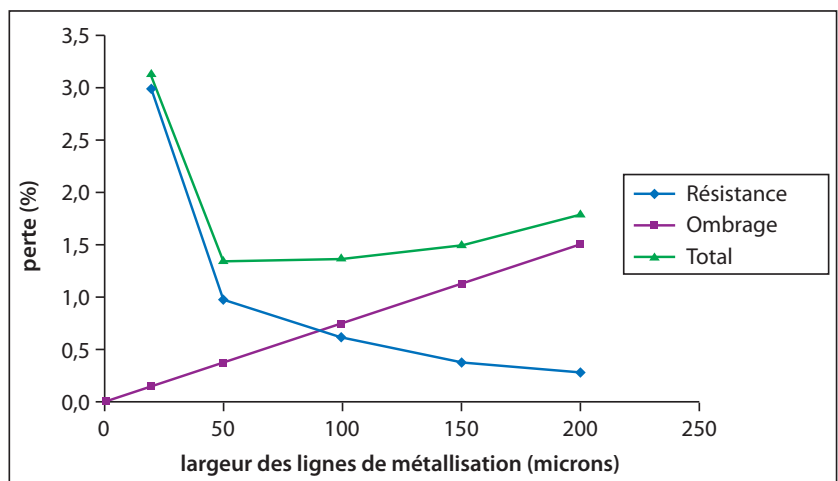
la courbe bleue représente la diminution de la résistance et la courbe violette l'augmentation de l'ombrage. On voit bien qu'il y a un optimum pour une certaine largeur des lignes de métallisation.

**2.2.3. Le recyclage des panneaux**

La recyclabilité des panneaux photovoltaïques sera aussi

**Figure 14**

Compromis ombrage-résistance. On a au moins 1,4 % à regagner par la disparition des contacts en face avant.



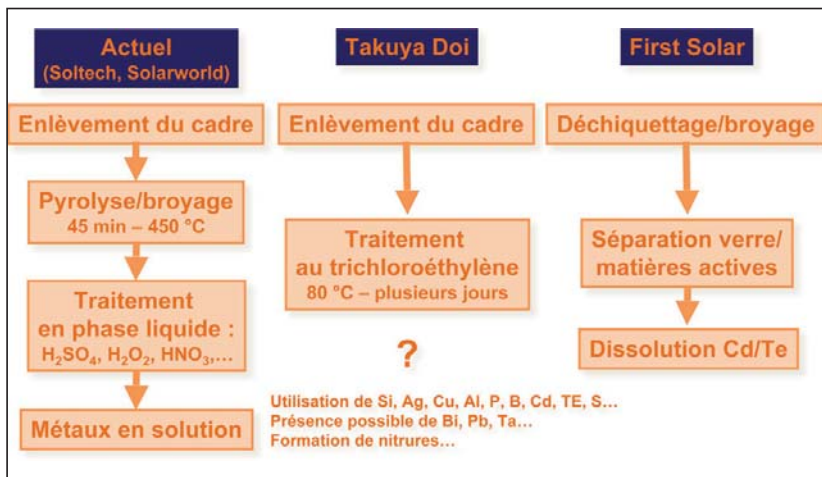


Figure 15

Face à l'absence de réglementation spécifique pour le recyclage des panneaux, l'association européenne PV cycle<sup>11</sup> a été créée en 2007, regroupant plus de trente producteurs européens de panneaux photovoltaïques qui s'engagent à collecter et recycler les panneaux usagés installés en Europe.

déterminante pour la durabilité de cette technologie. À l'heure actuelle, ce sujet est loin d'être mûr, et les traitements sont pour l'instant très rustiques car il n'existe pas de réglementation spécifique. Sur la **Figure 15** sont résumées les méthodes utilisées par les différents fabricants. Les parties cadre métallique, cuivre et semi-conductrice sont récupérées, mais on ne sait en revanche que faire des polymères, qui sont généralement brûlés.

Il reste donc un très gros effort à faire pour rendre le photovoltaïque plus acceptable d'un point de vue environnemental. Deux projet

européens et un projet FUI (Fonds unique interministériel), dont Arkema fait partie, ont été lancés pour résoudre les problèmes de recyclage dans les différentes filières photovoltaïques, avec les préoccupations de :

- simplifier les procédés ;
- diminuer l'énergie grise (celle utilisée pour la production, la fabrication, l'utilisation et le recyclage des matériaux) ;
- diminuer les rejets liquides ;
- recycler au mieux le silicium, le verre, les plastiques, l'argent et le cuivre.

Des PME et des start-up françaises se positionnent actuellement sur le sujet.

## Le photovoltaïque au silicium et demain ?

Si l'on se pose la question de l'avenir du photovoltaïque dans le cadre de la filière silicium, il est clair que pour le consommateur, la durée de vie est actuellement le problème le plus important à prendre en compte, dans la mesure où elle est actuellement donnée pour vingt ans (période pendant laquelle la perte d'efficacité

11. [www.pvcycle.org](http://www.pvcycle.org)

est inférieure à 20 %), alors que le retour sur investissement est de dix à quinze ans. De plus, il faut prendre conscience que les problèmes de stockage de l'électricité produite doivent être résolus à un coût acceptable, du fait du caractère intermittent de cette énergie.

Si l'on veut diminuer les dépenses d'énergie liées à l'habitat, actuellement l'attitude la plus responsable et la plus pertinente est de travailler d'abord sur l'isolation du bâtiment (voir notamment les *Chapitres de J.-C. Bernier, D. Quénard, J. Ruchmann et J. Souvestre*). Quand les bâtiments sont proches de l'énergie positive, l'équipement photovoltaïque devient alors pertinent. Par ailleurs, il est impératif de résoudre les problèmes de cycles de vie qui ont été jusqu'à présent très négligés.

Les nouvelles technologies couches minces ou les systèmes organiques en cours de recherche, et pour certaines en cours de développement (voir le *Chapitre de D. Lincot*), vont certainement résoudre beaucoup de problèmes dans la mesure où le retour sur investissement pourrait être diminué jusqu'à trois ans et même pour les derniers à une année.

La France a démarré depuis longtemps dans le photovoltaïque mais n'a pas donné les efforts suffisants, du fait de la place de l'énergie nucléaire dans le mix énergétique, jusqu'à il y a environ six à sept ans (en comparaison à l'Allemagne qui y travaille intensément depuis vingt ans) ; elle tient maintenant sa place au niveau de l'Europe. La Chine, qui a démarré tard, s'est très rapidement développée dans ce domaine avec une production bien implantée, moyennant de très gros investissements, dont la plus grosse partie de la production est actuellement exportée, tandis que l'Inde est en plein développement.



**En résumé :** augmenter le rendement, diminuer le coût de fabrication, stocker l'énergie, augmenter la durée de vie des cellules et résoudre les problèmes de recyclage, avec en plus de cela l'intégration esthétique, sont certainement les problèmes sur lesquels les chercheurs, les architectes et les industriels doivent continuer à travailler.

# Crédits photographiques

Fig. 5 : srsenergy.

Fig. 6 : Photowatt.

Tableau 1 : source : Snapshot of spot market for PV modules- quaterly report Q4 2009, PV Xchange, Photovoltaics, 1st Quarter 2010, p. 345.

Fig. 9 : source : d'après RWE Energy.

Fig. 10 : source : Grid parity analysis of solar photovoltaic

systems in Germany using experience curves, Bhandari R. (2009). *Solar Energy*, **83** : 1634.

Fig. 12 : source : Snapshot of spot market for PV modules- quaterly report Q4 (2009). PV Xchange, Photovoltaics, 1st Quarter 2010, p. 345.

Fig. 13 : images microscope : Grenoble INP/CMTC.