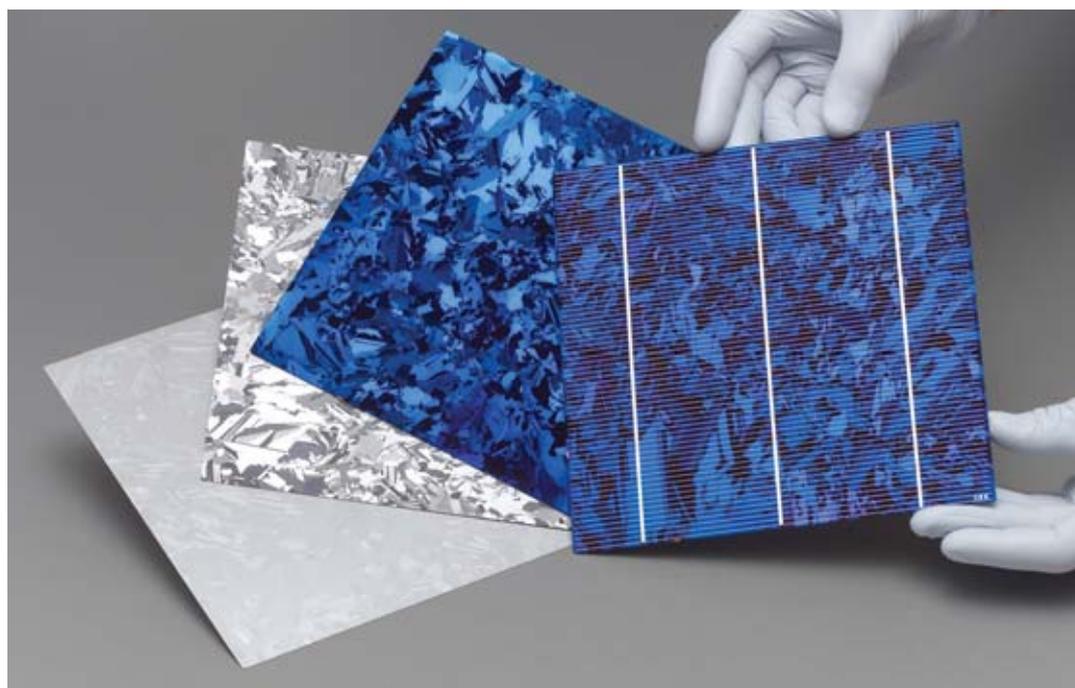




Des cellules de haute technologie pour des modules moins chers

Si elle veut être compétitive avec d'autres sources de production, l'électricité photovoltaïque doit voir son coût se réduire encore considérablement. Au-delà de l'optimisation de l'utilisation des modules actuels, de nouvelles approches technologiques sont étudiées. Lorsque les verrous technologiques seront levés, notamment avec l'aide des nouveaux moyens de développement que le CEA ouvre aux industriels, la filière des composites organique/inorganique pourrait fournir des composants meilleur marché pour des applications complémentaires de celles couvertes industriellement par la filière silicium, même si leurs rendements restent plus faibles que ceux de cette dernière.



Plaques de silicium de 200 mm x 200 mm à divers stades de fabrication d'une cellule photovoltaïque sur la plate-forme Restaura (de gauche à droite : après découpe par scie à fil, après texturation et formation de l'émetteur, après dépôt de la couche bleue anti-réfléchissante et après formation des grilles de contact, avant mise en module).

L'industrie **photovoltaïque** aborde aujourd'hui de nouvelles routes jalonnées de défis technologiques qui ont pour régulateurs des impératifs économiques et budgétaires. En vingt ans, le prix de vente du **watt** photovoltaïque a considérablement baissé. De plus de 100 € en 1975, il est à l'heure actuelle tombé entre 2 et 3 € pour les **modules photovoltaïques** (encadré 1) et entre 5 et 6 € pour un système connecté au réseau. La production industrielle mondiale est quant à elle en forte croissance, atteignant 750 MW en 2003, alors qu'elle était autour des 50 MW en 1990, et les prévisions à l'horizon 2010 estiment sa multiplication par 20. Le coût de l'électricité photovoltaïque doit pourtant être encore réduit pour être compétitif avec les autres

sources de production. Ceci nécessitera de nouvelles approches technologiques permettant un abaissement des coûts et/ou une augmentation du **rendement de conversion**. La filière **silicium** vise à diminuer les coûts à la fois par l'optimisation des procédés et par l'accroissement des rendements, qui resteront probablement toujours plus élevés que ceux de la filière organique à base de **polymères**. Cette dernière n'en vise pas moins ce même objectif de réduction des coûts, les matériaux plastiques étant moins chers que le silicium.

En attendant, la bonne caractérisation des modules est techniquement et économiquement nécessaire à une connexion au réseau dans de bonnes conditions.

D. Michon-Artechnique/CEA

La caractérisation des modules solaires photovoltaïques



Bancs de caractérisation de modules de la plate-forme SOL.

La mesure de la puissance électrique des modules solaires photovoltaïques et le calcul de l'énergie produite doivent être aussi précis que possible, car ces données ont un fort impact financier. Pour encourager les particuliers à installer des modules connectés au réseau, il leur est en effet accordé une subvention dépendant de la puissance électrique installée, ainsi que la possibilité de vendre à l'exploitant les kilowattheures produits.

Les **cellules photovoltaïques** (encadré D. *Comment fonctionne une cellule solaire photovoltaïque?*, p. 115) sont destinées à être intégrées dans des **modules** (encadré 1) qui fournissent en plein soleil une puissance de l'ordre de 100 à 150 W/m², pour un coût sortie usine en cette année 2004 d'environ 250 à 300 € pour 100 W.

En France, depuis le printemps 2002, les particuliers qui installent des modules solaires photovoltaïques raccordés au réseau peuvent bénéficier d'une prime proportionnelle à la **puissance électrique** installée, soit 4600 € TTC par **kilowatt**⁽¹⁾. Certains conseils régionaux complètent cette subvention, et des avantages fiscaux permettent de réduire les frais à la charge du particulier. L'ensemble des aides ne couvre néanmoins pas les frais d'installation, estimés à près de 8 500 € TTC par kilowatt. Le législateur a donc prévu un prix de rachat par l'exploitant du réseau du **kilowattheure** produit pendant les vingt premières années de fonctionnement de l'installation. Pour les contrats signés en 2003, le prix de rachat par EDF du kilowattheure était de l'ordre de 15 centimes d'euro HT en France métropolitaine, et de 30 centimes d'euro HT en Corse et dans les départements d'outre-mer. Ce tarif a baissé d'environ 10 % pour les contrats signés en 2004.

Ainsi, le temps de retour sur investissement d'une installation photovoltaïque connectée au réseau est directement lié au montant des aides, proportionnel à la

puissance électrique installée, et à la production électrique du module photovoltaïque sur vingt ans, qui dépend du site.

Puissance électrique : une mesure précise indispensable

La puissance électrique des modules photovoltaïques est mesurée chez le fabricant, en bout de chaîne de montage, dans des conditions normalisées : un éclairage de 1 000 W/m², avec une répartition spectrale bien précise, proche du spectre solaire, et une température de module de 25 °C. La puissance électrique peut également être mesurée en extérieur, en utilisant directement la lumière du soleil qui, par ciel dégagé, procure un ensoleillement très proche de 1 000 W/m². La mesure de puissance électrique de modules photovoltaïques n'est pas facile à réaliser, aussi bien en éclairage naturel qu'artificiel. C'est pourquoi il n'est pas rare d'observer des différences significatives entre les bancs de caractérisation, de plus ou moins 5 %, que ce soit chez les fabricants ou dans les laboratoires de référence de l'industrie. L'enjeu économique est de taille, car le prix de vente des modules est directement proportionnel à la puissance mesurée. Aussi, tout changement dans la valeur des mesures de puissance influe directement sur le bénéfice de l'industriel.

Le projet européen PV-Catapult, qui a démarré à l'été 2004 et auquel participe le CEA, a en particulier pour objectif de comprendre les différences observées entre les divers bancs d'essai et d'harmoniser les pratiques

(1) Voir le site Internet de l'Ademe à la page : <http://www.ademe.fr/particuliers/Fiches/reseau/rub5.htm>.

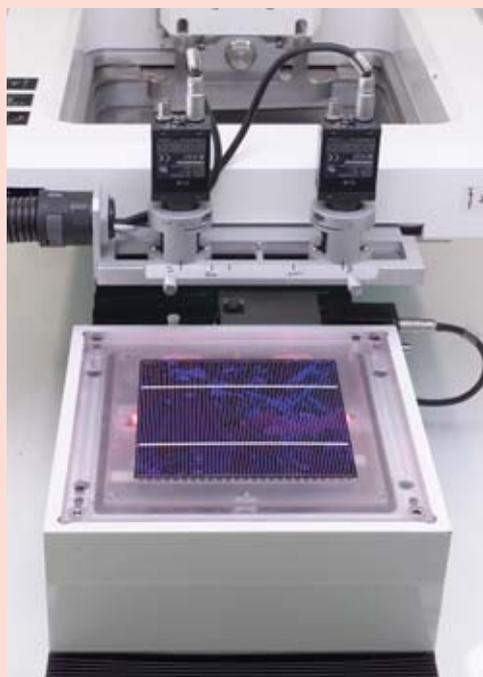


De la cellule au module

1

Le **silicium** est le matériau le plus utilisé pour la fabrication des **cellules photovoltaïques**, ensuite assemblées en **modules**. Mais d'autres commencent à s'imposer dans certaines applications.

Une cellule photovoltaïque est fondée sur un matériau **semi-conducteur**, le plus largement employé dans leur fabrication (95% du marché) étant actuellement le **silicium cristallin** (micro, multi ou monocristallin)⁽¹⁾. Sa largeur de **bande interdite** en fait un des matériaux permettant les plus forts **rendements de conversion**, de l'ordre de 12 à 17% selon la nature cristalline du matériau utilisé et le procédé de fabrication. Ce rendement est le double de celui du **silicium amorphe**, qui représente moins de 5% du marché.



D. Michon-Artechnique/CEA

Plaque de silicium après dépôt des grilles de contact par sérigraphie.

Les cellules photovoltaïques sont réalisées dans des plaquettes (**wafers**) de silicium d'une épaisseur inférieure à 300 μm découpées dans des lingots de silicium monocristallin (qui reste relativement cher) ou multicristallin. Le silicium provient encore majoritairement des rebuts de la microélectronique, mais cette source s'avère insuffisante et des fabrications de silicium de qualité photovoltaïque, d'une pureté inférieure à celle du silicium utilisé en microélectronique, sont en cours de développement.

(1) À ce sujet, voir l'article *Les modules solaires photovoltaïques : du silicium cristallin aux couches minces*, 2001, sur le site Internet du CEA à la page : <http://www.cea.fr/fr/Publications/clefs44/clefs4427.html>.

Globalement, la fabrication des plaquettes de silicium représente 40% du prix du module, la technologie de la cellule elle-même 20% et la mise en module 40%. Pour réduire les coûts, des gains doivent être recherchés à toutes les étapes : la purification du silicium, la fabrication des lingots et la découpe des plaquettes. La solution séduisante consistant à produire des rubans de silicium n'a pas réussi à s'imposer, en raison notamment de la moins bonne qualité du silicium obtenu. Le bon fonctionnement d'une cellule repose en effet sur plusieurs facteurs : une absorption maximum de la lumière sur tout le spectre solaire, une collecte efficace des **porteurs (électrons et trous)** générés par les **photons** et l'établissement d'une connexion électrique avec le circuit extérieur.

La **jonction** est donc formée par diffusion de **dopants** (les plaquettes utilisées sont généralement **dopées p**, mais du phosphore est introduit par diffusion afin de **doper n** le silicium sur une profondeur de l'ordre du **micromètre**). Un dépôt anti-réfléchissant de nitrure de silicium, qui sert aussi à améliorer la qualité du matériau, est ensuite effectué. Puis les grilles métalliques servant à collecter le courant, très étroites afin de limiter l'effet d'ombrage, sont élaborées par **sérigraphie**. Un recuit permet alors la formation du contact électrique entre le silicium et les grilles collectrices. Un ruban d'aluminium destiné à réaliser les interconnexions entre cellules est ensuite soudé sur les grilles. Puis les cellules sont testées individuellement, triées selon leurs rendements de conversion, et assemblées en modules. Le module remplit plusieurs fonctions : connecter les cellules entre elles de manière à fournir la tension voulue (typiquement 36 cellules en série pour une sortie sur 12 V) et les protéger contre les agressions de l'environnement. La face éclairée des cellules est collée sur un verre trempé qui assure la protection mécanique. L'arrière des cellules est protégé par une feuille de verre ou un film plastique moins lourd, les collages étant réalisés par un **polymère** (EVA) qui assure la protection du module contre l'humidité.

Parmi les matériaux dont les propriétés les rendent susceptibles de se substituer au silicium, l'un, le CdTe (tellure de cadmium) a été abandonné, entre autres parce que la présence du cadmium, métal lourd, posait un problème environnemental en fin de vie des modules. Le CIS (cuivre/indium/sélénium) est actuellement le matériau en couches minces le plus prometteur, mais sa contribution au marché photovoltaïque est encore faible, puisqu'inférieure à 1%.

Les efforts de recherche actuels portent essentiellement sur la réduction des coûts (le prix de vente des modules se situe à ce jour entre 2,50 et 3 €/W), notamment par le biais de l'augmentation des rendements de conversion.

de mesure en Europe afin de contribuer à une normalisation internationale.

Réduire les incertitudes de mesure

La plate-forme SOL (*Solar Outdoor Laboratory*) du centre CEA de Cadarache a été conçue pour le test en

conditions extérieures du générateur photovoltaïque. Elle s'intègre dans une chaîne de plates-formes qui va du composant élémentaire au système complet : Restaure au centre CEA de Grenoble pour la fabrication des cellules photovoltaïques (*voir La plate-forme Restaure : la réponse à une attente industrielle, p. 120*) et SOL pour les modules et les systèmes photovoltaïques.



Radiomètre à cavité absolu, permettant la mesure très précise de l'intensité du flux solaire.

SOL est susceptible, avec ses mesures en ensoleillement naturel, de jouer un rôle de référence dans cette démarche normative. L'acquisition d'un radiomètre à cavité absolu puis d'un spectroradiomètre vont permettre, en profitant de l'ensoleillement exceptionnel du site en toutes saisons, de réaliser des mesures très précises sur le flux solaire, tant en intensité qu'en répartition spectrale, et de contribuer à réduire les incertitudes de mesure sur la puissance des modules. La stabilité temporelle et l'uniformité spatiale du flux solaire en font une source lumineuse sans pareil, notamment pour la caractérisation des modules photovoltaïques de nouvelle technologie à couches minces,

difficiles à tester en éclairage artificiel. En effet, les flashes utilisés produisent des éclairs trop courts et ont des raies spectrales très gênantes.

Calculer l'énergie électrique produite

L'énergie électrique produite par des modules photovoltaïques dépend de nombreux facteurs : leur puissance standard, bien sûr, mais aussi l'énergie lumineuse qu'ils reçoivent et, dans une moindre mesure, leur température moyenne pendant leur période de fonctionnement.

L'énergie lumineuse reçue dépend du climat du site considéré, avec une augmentation de l'ensoleillement du Nord au Sud de la France, et des pics d'énergie en Provence et dans les Pyrénées-Orientales. Elle est aussi fonction de la disposition du module, avec un maximum d'éclairage reçu pour un module orienté au Sud (dans l'hémisphère Nord) et incliné à peu près à la latitude du lieu.

Les campagnes de mesure les plus récentes menées sur la plate-forme SOL ont permis de quantifier l'influence de la température, en montrant que le rendement d'un module sur une période assez longue (au moins un mois) est une fonction linéaire de la température moyenne du module sur la période (encadré 2). Il est estimé que le rendement moyen d'un module au **silicium cristallin** décroît d'environ 0,5% par °C.

Comme la *température moyenne* du module dépend de la température extérieure et du vent moyen du lieu considéré, il apparaît que pour un même ensoleillement le rendement s'accroît du Sud au Nord et, de façon générale, dans les régions ventées. La diminution du rendement du Nord au Sud, qui peut sembler paradoxale, trouve son explication dans le fait que l'énergie produite augmente beaucoup en corrélation avec l'accroissement de la ressource solaire.

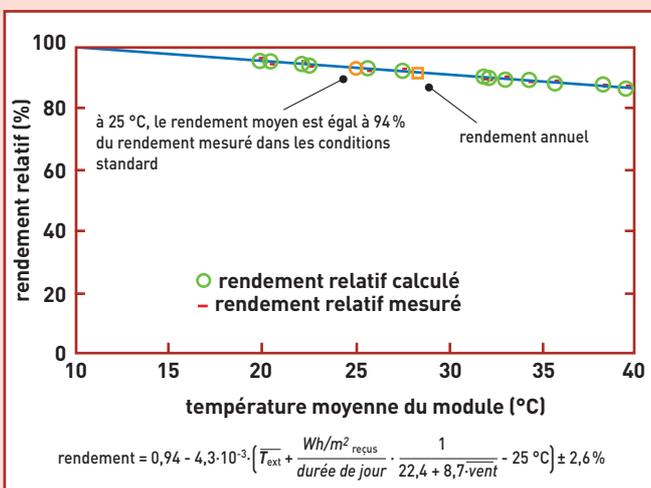
Enfin, si l'ensemble des pertes d'un système photovoltaïque connecté au réseau, y compris celles dans



Étalonnage de pyranomètres selon une nouvelle méthode améliorant la précision des mesures. Les trois appareils sont des collimateurs pointés vers le Soleil.

Influence de la température sur le rendement d'un module photovoltaïque

2



Rendement relatif d'un module photovoltaïque en fonction de sa température moyenne. Il peut se calculer à partir des données météorologiques moyennes.

Le rendement d'un **module photovoltaïque**, pendant une période donnée, est le rapport entre l'énergie électrique produite par le module et l'énergie solaire reçue. Les rendements annuels moyens des modules photovoltaïques peuvent varier de façon considérable suivant la technologie du module, de moins de 5% à plus de 15%. Le rendement relatif d'un module pour une période donnée est alors le rapport entre le rendement énergétique mesuré pendant la période et le rendement mesuré dans les conditions dites standard (éclairage de 1 000 W/m² avec une composition spectrale déterminée et une température de **cellules photovoltaïques** de 25 °C).

On constate que ce rendement relatif est une fonction linéaire de la température moyenne diurne du module photovoltaïque (figure). Cette dernière s'exprime à son tour en fonction de la température extérieure, de l'éclairage moyen et de la vitesse du vent, suivant une formule exprimant les lois thermiques classiques de la **convection** et du rayonnement infrarouge. Dans cette équation, les coefficients dépendent entre autres des conditions de disposition du module et des caractéristiques du lieu.



L'onduleur qui transforme le courant continu du module en courant alternatif à 50 Hz, est pris en compte, une décote de 20 à 25 % sur la puissance du module mesurée chez le fabricant peut raisonnablement être appliquée pour les calculs de production électrique.

Par exemple, à Cadarache qui reçoit environ 1 850 kWh/m² d'énergie solaire par an sur une surface

inclinée au Sud à 45°, un générateur photovoltaïque de 1 kW fournira $1 \times 1\,850 \times 80\% = 1\,440$ kWh électriques par an. À raison de 0,15 € HT par kilowatt-heure, le particulier recevra 222 € HT par kilowatt installé et par an, desquels il faudra déduire la location du compteur EDF (malheureusement, la quantité maximale d'énergie remboursée par EDF est de 1 200 kWh par kilowatt installé).



F. Vigouroux/CEA

Mesure de la température de surface d'un module solaire photovoltaïque.

Optimiser l'utilisation des modules

Beaucoup de travail d'expérimentation et de modélisation reste à accomplir pour généraliser ce résultat obtenu sur quelques technologies de modules dans un contexte climatique déterminé. Il s'agira en particulier de bien comprendre et d'optimiser l'utilisation de modules comme élément architectural, surtout dans l'optique de l'intégration dans un même capteur en toiture des fonctions de production d'énergie électrique et de chaleur pour le chauffage des locaux et de l'eau chaude sanitaire.

➤ **Antoine Guérin de Montgareuil**

Direction de la recherche technologique
CEA centre de Cadarache

La plate-forme Restaure : la réponse à une attente industrielle

La création à Grenoble d'un outil national performant de réalisation de cellules photovoltaïques au silicium répond à une attente des entreprises soucieuses de voir développées de nouvelles approches technologiques dans des conditions proches de celles de l'industrie.



D. Michon-Artechnique/CEA

Installation de plaques de silicium de 200 mm × 200 mm sur la pelle de chargement du four de diffusion utilisé pour la formation de l'émetteur de la cellule photovoltaïque. La plate-forme Restaure du CEA/Grenoble est l'une des seules à travailler sur cette surface, le standard étant de 150 mm × 150 mm.

Les nouvelles approches technologiques dans le développement des **cellules photovoltaïques** doivent être validées dans des conditions proches de celles de l'industrie pour pouvoir lui être transférées rapidement. L'outil permettant cette validation était jusqu'à présent le maillon manquant en France dans le développement de ces cellules. La plate-forme technologique Restaure qui vient d'être créée au centre CEA de Grenoble avec le support de l'**Ademe**, au sein d'un ensemble comprenant également les plates-formes "piles à combustible" et "mini-sources d'énergie" de l'organisme, permettra effectivement d'assurer un transfert rapide à l'industrie des technologies développées en laboratoire. Sa réalisation s'inscrit dans la volonté des acteurs nationaux de construire un programme ambitieux de développement du **photovoltaïque**.

Ses équipements sont à l'échelle 1 afin de pouvoir transférer très facilement les procédés développés. Ils ont la souplesse nécessaire pour traiter des plaques de formes et de dimensions très variées (circulaires de 50 à 150 mm de diamètre ou carrées de 50 à 200 mm de côté) et de nouveaux équipements pourront leur être ajoutés pour réaliser des opérations supplémentaires. La plate-forme sera accessible aux personnels des laboratoires extérieurs et aux industriels dans le cadre d'accords spécifiques définissant précisément les termes de la collaboration et la propriété intellectuelle, la gestion pratique étant assurée par un comité de pilotage.

Restaure est opérationnelle depuis la mi-février 2004, et les premières cellules (150 mm × 150 mm) fabriquées avec les procédés classiques atteignent des **rendements de conversion** de 15,3 %, ce qui constitue une bonne base pour la réalisation de cellules performantes.

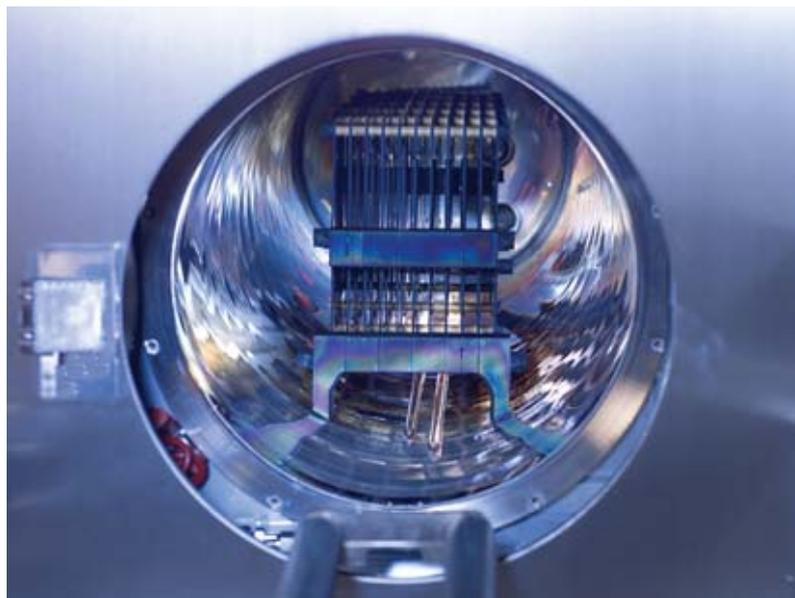
La création de la plate-forme de Grenoble a été très favorablement accueillie par les industriels. Deux programmes visant à diminuer le coût de l'électricité photovoltaïque et pour lesquels la plate-forme sera un outil essentiel viennent d'être lancés. L'un coordonné par Photowatt cherche à obtenir en quatre ans une réduction du coût de fabrication des **modules photovoltaïques** et le second, sur cinq ans et coordonné par le CEA, veut porter les rendements des cellules à 20 % avec une technologie transférable à l'industrie. Ces deux programmes, financés par l'Ademe, sont menés en partenariat avec le **CNRS**.

Le contexte français : priorité à la production

Les acteurs industriels français du photovoltaïque, principalement Photowatt pour la production de cellules et modules photovoltaïques et Total Énergie pour les systèmes, figurent parmi les *leaders* européens. La forte croissance du secteur conduit les producteurs à se concentrer sur le développement de leur production industrielle. Dans le court terme, Photowatt doit produire des cellules au rythme annuel de 30 MW sur un marché dominé à 90 % par la filière au **silicium** : cet objectif est en cours de réalisation avec l'introduction d'un nouveau procédé qui lui permettra de fabriquer des cellules ayant un rendement de conversion de 14 à 15 %. Faisant porter tous ses efforts sur l'augmentation de sa production, l'entreprise entend s'appuyer sur les laboratoires nationaux pour ses nouveaux développements. De fait, la recherche amont dans le domaine photovoltaïque se restructure afin de répondre au mieux aux attentes de l'industriel.

Collaboration à l'échelle européenne

Tous les acteurs nationaux, consultés en 2001 et 2002, s'accordent à dire que leur compétitivité ne pourra se maintenir qu'avec l'appui d'une recherche technologique forte dont un des piliers est la réalisation de plates-formes technologiques capables de développer les "technologies d'avance" à l'instar de l'ISE en Allemagne, de ECN aux Pays-Bas et de l'IMEC en Belgique, pour ne citer que leurs voisins européens. Ces plates-formes souples d'utilisation permettent d'une part, à court terme, de faire sauter les verrous technologiques actuels en collaboration avec les industriels et d'autre part, à moyen terme, de préparer la "technologie d'avance" avec les instituts de recherche nationaux. Une collaboration avec les instituts européens disposant de ces plates-formes sera développée, en particulier dans les domaines de recherche avancée où les moyens pourront être mis en commun. Par ailleurs, les équipementiers (SEMCO, Centrotherm...) attendent, par le retour d'expérience, une amélioration des performances de leurs équipements (fours de diffusion ou de recuit, machines de traitement plasma). Les fabricants de matériaux souhaitent une validation de leurs produits et le développement de procédés adaptés à leurs spécificités. Quant aux fabricants



D. Michon-Artechnique/CEA

Plaques de silicium en cours de traitement dans le four PECVD (*Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition*) pour le dépôt de la couche anti-réfléchissante. Les traitements sont réalisés dans des salles blanches sur des équipements proches de l'industrie, ce qui facilite le transfert des procédés.

de cellules et modules, ils veulent le développement et le transfert de procédés permettant d'augmenter les rendements et de diminuer les coûts de fabrication.

Deuxième étape du programme national

À l'issue de la première étape (un an) qui a vu la réalisation de la plate-forme elle-même et le développement d'un procédé de base ayant permis d'atteindre rapidement les meilleurs rendements de conversion obtenus au niveau industriel, la France dispose d'un outil pour développer des cellules photovoltaïques performantes. Chercheurs et industriels peuvent y tester les innovations issues des laboratoires en les introduisant dans la fabrication de cellules, amener celles jugées utiles au niveau du transfert à l'industrie, en y installant si nécessaire des équipements dédiés, valider des étapes industrielles nouvelles permettant d'augmenter les rendements et de diminuer les rejets et les coûts et, enfin, développer et optimiser la technologie sur des matériaux silicium nouveaux.

La deuxième étape consistera à réaliser en collaboration avec les laboratoires et les industriels les programmes de réduction des coûts et d'augmentation des rendements mentionnés plus haut. D'autres programmes visant à développer une filière photovoltaïque complète (de la fabrication d'un matériau silicium adapté au photovoltaïque à la réalisation du module) sont en cours de montage.

Par ailleurs, une surface est réservée pour la mise au point d'équipements futurs. Les équipementiers pourront ainsi, grâce à la plate-forme, disposer d'un environnement leur permettant de mettre au point de nouvelles machines et de nouveaux procédés. Ils disposeront également de la compétence du personnel du CEA pour la fabrication et la caractérisation des dispositifs.

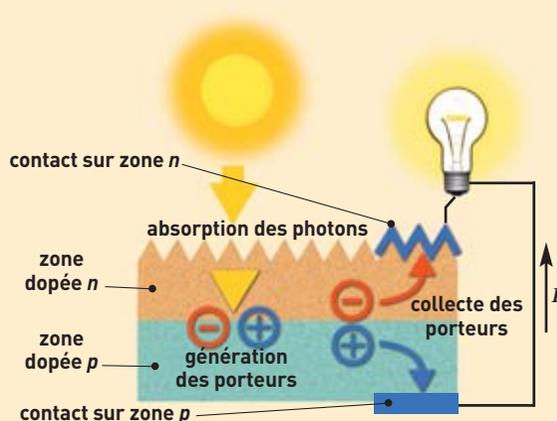
> **Claude Jaussaud**

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.

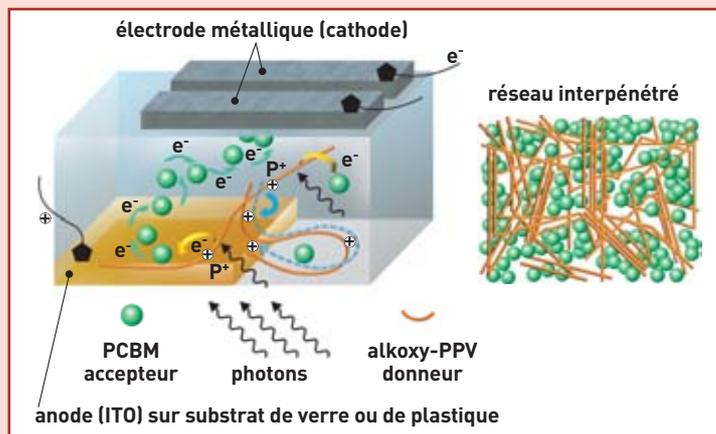


Figure tirée d'une présentation de S. Sarriciffici (www.ilois.at)

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