

1 • Photovoltaïque : le silicium s'impose

Des panneaux solaires de plus en plus performants et de moins en moins chers : l'énergie solaire a de beaux jours devant elle grâce aux nouvelles technologies du silicium.

PAR Franck Daninos,
journaliste
à La Recherche.

Olmedilla de Alarcón, communauté autonome de Castille-La Manche, en plein cœur de l'Espagne. Des panneaux solaires s'étendent à perte de vue : plus de 160 000, au total, couvrant une superficie de 130 hectares. Mise en service en septembre 2008, la centrale photovoltaïque d'Olmedilla est la plus importante au monde. Elle délivre une puissance de 60 millions de watts-crête* et peut alimenter 40 000 foyers en électricité. Mais elle sera bientôt surpassée par une autre centrale dont la construction débutera en 2010, dans le nord de la Californie. Occupant une surface de 285 hectares, elle devrait délivrer une puissance de 550 000 millions de watts-crête.

On le voit. Dans le domaine de l'énergie photovoltaïque, les records sont éphémères, pour la puissance des centrales comme pour le nombre de panneaux installés sur les toits des entreprises, des bâtiments publics et des particuliers. Depuis 2005, le marché du photovoltaïque croît de façon exponentielle : de 40 % à 50 % chaque année. Et la puissance photovoltaïque installée dans le monde a plus que doublé en 2008 par rapport à

l'année précédente, passant de 2,65 milliards à 5,8 milliards de watts-crête.

Évidemment, au regard des autres sources d'électricité, le recours à l'énergie solaire reste marginal (moins d'un dixième de pourcent), notamment par rapports aux énergies fossiles et nucléaires. Mais « elle connaît un essor fulgurant », insiste Dick Heslinga, qui dirige le laboratoire des composants solaires à l'Institut national de l'énergie solaire. *Tous les acteurs du domaine s'attendaient à ce que le boom du photovoltaïque se produise un jour ou l'autre. En effet, les résultats de recherche et le savoir-faire dans la fabrication des panneaux s'étaient accumulés depuis des décennies.* Cette dynamique se libère enfin. Mais pourquoi aujourd'hui et à un tel point ?

Rayonnement électromagnétique. Aux sources du solaire, un phénomène identifié en 1839 par Antoine Becquerel, un demi-siècle avant que son petit-fils, Henri, ne découvre la radioactivité. Expérimentant de nouvelles piles électrochimiques, Antoine Becquerel remarqua que la quantité d'électricité libérée variait en fonction de la luminosité ambiante. Baptisé « effet photovoltaïque » ou encore « effet photoélectrique », ce phénomène correspond à l'émission d'électrons dans des matériaux exposés à un rayonnement électromagnétique tel que la lumière. Ces matériaux sont généralement des métaux ou des semi-conducteurs. L'effet photovoltaïque a été expliqué par l'Allemand Heinrich Rudolf Hertz, et surtout par Albert Einstein, ce qui valut à ce dernier le prix Nobel de physique en 1921.

Einstein démontra que l'émission d'électrons dépendait du caractère ondulatoire, mais aussi corpusculaire de la lumière : autrement dit des « grains » de lumière, appelés photons, dont l'énergie est proportionnelle à leur fréquence d'oscillation. Plus cette fréquence est élevée, plus grande

*LE WATT-CRÊTE est une unité de mesure représentant la puissance électrique maximale délivrée par une installation photovoltaïque, pour un ensoleillement standard de 1 000 watts par mètre carré à une température de 25°C.

L'essentiel

> L'UTILISATION DE CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES en silicium connaît un essor fulgurant, en raison de progrès technologiques mais aussi de la hausse des prix du pétrole et des inquiétudes autour du climat.

> LES TRAVAUX DE RECHERCHE menés actuellement dans les laboratoires devraient encore améliorer les performances du photovoltaïque. Aux côtés des cellules en silicium monocristallin et polycristallin, la technologie des « couches minces » progresse.



Le parc photovoltaïque d'Olmedilla, en Espagne, est le plus important au monde : 162 000 panneaux solaires couvrent une surface de 130 hectares. La construction de ce parc a coûté 530 millions de dollars.

est l'énergie des photons. Pour que des électrons soient libérés *via* l'effet photovoltaïque, l'énergie des photons doit être égale ou légèrement supérieure à une valeur seuil, variable selon la composition chimique du métal ou des semi-conducteurs. Sans quoi, les photons ne feront que les traverser ou être réfléchis. Seule une partie des photons constituant la lumière solaire conduit ainsi à l'émission d'électrons.

Cette émission entraîne la formation de lacunes électroniques – des « trous », dans le langage des physiciens. Les électrons et les trous possèdent la même énergie, mais une charge de signe opposé : négative pour les électrons, positive pour les trous. Ces paires d'électrons et de trous ont une existence généralement éphémère : elles reviennent à leur état fondamental en libérant de l'énergie sous forme de chaleur.

Mais cette même énergie peut aussi être récupérée sous forme d'électricité. Tel est le principe sur lequel reposent les cellules photovoltaïques en silicium, dont les premières réalisations datent de 1954. Elles ont été fabriquées par des chercheurs des Bell Labs, dans le New Jersey. De façon accidentelle, ces physiciens avaient remarqué qu'un échantillon de silicium contenant un

certain type d'impuretés chimiques était particulièrement sensible à l'effet photovoltaïque.

Le silicium ? C'est l'un des éléments chimiques les plus répandus sur terre. Il fait partie de la famille des semi-conducteurs. Cela signifie qu'on peut moduler sa conductivité entre un état isolant et un état conducteur. Le passage d'un état à un autre est caractérisé par un seuil d'énergie, appelé « gap ». Il se produit, notamment, lorsque des photons possédant une énergie égale ou supérieure au gap irradient le semi-conducteur. Des électrons sont alors excités par effet photovoltaïque.

Or, le gap du silicium est inférieur à l'énergie d'une grande part des photons du spectre solaire. Cela en fait un candidat parfait pour fabriquer des cellules photovoltaïques, d'autant qu'il est abondant.

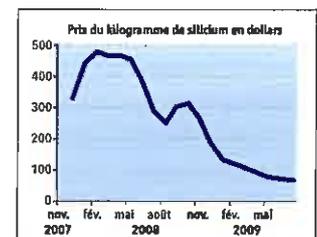
Dopage chimique. Mieux encore, l'effet photovoltaïque peut être amplifié en ajoutant au silicium des impuretés chimiques. En l'espèce, les chercheurs des Bell Labs avaient utilisé des atomes de phosphore et de bore. Le phosphore augmente le nombre d'électrons libérés dans le silicium. Quant à la présence de bore, elle a pour conséquence d'augmenter le nombre de >>>

Chute du prix du silicium

En deux ans, le prix du silicium utilisé pour la fabrication des cellules photovoltaïques a considérablement diminué. Il est passé de près de 500 dollars le kilogramme, en février 2008, à moins de 70 dollars au printemps 2009. Cette baisse devrait

profiter au marché du photovoltaïque, en faisant baisser les coûts de production des cellules. En 2000, le cours du silicium était encore beaucoup plus bas ; autour de 10 dollars. Mais il avait grimpé à 30 dollars en 2004, avant d'atteindre la valeur record

d'il y a deux ans. La raison ? L'essor fulgurant, depuis 2000 et surtout 2004, de l'industrie photovoltaïque. La demande, sans cesse croissante, avait alors largement dépassé les capacités de production, faisant ainsi flamber les prix. Mais l'écart s'est



réduit, au point que c'est l'offre qui dépasse actuellement la demande.

Photovoltaïque : le silicium s'impose

>>> trous. Les cellules des Bell Labs étaient ainsi composées de deux couches de silicium ; la première contenait du bore, et la seconde du phosphore. Lorsqu'elles étaient exposées à la lumière, des électrons et des trous étaient libérés en nombre égal : les trous migraient vers la seconde couche, tandis que les électrons se déplaçaient en sens inverse. Un courant électrique était ainsi généré et collecté au moyen d'une grille conductrice [fig. 1].

Polycristaux. Un résultat fondateur pour le photovoltaïque, mais à quel coût ! Les cellules des Bells Labs présentaient un rendement de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique d'environ 6 %. Le prix du wattheure* qu'elles produisaient était excessivement cher, supérieur à 1700 dollars de l'époque. Mais « ce prix n'a jamais cessé de diminuer, rappelle Jean-François Guillemoles, de l'Institut de recherche et développement de l'énergie photovoltaïque, en raison, notamment, d'une hausse graduelle des rendements. En théorie, le rendement maximal d'une cellule en silicium s'élève à 30%. Pour s'en approcher, les chercheurs ont joué sur de nombreux paramètres : la pureté cristalline, les impuretés chimiques,

* LE WATTHEURE correspond à l'énergie fournie par une installation électrique pendant une heure.

les contacts électriques, la résistivité, ou encore la quantité de photons absorbés via des revêtements antireflets. »

Ainsi, en 1958, le rendement des cellules passait à 9 %. Cette même année, aux États-Unis, était lancé le premier satellite (Vanguard I) équipé de cellules photovoltaïques, qui servaient à alimenter des émetteurs radioélectriques. Deux ans plus tard, le rendement des cellules atteignait 14 %. Les premières applications terrestres ont ainsi pu voir le jour à partir des années 1970 : pour des balises marines, tout d'abord, puis pour des montres, des calculatrices de poche, des voitures et même des avions, avant d'être utilisé pour fabriquer des centrales photovoltaïques et de couvrir les toits des particuliers.

Dans les années 1980, nouvelle avancée. Un nouveau type de cellules est commercialisé : elles sont composées non plus de monocristaux de silicium, mais de silicium polycristallin. Celui-ci est formé par la juxtaposition de plusieurs cristaux. Son rendement de conversion est intrinsèquement moins élevé que celui du silicium polycristallin. Mais son coût de fabrication est moindre. Or « le prix du wattheure photovoltaïque est lié à la fois au rendement et au coût de fabrication des cellules », précise Jean-François Guillemoles. L'utilisation du silicium monocristallin ou polycristallin

Les promesses des couches minces

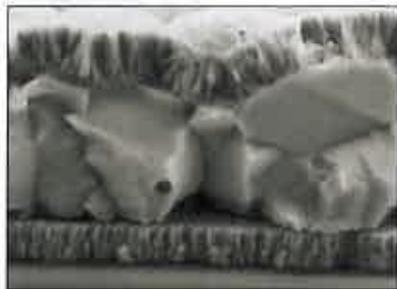
Les cellules photovoltaïques en couches minces convertissent l'énergie solaire en électricité selon le même principe que les cellules en silicium : le déplacement des électrons et des trous libérés après absorption de la lumière, mais avec des matériaux différents, utilisés dans des quantités beaucoup moins importantes. Les propriétés optiques du silicium sont, en effet, relativement mauvaises : ce matériau absorbe peu de lumière. Dans les cellules en silicium, une

importante quantité de matériau et une épaisseur de quelques dixièmes de millimètre sont ainsi nécessaires pour que l'effet photovoltaïque soit significatif. Or le silicium qui est utilisé par l'industrie photovoltaïque coûte cher. Résultat, le wattheure produit par les cellules en couches minces coûte aujourd'hui, en moyenne, deux fois moins cher que celui qui est produit par les cellules en silicium.

Deux technologies dominent le marché des couches minces. Les cellules « CdTe », tout d'abord, qui arrivent en tête. Elles sont composées d'une couche de cadmium et de soufre, riche en électrons. Une couche de tellure de cadmium comportant un grand nombre de lacunes électroniques lui est superposée, sur une épaisseur de deux micromètres. Le rendement de conversion des cellules CdTe est relativement faible :

entre 9 % et 10 %. Mais l'électricité qu'elles produisent est la plus compétitive de tout le marché (0,8 dollar le wattheure).

La deuxième technologie, plus récente et moins mature, est désignée par le sigle « CIS ». Le rendement des cellules CIS atteint 14 %. En raison de cette caractéristique et de ses faibles coûts de fabrication, ses ventes connaissent une plus forte croissance que celles des cellules CdTe. Elles sont constituées d'une couche de molybdène (photo ci-contre) de 0,5 micromètre d'épaisseur placée sur du verre. On y dépose un alliage de cuivre, d'indium, de gallium et de sélénium, enrichi en trous, sur une épaisseur de 1,5 micromètre. Puis une couche de cadmium et de soufre, et enfin une couche de 1 micromètre d'épaisseur, composée d'oxygène et de zinc, enrichi en électrons.



© IROXIP

dépendra ainsi du type d'applications : lorsque celui-ci limite la surface disponible, on utilisera plus volontiers du silicium monocristallin ; et la forme polycristalline si l'on dispose de plus larges étendues.

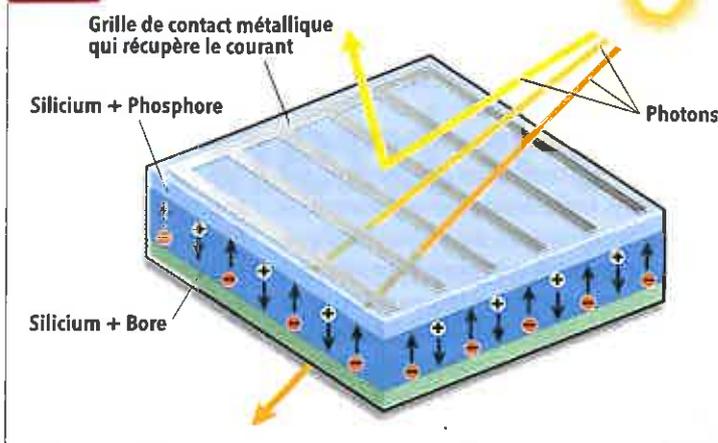
L'industrialisation plus poussée a fait encore baisser le coût de fabrication des cellules au cours des années 1990. D'importantes structures de production

ont remplacé les anciennes, historiques, plus petites. La fabrication en masse entraîne toujours des effets d'échelle : au niveau économique, comme sur le plan du savoir-faire technologique. En 2000, le prix moyen du watt-crête produit par des cellules en silicium était ainsi de 3 dollars. Et le rendement des cellules en silicium monocristallin atteignait alors 16 % en production industrielle.

Préoccupations climatiques. Mais, en dépit de ces baisses significatives, le coût de l'électricité photovoltaïque demeurerait toujours trop élevé pour rivaliser avec les autres sources d'énergie au début des années 2000. Ce n'est pas la technologie, mais bien l'économie et la politique qui ont fait, à ce moment-là, décoller le photovoltaïque. Tout d'abord, la montée en puissance du prix du pétrole. Flambées de prix conjoncturelles et tendance haussière à long terme, puisque cette énergie fossile est une ressource finie. Les préoccupations climatiques, ensuite, qui se sont intensifiées depuis la fin des années 1990. Elles ont rendu problématique la consommation des énergies fossiles productrices de gaz à effet de serre. Elles ont surtout conduit à un intérêt accru pour les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire.

« Résultat : ces dernières années, dans nombre de pays industrialisés, d'importants programmes d'aide publique à l'industrie photovoltaïque ont vu le jour. L'Allemagne a été un précurseur. Le Japon, les États-Unis, le Portugal ou l'Espagne ont suivi. La France également, un peu plus tardivement, en raison de l'importance historique de l'énergie nucléaire. L'élément déclencheur a été l'instauration, en juillet 2006, d'un nouveau tarif de rachat du kilowattheure par EDF à ceux qui produisent du photovoltaïque. Il est passé de 30 centimes à 61 centimes d'euro ; alors que le consommateur achète son électricité au prix de 15 centimes. Des

Fig.1 La cellule photovoltaïque



UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE est généralement constituée de deux couches de silicium : l'une (en bleu clair), contenant du phosphore, est riche en électrons (en rouge) ; et l'autre (en vert), contenant du bore, présente des « trous d'électrons » (en jaune). Lorsque la cellule absorbe une partie des photons solaires, les électrons migrent vers la couche du haut ; et les trous, en sens inverse. Un courant électrique est ainsi généré.

© INFOGRAPHIE BRUNO BOURGEOIS

avantages fiscaux et des crédits d'impôts ont également été accordés à tous ceux qui ont décidé d'installer des panneaux solaires.

Du coup, le marché du solaire a explosé en France comme dans d'autres pays. À l'été 2009, 24 000 installations en France étaient ainsi raccordées au réseau de distribution d'EDF, selon un rythme >>>

Les Editions Amalthée

Vous écrivez ?

Les Editions Amalthée
recherchent
de nouveaux auteurs



Pour vos envois
de manuscrits :

Editions Amalthée
2 rue Crucy
44005 Nantes cedex 1
Tél. 02 40 75 60 78
www.editions-amalthee.com

Photovoltaïque : le silicium s'impose



© MARTIN BONDY/SPU COSMOS

Dans la commune de Nieuwland, aux Pays-Bas, un projet pilote développe la construction de maisons où des panneaux solaires sont directement intégrés à la toiture.

» de 800 nouveaux raccords chaque mois ! Le parc photovoltaïque français atteignait alors 135 millions de watts-crête, contre seulement 7 millions en 2005.

Pour autant les aides publiques ne font pas tout. Et de récentes innovations technologiques ont contribué à la prospérité du photovoltaïque. Où en est, à cet égard, la production mondiale ? Elle est toujours dominée, à environ 85 %, par les cellules en silicium. Moitié pour les cellules en silicium monocristallin, dont les rendements atteignent aujourd'hui 20 % ; moitié pour les cellules en silicium polycristallin, qui affichent un rendement de 16 % en production industrielle. Le prix du watt-crête produit via ces deux filières est globalement équivalent, autour de trois dollars.

La quinzaine de pourcents restants est occupée par une technologie développée à partir des années 1980 : les cellules en « couches minces » (lire « Les promesses des couches minces », p. 42). Elles utilisent des alliages de semi-conducteurs différents du silicium. Leurs rendements sont plus faibles (entre 9 % et 14 %). Mais elles nécessitent des quantités de matériaux beaucoup moins importantes. Au final, le prix de l'électricité est moins élevé que pour les cellules en silicium (entre 0,8 et 1,2 dollar le watt-crête).

Segmentation du marché. Pour autant, estime Dick Heslinga, et « contrairement à ce que certains avaient prédit, les couches minces ne supplanteront pas le silicium. Elles gagneront des parts de marché, c'est certain. Mais le silicium conservera toujours une longueur d'avance sur le plan des rendements. Il continuera à dominer le marché et à progresser en termes de volume absolu des ventes ». On peut ainsi parier sur une segmentation du marché dans les années à venir, comme cela a été le cas lors de l'apparition du silicium polycristallin. Les cellules en silicium seront utilisées pour des espaces restreints, comme les toits des particuliers ; tandis que les couches minces couvriront de grandes surfaces, pour les centrales photovoltaïques, principalement.

Les recherches visant à améliorer les performances des cellules en silicium restent, par ailleurs, extrêmement actives. Avec toujours les deux mêmes objectifs : diminuer les coûts de production et augmenter les rendements. Pour diminuer ces

coûts, une nouvelle filière de production de silicium se développe en France grâce à PV Alliance – un consortium créé en 2007, qui regroupe Photowatt (l'unique fabricant français de cellules photovoltaïques), le CEA et EDF Énergies nouvelles.

Il s'intéresse à la façon dont le silicium est produit. La majeure partie est issue de procédés conçus spécifiquement pour l'industrie électronique. Ils fournissent du silicium ultrapur et de très bons rendements de conversion. Mais ces procédés sont lourds, longs et onéreux. Et ils conduisent à un niveau de pureté qui n'est pas nécessaire dans le cadre des applications photovoltaïques.

Silicium métallurgique. Le procédé de purification développé par PV Alliance et le CEA conviendrait très bien à ces applications. Il consiste notamment à éliminer les impuretés chimiques présentes dans le minerai de silicium à l'aide d'une torche à plasma*. Qualifié de « métallurgique », le silicium ainsi obtenu devrait être commercialisé dans quelques années, à un coût trois fois moins important (35 dollars le kilogramme) que celui du marché actuel (lire « Chute du prix du silicium », p. 41).

En parallèle, plusieurs voies sont explorées pour atteindre de très hauts rendements. L'une d'elles consiste à jouer sur l'architecture et la taille des cellules. Par nanolithographie, certaines parties peuvent être réduites à des tailles infinitésimales. La surface susceptible de convertir l'énergie solaire se trouve ainsi démultipliée. Mais ce changement d'échelle conduit aussi à une modification des propriétés optiques et électroniques du silicium. En raison de phénomènes quantiques, l'énergie du gap varie alors en fonction du diamètre des objets. En accolant plusieurs de ces objets possédant chacun un diamètre différent, il devient possible d'absorber la quasi-totalité du spectre solaire. Des cellules en silicium nanostructurées devraient ainsi présenter des rendements de 22 %, voire de 25 %.

« Ces technologies, et d'autres, seront commercialisables dans six ou sept ans, annonce Éric Laborde, le directeur de PV Alliance. Elles contribueront à faire encore baisser le coût de l'électricité photovoltaïque. Vers 2015, il devrait être inférieur à un demi-dollar le watt-heure. » Ce coût serait équivalent à celui de l'électricité produite par les sources d'énergie fossile et nucléaire. Alors, le développement de l'industrie photovoltaïque serait beaucoup moins tributaire de la conjoncture économique et de l'aide des États. Selon les prévisions de l'Association européenne des industriels du photovoltaïque, la part de cette énergie dans la production électrique européenne pourrait ainsi atteindre 12 % en 2020. ■

* **LE PLASMA** est un état de la matière où les électrons sont totalement dissociés des noyaux atomiques.