

# L'énergie solaire

FRANCISCO CAMACHO [1]

*Il existe deux grandes techniques pour transformer l'énergie solaire : le solaire photovoltaïque, qui utilise des cellules transformant le rayonnement du soleil en électricité, et le solaire thermique, qui transforme le rayonnement en chaleur. Aujourd'hui, le photovoltaïque est en plein développement, et le thermique se lance dans des projets industriels dignes de la science-fiction.*

**mots-clés**  
énergie,  
puissance

## Le solaire photovoltaïque

### Le principe et la technologie

En panneaux sur les toits, parkings, bateaux, horodateurs, stations météo, bornes téléphoniques d'autoroute, ou seules dans les téléphones portables ou même certains vêtements féminins, les cellules photovoltaïques **1** font maintenant partie du paysage.

Elles sont constituées d'un semi-conducteur, le plus souvent à base de silicium, que l'on modifie par l'apport d'éléments extérieurs (en général des atomes de phosphore et

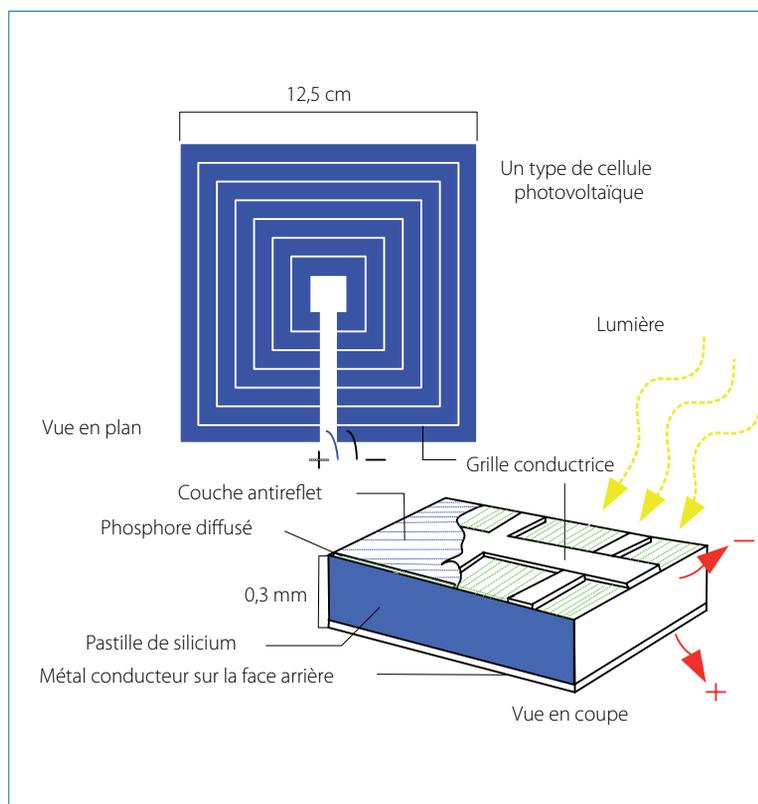
de bore) qui le polarisent. Un courant électrique est créé, lui-même recueilli par des fils métalliques très fins (voir en encadré).

L'assemblage en série de cellules (voir « La fabrication de panneaux solaires chez Teneosol » en encadré) permet de constituer un module (ou panneau) photovoltaïque **2** produisant un courant continu, en général d'une tension aux bornes de 12 V (les installations les plus courantes font 12 V, 24 V ou 48 V). La puissance produite par un module de 0,5 m<sup>2</sup> est, en général, de 50 watts-crête (Wc ; les watts-crête mesurent la

puissance théorique maximale qu'un module ou une installation peuvent produire dans des conditions idéales d'ensoleillement). Les puissances des modules vont de moins de 2 Wc à 150, voire 300 Wc.

Un module photovoltaïque coûte actuellement 2 euros par watt-crête à fabriquer. La recherche explore de nouvelles pistes pour tenter de réduire ce coût, dû à la cherté du silicium. En effet, s'il est l'élément le plus abondant de la croûte terrestre, le silicium n'existe pas à l'état libre, et ses procédés de purification sont relativement coûteux (et polluants). Les équipes de l'Institut national de l'énergie solaire (Ines, plus important centre de recherche sur l'énergie solaire, regroupe 150 chercheurs ou ingénieurs, qu'une centaine d'autres devraient rejoindre d'ici à 2011) ont mis au point, avec des industriels, un procédé de

[1] Professeur agrégé d'électronique au lycée Jacquard de Paris (75).



**1** Une cellule photovoltaïque



**2** Des modules de cellules photovoltaïques

fabrication de silicium de qualité légèrement inférieure mais deux fois moins onéreux. Bientôt industrialisé, il devrait faire baisser les coûts des systèmes photovoltaïques d'environ 25 % d'après le Commissariat à l'énergie atomique (CEA). D'autres solutions sont à l'étude, visant à réduire la quantité de silicium mis en œuvre (couches minces, nanofilms, alliages), voire à le remplacer complètement (cellules organiques à base de plastique).

Les modules photovoltaïques ont une durée de vie de vingt à trente ans. Ils sont insérés dans un cadre étanche résistant aux intempéries, intégrable à la plupart des architectures. Ils sont généralement mis en toiture pour des questions de place, de sécurité, d'inclinaison, mais on les trouve de plus en plus souvent en façade, en protection solaire, en verrière...



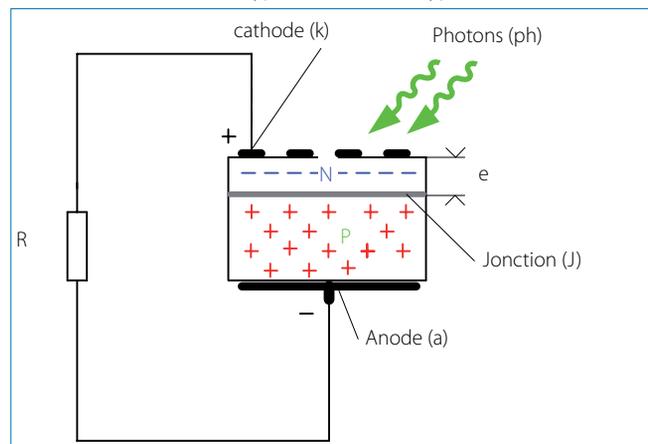
### Les cellules photovoltaïques

Une cellule photovoltaïque est un composant qui, exposé à la lumière (photons) ou au rayonnement solaire, génère une tension électrique. L'effet produit est appelé l'effet photovoltaïque : une force électromotrice d'environ 0,5 à 0,6 V apparaît entre des électrodes. Le dispositif est un générateur électrique. L'intensité maximale du courant produit dépend de la surface de la cellule et de la valeur de l'éclairement.

Une cellule photovoltaïque est constituée d'un semi-conducteur pris en sandwich entre deux électrodes métalliques, le tout étant protégé par une vitre en face avant.

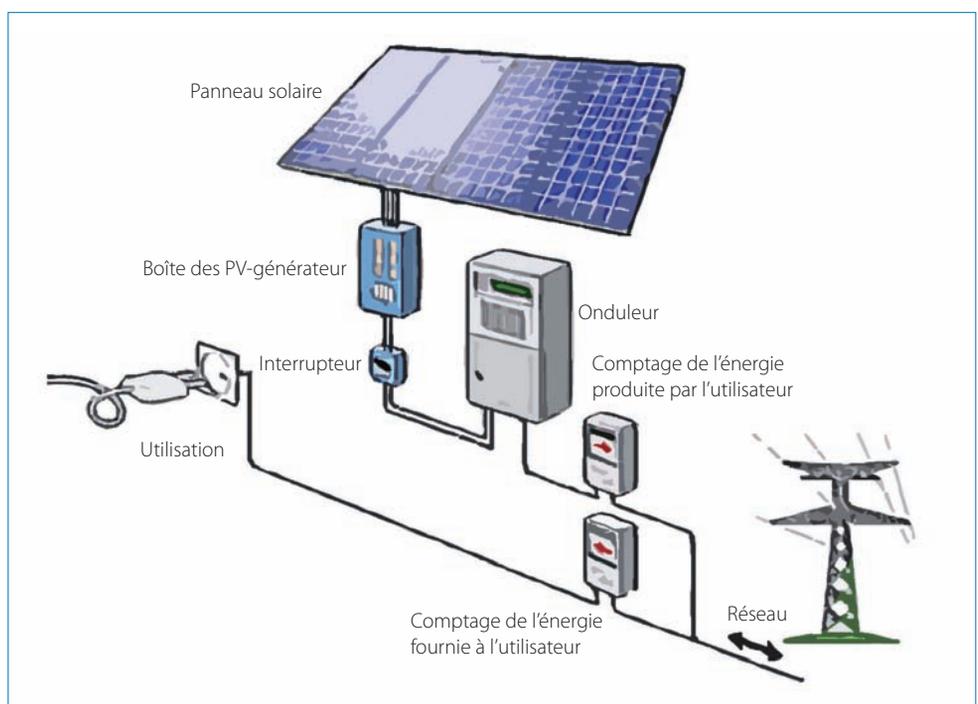
En général le semi-conducteur de base est du silicium, parfois amorphe (pour les petites applications de type calculatrices ou montres « solaires »), le plus souvent monocristallin comme celui utilisé pour la fabrication des transistors, ou, de plus en plus fréquemment, polycristallin, moins coûteux à produire.

Divers traitements permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98 %. Il est ensuite enrichi en éléments dopants (plomb, arsenic, antimoine ou bore), qui le transforment en semi-conducteur donneur (type P) ou receveur (type N) d'électrons.

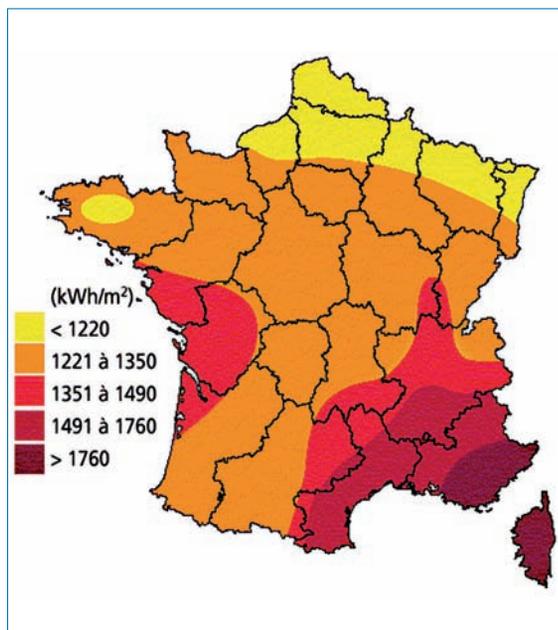


■ Schéma d'une cellule photovoltaïque

Un cristal semi-conducteur P est recouvert d'une couche de silicium N d'une épaisseur de quelques millièmes de millimètres. Entre les deux zones se trouve une jonction J. La zone N est couverte par une grille métallique qui sert de cathode (k), tandis qu'une plaque métallique a recouvre l'autre face du cristal et joue le rôle d'anode. L'épaisseur totale de la cellule est de l'ordre du millimètre. Un rayon lumineux qui frappe le dispositif pénètre le cristal à travers la grille et provoque l'apparition d'une tension entre la cathode et l'anode.



3 L'installation d'un particulier



4 Le gisement solaire en kWh/m<sup>2</sup>/an

### Le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque par EDF

Le gouvernement a publié à la mi-janvier 2010 l'arrêté fixant les tarifs de rachat par EDF de l'électricité produite par les installations photovoltaïques privées (panneaux sur les toits, centrales au sol).

Le kilowattheure (kWh) passe de 60 centimes d'euro à 58 centimes. Ce prix est un des plus élevés d'Europe, et sera réservé à un nombre restreint d'installations. Cette électricité achetée au prix fort par EDF est revendue 10 centimes d'euro aux abonnés, la différence étant facturée à tous les usagers à travers la « contribution au service public de l'électricité. »



5 Une installation autonome

### La production

Malgré sa croissance soutenue, de l'ordre de 30 % depuis quelques années, cette filière assure aujourd'hui moins de 1 % de la production d'électricité mondiale. Les projections les plus optimistes (Epia, Greenpeace) estiment que le photovoltaïque sera en mesure de fournir 16 % de la demande d'électricité mondiale en 2025, et 24 % d'ici à 2040.

Le chiffre d'affaires du marché mondial, dominé par l'Allemagne, les États-Unis, l'Espagne, le Japon et l'Italie, est estimé à 24 milliards d'euros.

En France métropolitaine, la croissance du marché a été de plus de 200 % en 2007 et en 2008, et la production d'électricité issue de panneaux photovoltaïques aurait même plus que triplée en 2009 ; 43 700 installations photovoltaïques étaient raccordées au réseau, pour une puissance totale de 268 MW, produite pour près de la moitié dans trois régions : Provence-Alpes-Côte d'Azur, Languedoc-Roussillon et Pays de la Loire.

### L'installation en résidence individuelle ou collective

Les panneaux, installés généralement sur le toit de l'habitation, fournissent un courant continu sous une tension comprise entre 125 V et 400 V qui dépend du rayonnement solaire.

Le courant continu est transformé par un onduleur en courant alternatif sous une tension sinusoïdale régulée à 230 V efficaces de fréquence 50 Hz. Le courant alternatif fourni par l'onduleur est renvoyé sur le réseau au travers d'un compteur qui compte l'énergie produite par le particulier (voir « Le tarif de rachat de l'électricité photovoltaïque par EDF » en encadré) 3.

Si le plein sud reste la meilleure des orientations, une exposition sud-est ou sud-ouest donnera des résultats satisfaisants, avec une inclinaison optimale comprise entre 30 et 45° – mais ce sont

souvent les dispositions constructives de l'habitation qui la déterminent.

Une maintenance régulière est recommandée, surtout en cas d'usage de batteries, pour contrôler l'état général de l'installation et nettoyer, si besoin, la surface des capteurs.

Le dimensionnement de l'installation se fait en général à partir des cartes indiquant l'énergie moyenne (en kWh/m<sup>2</sup>) à la latitude du lieu 4 et en fonction de la surface disponible. Il en découle une puissance en kilowatts-crête (kWc), la puissance fournie avec un ensoleillement « standard » de 1 000 W/m<sup>2</sup> à 25 °C. Il faut ensuite tenir compte de l'inclinaison des modules, de la présence éventuelle d'obstacles masquant le soleil et des performances techniques du matériel envisagé pour estimer la production annuelle de l'installation.

La pose de modules sur un bâtiment existant nécessite une déclaration de travaux, et, à proximité d'un monument historique ou dans un site protégé, le projet devra être soumis à l'avis de l'architecte des Bâtiments de France.

On optera pour une installation « sécurisée » si l'on souhaite une certaine autonomie en cas de défaillance du réseau. En effet, en cas de mise hors tension de celui-ci, l'onduleur s'arrêtera par sécurité pour le personnel intervenant. Un système sécurisé comporte en plus une batterie d'accumulateurs et un boîtier de sécurisation permettant d'alimenter dans ce cas certains appareils « prioritaires ».

En France, pour une installation autonome 5, le watt-crête coûte de 20 à 30 euros (prix des batteries inclus). En milieu rural, le FACE (Fonds d'Amortissement des Charges d'Électrification) finance en grande partie ces installations autonomes, tandis que L'Ademe et les conseils régionaux les subventionnent dans les zones urbanisées. Les aides financières apportées par l'Ademe s'élèvent à 4,60 euros par watt-crête installé, avec un plafond à 2,5 kWc.

### La fabrication de panneaux solaires chez Tenesol

Le fabricant de panneaux photovoltaïques Tenesol, en investissant 2 millions d'euros en 2008, a triplé ses lignes de production à Toulouse. Elles produisent 730 panneaux par jour, et leur capacité annuelle atteint désormais les 47 MW.

Les cellules, de type silicium polycristallin (épaisseur 180 microns) sont fournies par Q-Cells (premier producteur mondial).

La liaison électrique entre chaque cellule s'effectue par soudage par air chaud de fins rubans étain-plomb sur des ensembles de dix cellules reliées en série.

Les cellules sont « mises en sandwich » entre deux couches d'éthyle vinyle acétate (EVA), qui les isoleront des agressions extérieures comme l'humidité ou le sel. Une couche de verre est déposée, puis les séries de dix cellules sont jointes les unes aux autres, côte à côte, par le même type de rubans étain-plomb. Cette fois le soudage est manuel.

Après contrôle par l'opérateur, on soumet l'ensemble à l'étape de lamination : sous des contraintes de pression (mise sous vide) et de température (150 °C), l'EVA est fondu, devient transparent et encapsule les cellules. Après les 45 minutes du processus de fabrication et le contrôle final, reste à encadrer le panneau de barres d'aluminium et à poser un boîtier électronique pour sécuriser la connexion avec l'onduleur. Puis le panneau reposera pendant 12 heures pour séchage.



■ Les modules photovoltaïques

### Le solaire thermique

#### Le principe et la technologie

Les concentrateurs optiques superposent en un même point des rayons solaires collectés sur une surface de captage, le plus souvent formée de miroirs. Différentes géométries de concentrateurs ont été expérimentées. Ils sont dotés de dispositifs de suivi de la course du soleil, en hauteur et/ou en azimut.

La concentration optique des rayons du soleil permet d'obtenir de très hautes températures. Selon les différentes technologies de captage, la chaleur produite est généralement comprise entre 400 °C et 1000 °C. On distingue deux usages principaux : la production de chaleur (thermique) et la production d'électricité (thermodynamique).

Les systèmes solaires à concentration collectent uniquement le rayonnement solaire direct, alors que les capteurs solaires plans non concentrateurs et les modules photovoltaïques captent également le rayonnement diffus. L'exploitation de l'énergie solaire sous cette forme requiert donc de bonnes conditions d'ensoleillement, optimales dans la « ceinture solaire » (plus de 2000 kWh/m<sup>2</sup>/an) 6.

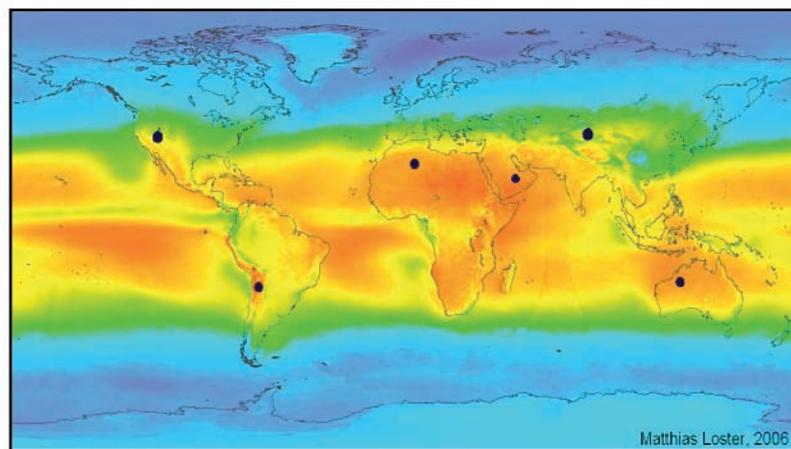
Par contre, avantage significatif par rapport au photovoltaïque ou à

l'éolien, il est possible de stocker la chaleur solaire, sous forme d'hydrogène, par exemple, pour une utilisation différée ou éloignée du site.

Dans les centrales solaires à concentration 7, on peut produire de grandes quantités d'électricité. Cette filière, promue dans les années 1970, a été délaissée à la suite du contre-choc pétrolier de 1986. Aujourd'hui, elle intéresse à nouveau les industriels, les investisseurs et les compagnies électriques, car elle est source de kilowattheures propres et participe ainsi à la lutte contre l'effet de serre. En concentrant l'énergie solaire, on

obtient une température très élevée qui permet de produire de la vapeur. En faisant tourner une turbine, la vapeur génère de l'électricité destinée au réseau de distribution général. C'est l'héliothermodynamique, soit l'art de produire de l'électricité avec la chaleur du soleil.

Il est possible d'hybrider les centrales avec une source de chaleur fossile (gaz par exemple) ou d'origine renouvelable (biomasse). Ce système permet de fournir l'énergie thermique nécessaire au fonctionnement du cycle lors des périodes de faible ensoleillement.



0 50 100 150 200 250 300 350 W/m<sup>2</sup>

Σ = 18 TWe

6 La ceinture solaire



7 Les héliostats d'une centrale solaire à concentration



8 Un concentrateur parabolique



9 La centrale solaire de Thémis

Il existe trois technologies de centrales :

● Les centrales à capteurs paraboliques 8

Dans un concentrateur parabolique, aussi appelé assiette, les rayonnements solaires réfléchis par le miroir parabolique convergent vers un seul point, le foyer de la parabole. Le système doit être orienté à tout instant vers le soleil, ce qui implique une motorisation précise selon deux axes. Le facteur de concentration moyen dépasse le millier, ce qui permet de porter le fluide à très haute température, au-delà de 700 °C. La technologie généralement utilisée est celle du générateur Stirling, fondé sur un cycle thermodynamique à compression/détente alimenté par une source chaude.

Il existe plusieurs modèles de ces assiettes, de 50 à 100 m<sup>2</sup>, bien adaptés à des puissances modestes (de 5 à 25 kW électriques).

● Les centrales à tour 9

Aussi appelée système à récepteur central, cette technologie permet de déployer des surfaces de miroirs très importantes. Des centaines, voire des milliers d'héliostats 10 (miroirs plans de plusieurs dizaines de mètres carrés chacun) sur pied suivent le soleil et concentrent le rayonnement sur un récepteur central placé en haut d'une tour. Le soleil est concentré plus de 500 fois, et la température obtenue dépasse 600 °C. La chaleur captée est transmise au point focal, source chaude d'une réaction thermodynamique. Différents fluides caloporteurs peuvent être utilisés : vapeur, sels fondus, air... Ils transportent cette chaleur vers le cycle aval (à vapeur, gaz ou cycle combiné).

● Les centrales à capteurs cylindro-paraboliques 11

Aussi appelé concentrateurs linéaires à auge, ces miroirs de section parabolique concentrent les rayons du soleil vers une ligne focale. Le récepteur est un tube placé sur ce foyer linéaire, au-dessus de l'auge, et dans lequel circule un fluide caloporteur. Avantage de ces miroirs paraboliques, le suivi

du soleil est simplifié : il s'effectue sur un seul axe au lieu de deux pour les héliostats. Les concentrateurs sont généralement orientés nord-sud et pivotent d'est en ouest pour suivre la course du soleil. La concentration est modeste, de 20 à 80 fois le rayonnement. Le fluide (huile ou vapeur, température entre 270 et 550 °C, pression entre 25 et 120 bars) circule sur des centaines de mètres dans le récepteur des miroirs. La chaleur est ensuite utilisée dans une boucle secondaire à vapeur qui entraîne une turbine. Des systèmes à génération directe de vapeur sont aussi développés. Depuis vingt ans, ce système fiable, efficace et en constante amélioration fait ses preuves dans le désert californien avec neuf centrales d'une puissance totale de 354 MW.

Les fours solaires à concentration sont quant à eux destinés à la recherche (chimie des matériaux, reconstitution de l'entrée d'objets dans l'atmosphère, etc.). Ils produisent uniquement de la chaleur haute température. Cette technique utilise un champ d'héliostats orientables et un grand miroir parabolique fixe, qui renvoie les rayons sur un récepteur. Le four solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales **12**, concentre le soleil 10 000 fois. À Mont-Louis, non loin de là, un ancien four expérimental sert aujourd'hui à des démonstrations pédagogiques et à la cuisson de céramiques.

### Le développement de la filière

Aux États-Unis, berceau de la filière, quatre États sont particulièrement engagés dans le développement de nouveaux projets : le Nevada où 64 MWe ont récemment été mis en service (sociétés Acciona et Solargenix), la Californie où deux contrats ont été signés pour développer 800 MWe entre 2008 et 2011, l'Arizona et le Nouveau-Mexique.

La renaissance de la filière est aussi désormais portée par l'Espagne. Forte de l'expérience issue de ses premiers sites héliothermodynamiques d'Almería, le pays a inauguré la première centrale commerciale à Séville



**10** Les héliostats de la centrale solaire de Thémis



**11** Le capteur parabolique de Kramer Junction en Californie



**12** Le four solaire d'Odeillo, dans les Pyrénées-Orientales



en 2006 (PS10 avec 11 MWe). La centrale Andasol 1 à concentrateur cylindro-parabolique avec 50 MWe a été inaugurée en juin 2009 à Grenade **13**. Au total, plus de 1 500 MWe sont en projet.

Du côté de l'Allemagne, plusieurs industriels et bureaux d'études travaillent sur des techniques destinées à être développées dans des pays du Sud: Schott a ouvert une usine de production pour équiper des centrales solaires en construction, Schlaich Bergermann und Partner (SBP) participe au développement du collecteur parabolique Eurodish, dont sept exemplaires de 10 kW fonctionnent en Europe et en Inde.

Une dizaine de projets de centrales héliothermodynamiques sont à l'étude ailleurs dans le monde: Mexique, Algérie, Iran, Afrique du Sud, Australie, Égypte, Israël, Maroc...

En Suisse, des chercheurs travaillent depuis plusieurs années sur un projet d'îles solaires qui vise à produire de l'énergie à très faible coût (voir l'encadré « Demain des îles solaires? »).

### En France

À Font-Romeu, dans les Pyrénées-Orientales, le laboratoire Promes du CNRS mène depuis 2006 le projet de recherche Pégase dont l'objectif est de concevoir une technologie de centrale solaire à tour.

L'ensoleillement annuel à Font-Romeu varie de 1800 kWh/m<sup>2</sup> à 2000 kWh/m<sup>2</sup>. À terme, la tour est destinée à des lieux dont les ressources solaires atteignent 2500 kWh/m<sup>2</sup>: l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient, la cordillère des Andes, le Nordeste au Brésil, l'Australie...

Les miroirs ou héliostats en verre argenté sont orientables autour d'un axe vertical et d'un axe horizontal. Légèrement incurvés, ils réfléchissent les rayons du soleil et touchent leur cible au sommet de la tour avec une précision de 10 cm. Ils sont commandés individuellement et à distance par transmission radio. Le logiciel de pilotage est l'œuvre du laboratoire APC (AstroParticule et Cosmologie) de l'université Paris-VII. La tour reçoit



**13** La centrale Andasol 1 à Grenade

### Demain des îles solaires

Le premier prototype d'île solaire du Centre suisse d'électronique et de microtechnique (CSEM) de Neuchâtel est en cours de réalisation dans le désert des Émirats arabes unis (émirat de Ras al-Khaimah). Il s'agit d'une centrale énergétique circulaire de 80 m de diamètre qui flotte sur un canal. Elle sera recouverte d'une enveloppe plastique sous laquelle on injectera de l'air en surpression pour assurer la flottaison de l'ensemble. L'énergie du soleil sera renvoyée par des miroirs vers des tubes contenant de l'eau qui sera transformée par la chaleur en vapeur.

Une île solaire offre un rendement supérieur aux centrales fixes: on peut mettre deux fois plus de capteurs au mètre carré, car ce ne sont pas eux qui suivent le mouvement du soleil, mais l'île entière.

Les concepteurs promettent une énergie cinq fois moins chère que celle produite avec les installations terrestres classiques. À terme, il s'agit de construire des îles flottantes de 5 kilomètres de diamètre susceptibles d'être déplacées en fonction de la demande en énergie. Le CSEM espère commercialiser ses premières « îles solaires » dès la fin 2011, et vise particulièrement les pays du Golfe.



Le premier prototype en cours de réalisation dans l'émirat de Ras al-Khaimah

les photons sur un récepteur (3 m de diamètre en entrée et 2,5 m de profondeur) pour convertir leur énergie en électricité grâce à une turbine à gaz. Le rendement attendu à terme est de 35 %.

C'est en 2013 que le projet doit déboucher sur un pilote industriel, pour une commercialisation avant

2020. Le budget investi est de 1,5 million d'euros en trois ans. Il provient à 60 % de ressources publiques (CNRS, ANR, Ademe, Languedoc-Roussillon) et à 40 % de ressources privées (Total, EDF). Il sera encore nécessaire d'investir au minimum 8 millions d'euros pour voir le projet aboutir. ■