

## Énergie solaire et électricité : une introduction

Michel Rabinovitch<sup>1</sup>

Depuis plus d'un siècle on caresse l'ambition de produire de l'électricité à partir de l'énergie solaire. Les deux méthodes actuellement utilisées sont la *thermo-électricité solaire*, où la chaleur engendrée par la concentration des rayons solaires à l'aide de miroirs va produire de la vapeur et animer des turbines, et le *solaire photovoltaïque*, où l'énergie électrique est produite directement à partir de cellules de différents types.

Les deux procédés sont d'origine très ancienne. La concentration de l'énergie solaire par des miroirs remonte à l'Antiquité ; la conversion de lumière en électricité (effet photovoltaïque) a été découverte par E. Becquerel en 1839. Mais il faudra attendre le XX<sup>e</sup> siècle pour que l'on envisage sérieusement une utilisation pratique de ces deux systèmes.

### L'énergie solaire thermoélectrique

Plusieurs systèmes ont été mis à l'essai, le principe commun étant la concentration de rayons lumineux de manière à ce que les températures obtenues atteignent plusieurs centaines de degrés. La chaleur sert alors à produire de la vapeur qui, très classiquement, met en mouvement une turbine génératrice d'électricité.

Les procédés varient donc uniquement sur la manière de focaliser le rayonnement. Quel qu'il soit, le rendement est faible : 10 à 15%. Les trois qui soient capables de produire de l'énergie électrique à relativement grande échelle sont les *collecteurs cylindro-paraboliques* (ou *canaux paraboliques*), les *centrales à tour*, et les *centrales à capteurs paraboliques*.

### Les collecteurs cylindro-paraboliques

Ces collecteurs sont des miroirs en forme de gouttière disposés en rangées parallèles, d'une longueur de plusieurs dizaines de mètres au moins, fixés sur un axe horizontal pouvant pivoter de manière à suivre la trajectoire du soleil. Un tube généralement rempli d'huile, destiné à collecter la chaleur et à la transférer, se trouve dans l'axe de chaque gouttière. L'huile peut ainsi être portée à des températures de 4 à 500° et va convertir l'eau contenue dans une chaudière en vapeur, afin d'actionner une turbine génératrice d'électricité.

Ce modèle de centrale a été construit en particulier en Californie dans les années 80 et 90 où la puissance totale des centrales installées atteint 354 MW. Le système utilisé comporte, par unité, de nombreuses rangées de

capteurs cylindro-paraboliques orientés Est-Ouest, d'une centaine de mètres de long. Les puissances de chaque unité varient entre 14 et 80 MW ; la plupart font 30 MW.

En Israël, une centrale solaire établie par Solel sur les mêmes principes, en construction à 40 km au Sud de Beer-Sheva, doit atteindre une puissance de 500 MW. Les collecteurs occuperont une superficie d'environ 9 km<sup>2</sup> de désert.

### Les centrales à tour

Un champ de miroirs orientables situés au niveau du sol concentre les rayons solaires au sommet d'une tour où se trouve un réservoir collecteur de chaleur contenant un fluide (eau, huile, sel fondu, etc.). Le fluide chaud se dirige vers la chaudière et génère de la vapeur qui, là aussi, va actionner une turbine. Les températures atteignent 600°, avec des pertes d'énergie moins grandes que dans les installations à miroirs cylindro-paraboliques.

Les centrales à tour en sont encore au stade expérimental (Albuquerque, 1976 ; projet Thémis de 2,5 MW dans les Pyrénées Orientales en 1983 ; Solar 1 et 2 en Californie). Actuellement, Solar 3 (Solar Tres) est en cours de réalisation avec des partenaires américains et allemands à Almeria, en Espagne. Il utilisera, comme fluide, du sel fondu afin d'assurer 16 heures de stockage énergétique et permettra le fonctionnement d'une turbine de 15 MW 24 heures sur 24.

### Les centrales à capteurs paraboliques

Ce sont apparemment les capteurs les plus simples. Le capteur correspond à un vaste miroir parabolique, composite ou non, qui suit le soleil sur deux axes. Le rayonnement solaire est concentré au foyer de la parabole réfléchissante. La température obtenue peut atteindre 750°. Chaque capteur est une petite centrale pouvant produire de l'électricité par l'intermédiaire d'un moteur à fluide comprimé ; en additionnant ces capteurs, on peut augmenter la puissance fournie.

De nombreux essais sont en cours, le projet le plus avancé étant celui de Stirling Energy Systems (Phoenix, Arizona) avec des unités de 25 kW de puissance disponibles dans le commerce.

### Conclusions

L'énergie solaire thermoélectrique, malgré sa simplicité apparente de réalisation, en est encore largement au stade expérimental. Seule la méthode par collecteurs cylin-

1. Remerciements à Jean-Louis Bal, Directeur des énergies renouvelables à l'ADEME, pour l'actualisation du texte.

dro-paraboliques est déjà exploitée industriellement, encore qu'à petite échelle. C'est qu'elle est entièrement dépendante de l'ensoleillement et ne peut aspirer à devenir compétitive que dans les pays de climat méditerranéen, tropical sec ou désertique. Ailleurs, le stockage de l'énergie calorifique reçue pendant les trop brèves heures d'ensoleillement pose des problèmes qui ne sont pour le moment résolus que par l'appoint de combustible fossile, afin que la fourniture d'électricité ne subisse pas d'arrêt.

Le prix de revient de l'électricité du seul ensemble de centrales fournissant sur le réseau une électricité solaire thermoélectrique, en Californie, est de 0,1 euro/kwh. On rappelle que le kwh est vendu par EDF à 0,096 euro HT (prix moyen) et 0,034 euro HT en tarif heures creuses. L'électricité solaire thermoélectrique serait donc tout à fait compétitive – dans de bonnes conditions climatiques.

Les États-Unis sont actuellement en pointe sur la production d'énergie solaire thermoélectrique, et des projets déjà très avancés existent en Israël et en Espagne notamment. Le Fonds pour l'Environnement mondial offre des facilités financières pour des réalisations, en particulier en Egypte, en Inde et au Brésil.

## L'énergie solaire photovoltaïque

C'est le rêve de toute l'humanité depuis qu'elle s'est rendue compte que les gisements pétroliers n'étaient pas inépuisables et que leur fin, bien qu'encore lointaine, était déjà en vue. L'énergie photovoltaïque peut en effet être installée partout, n'est pas polluante, est à la portée de tout État même pauvre, et ne suscite pas corruption et conflits – pour le moment.

### Principes de fonctionnement

L'élément-clef est une cellule photovoltaïque, constituée de matériaux semi-conducteurs transformant directement le rayonnement solaire en électricité. De manière très approximative, on peut dire que les photons venant heurter un électron du semi-conducteur, ce dernier va se libérer et créer un courant électrique. La matière du semi-conducteur est le silicium, traité, à l'aide d'impuretés, de manière à jouer le rôle d'une diode qui dirige tous les électrons dans le même sens.

Le silicium, mono ou polycristallin, a été choisi et représente 80% de la production mondiale des cellules photovoltaïques. Chacun des deux siliciums a ses avantages : le silicium polycristallin est moins coûteux à produire, mais le silicium monocristallin plus efficace. Il existe aussi des cellules à silicium amorphe, sensiblement meilleur marché, mais à rendement deux fois inférieur. Elles ne sont plus guère utilisées que pour les petits appareils ne demandant qu'une très faible puissance.

## Les systèmes photovoltaïques

L'énergie fournie par une cellule photovoltaïque isolée varie selon le modèle de 1 à 3 watts avec une tension de moins d'un volt. Les cellules, dont l'espérance de vie atteint une trentaine d'années, sont vendues dans le commerce par panneaux de 36 cellules connectées en série, chaque panneau fournissant 50 watts sous tension de 12 volts. Un panneau + un régulateur + une batterie de stockage reviennent à 650 euros. Un générateur photovoltaïque se compose d'une série de panneaux, avec batterie pour stockage de l'électricité, régulateur de charge et onduleur si on désire un courant alternatif.

Les systèmes photovoltaïques ont un grand nombre d'utilisations, à commencer par les panneaux solaires utilisés pour les satellites et autres engins spatiaux. Les cellules de base sont d'ailleurs différentes, car elles doivent être adaptées aux rayonnements hors de l'atmosphère. Les semi-conducteurs utilisés sont l'arséniure de gallium, le phosphore d'indium ou le tellure de cadmium.

Les utilisations les plus courantes sont celles des petits appareils tels que calculatrices, radios, systèmes d'alarme, jouets, etc., qui ne demandent que quelques milliwatts ou quelques watts. Les applications plus lourdes concernent les établissements civils ou industriels. Ainsi en va-t-il des habitations isolées, pour lesquelles le rattachement au réseau électrique serait difficile ou d'un coût prohibitif, encore que la solution des groupes électrogènes soit très concurrentielle car moins coûteuse à l'installation. Le coût d'une centrale photovoltaïque de 1,1 kW-crête (c'est-à-dire en fonctionnement dans des conditions optimales d'ensoleillement) varie entre 4000 et 8000 euros. Mais les dimensions les plus courantes atteignent 2,2 kWc (crête), ce qui en double à peu près le prix. Le prix de revient du kW/h avec un amortissement sur 20 ans du matériel varie de 0,4 à 0,7 €/kWh selon la puissance installée et le lieu d'installation (l'ensoleillement est un facteur important). Il atteint même 1,39 euros pour une installation solaire sur batteries à Marseille. Rappelons que l'électricité est distribuée par EDF au coût moyen de 0,096 euros par kWh... Ces prix sont cependant en décroissance régulière depuis 25 ans et, suivant, la localisation géographique et l'énergie substituée, la rentabilité devrait être atteinte entre 2015 et 2020.

En France, des aides financières étaient apportées par l'ADEME, s'élevant à 4,6 euros par watt-crête installé, avec un plafond de 5 kWc et de 80% du coût de l'installation. Elles sont remplacées, pour les particuliers, depuis le début 2005 par un crédit d'impôt de 40 % sur le prix du matériel. L'électricité produite et non utilisée (par exemple en heures creuses) peut être reversée sur le réseau EDF et achetée au prix de 15,25 centimes d'euro par kWh en France continentale et 30,5 centimes d'euro en Corse et dans

les DOM. Ce n'est donc pas une affaire extraordinaire. Malgré cela, une quinzaine de sites ont été équipés en Bretagne. En Allemagne, certaines villes achètent l'électricité solaire à son prix coûtant, soit environ 1,07 euro/kwh.

Les très petites installations isolées, comme les stations-relais de télévision, les éclairages ponctuels (balises, lampadaire isolé, etc.) utilisent très fréquemment des cellules photovoltaïques. Rien n'est plus surprenant qu'une cabine téléphonique perdue en plein désert...

Des centrales de plus grande capacité qu'une installation isolée sont expérimentées depuis plusieurs années, mais elles n'atteignent pas encore le stade exploitable : 44 kW en Allemagne, 300 kW en Grèce, 340 kW en Corse, 1 MW à Lugo et 8 MW à Carissa Plains (tous deux aux Etats-Unis), 1 MW à Saijo (Japon). Jusqu'à présent, ces centrales ne peuvent que servir d'appoint sur le réseau pendant les heures de pointe.

On a également pensé à une association centrale hydroélectrique – centrale photovoltaïque, cette dernière complétant la première pendant la saison des basses eaux, qui est aussi celle de l'ensoleillement maximum.

### Conclusions

La production d'électricité photovoltaïque comporte un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Parmi les avantages, on peut compter sa grande fiabilité, car aucune pièce mobile n'est à entretenir ou à changer, sa grande souplesse d'installation, le système pouvant être facilement dimensionné à la puissance requise, son caractère silencieux et non polluant.

Les inconvénients sont : un prix élevé à l'installation, le problème du stockage de l'énergie électrique, qui

exige des batteries à la fois coûteuses et à la vie relative brève (quelques années au mieux), les limitations de puissance, si l'on veut rester dans des limites de coût acceptables. Enfin, il va de soi que le fonctionnement d'un système photovoltaïque sera d'autant plus performant, à moindre coût, que la région considérée sera ensoleillée, ce qui limite en fait son application au sud du 45<sup>ème</sup> parallèle.

Il faut enfin parler d'un dernier inconvénient possible, suggéré par Pierre Boulle dans son roman *Miroitements*, ironique à la façon Rivière Kwai : le ternissement des miroirs ou de la surface des cellules photovoltaïques par la poussière, la pollution ou...les oiseaux va-t-il étouffer les rayons du soleil ?

### Références

- **Paul de Neyer** : *Énergie photovoltaïque*, mars 2000, [www.inti.be/ecotopie/solvolt.html](http://www.inti.be/ecotopie/solvolt.html)  
*Centrales électriques solaires industrielles*, <http://scgwiki.iam.unibe.ch:8080/turtlegallery/581>
- **Pilkington Solar International**, *Rien qu'avec des miroirs*, [www.tve.org/ho/doc.cfm?aid=463&lang=french](http://www.tve.org/ho/doc.cfm?aid=463&lang=french)
- **Outilssolaires.com** : *Centrales thermiques solaires*, [www.outilssolaires.com/pv/prin-centraleA.htm](http://www.outilssolaires.com/pv/prin-centraleA.htm)
- **Notre planète-info** : *Les énergies renouvelables – l'énergie solaire*, 2004, [www.notre-planete.info/environnement/energies\\_solaire.php](http://www.notre-planete.info/environnement/energies_solaire.php)
- **CEA** : *Les trois voies de l'énergie solaire*, septembre 2001, [www.cea.fr/fr/publications/clefs44/fr-clefs44/clefs4424.html](http://www.cea.fr/fr/publications/clefs44/fr-clefs44/clefs4424.html)
- **Pierre Boulle** : *Miroitements*, Flammarion 1982.

### L'électricité photovoltaïque en Europe fin 2003

Les puissances installées dans différents pays d'Europe, à fin 2003, sont indiquées dans le tableau ci-contre (source : ObserV'ER, Baromètre des énergies renouvelables, 2004).

Assez curieusement, on remarque d'une part que ce ne sont pas obligatoirement les pays les plus ensoleillés qui possèdent les plus grandes puissances installées, d'autre part que même certains pays relativement nordiques expérimentent la technique photovoltaïque.

Pays	Puissance installée (MWp)	
	Fin 2002	Fin 2003
Allemagne	277,60	410,30
Autriche	10,34	16,83
Belgique	0,73	1,06
Danemark	1,59	1,89
Espagne	20,42	27,26
Finlande	3,05	3,40
France	17,05	21,71
Grèce	2,37	3,25
Italie	22	26,02
Luxembourg	1,57	3,50
Pays-Bas	26,33	45,92
Portugal	1,67	2,07
Royaume-Uni	4,14	5,90
Suède	3,30	3,56