

Avant-propos

L'électricité solaire photovoltaïque : présent et futur

Bernard Equer (bernard.equer@polytechnique.edu), Directeur de recherches émérite au CNRS

Les craintes inspirées par le réchauffement climatique ont naturellement ravivé l'intérêt pour des sources d'énergie propres, non productrices de gaz à effet de serre et susceptibles de s'inscrire dans le cadre d'un développement durable. Dans ce contexte, l'Union Européenne a pris la décision ambitieuse de produire plus de 20 % d'électricité renouvelable d'ici 2010 et 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation énergétique globale d'ici 2020. Considérées comme plus proches de la maturité, les techniques de production d'électricité éolienne et de production d'eau chaude par des panneaux solaires ont été les premières à bénéficier de politiques offensives pour aider leur diffusion. Le développement spectaculaire de l'éolien chez nos voisins européens, à commencer par l'Allemagne, restera un événement marquant de la décennie.

Moins visible, la production directe d'électricité par des modules photovoltaïques (PV), technique séduisante par l'absence d'éléments mécaniques ou de fluides, connaît aussi un développement explosif. Avec une croissance soutenue de l'ordre de 40 % par an depuis dix ans (voir fig. 1), l'industrie photovoltaïque mondiale a produit en 2006 près de 2500 hectares de modules. Ceux-ci représentent une puissance crête de 2,5 GW⁽¹⁾ et sont capables de générer environ 2,5 TWh par an. Certes, la contribution actuelle de l'électricité solaire PV à la production d'énergie, est encore négligeable. Avec un parc de 3,4 GW, majoritairement allemand, l'Europe ne produit encore que 3 TWh environ. Il est vrai également que des incertitudes subsistent sur l'insertion de cette forme d'électricité dans les réseaux qui auront à gérer son intermittence et sa disponibilité aléatoire. Néanmoins, cette croissance rapide, témoin de la confiance des utilisateurs et des investisseurs, a fini par attirer l'attention du monde de l'énergie et enracine la conviction que le PV figurera à coup sûr dans le bouquet énergétique futur d'énergies propres.

Les produits PV commercialisés aujourd'hui sont déjà le résultat d'une technique performante qui garantit des produits fiables. Le développement de la filière a été longtemps freiné par un coût jugé excessif face aux énergies fossiles ou nucléaires. Mais la prise de conscience se fait, lentement il est vrai, que nos sociétés doivent payer un certain prix pour garantir un avenir supportable en termes de pollution et de sécurité, bref de développement durable.

La France a rejoint les nations, comme l'Allemagne et le Japon, qui considèrent qu'il faut des aides de l'État pour que cette technique devienne compétitive. Des mesures d'aide fortes ont été prises, à la suite de la loi Énergie de 2005, pour encourager les particuliers et les industriels à investir dans le PV, en leur garantissant le rachat de leurs kWh dans des conditions favorables.

S'il ne disparaît pas, le critère de stricte compétitivité économique, c'est-à-dire le prix du kWh électrique, n'est donc plus déterminant. Néanmoins, il est clair que les aides accordées aujourd'hui ne sont pas supposées à fonds perdus. C'est un pari sur l'avenir : les progrès de l'industrie et ceux de la recherche doivent permettre d'atteindre au plus vite la rentabilité, à condition que les comparaisons entre ressources énergétiques soient effectuées sans biais et en prenant en compte tous leurs avantages ou inconvénients.

Trois facteurs contribuent à établir le prix du kWh : le rendement énergétique, c'est-à-dire la fraction du rayonnement solaire convertie en électricité, le coût de fabrication du m² de modules et la durée de vie de ces modules. Les deux premiers facteurs déterminent le prix du watt-crête (Wc)⁽²⁾, tandis que la durée de vie permet une évaluation du coût du kWh à partir du nombre de kWh produits. Les produits commerciaux offrent des rendements allant de 6 à 20 %, mais pour un prix du watt-crête sensiblement constant, de l'ordre de 3 à 5 €/Wc. La durée de vie excède les 20 ans pour les bons produits, ce qui conduit à un coût du kWh actualisé de l'ordre de 0,20 € à 0,35 €⁽³⁾, sans compter les coûts liés à l'installation⁽⁴⁾.



Panneaux photovoltaïques sur les toits de la « Cité du Soleil », Heerhugowaard (près d'Alkmaar), Pays-Bas.

© Municipalité de Heerhugowaard

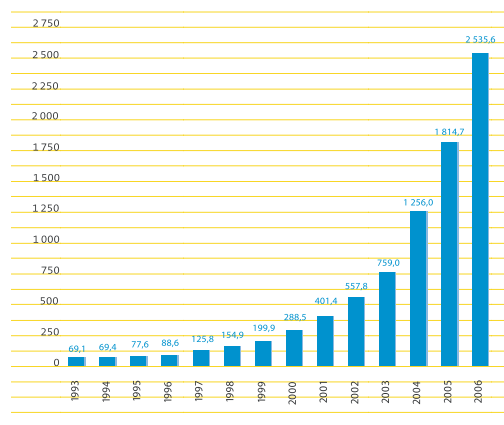
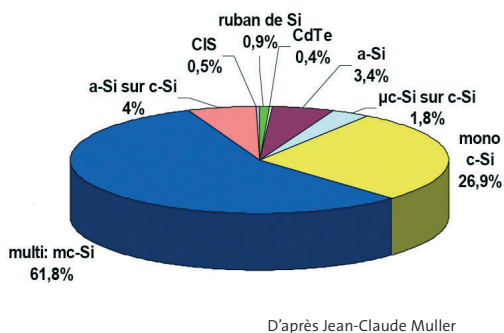


Figure 1 : Évolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques (en mégawatts-crête), d'après EurObserv'ER.

(1) Selon EurObserv'ER (www.energies-renouvelables.org).
 (2) L'unité de mesure de la production de cellules et modules photovoltaïques est le watt-crête installé, qui correspond à une puissance de 1 watt lors de l'illumination par le soleil, sous incidence normale à la latitude de 45°.
 (3) Le choix du taux d'actualisation de l'investissement et du taux d'inflation explique la large variabilité des chiffres.
 (4) Pour mémoire, le prix moyen dans l'Union Européenne de l'électricité à usage domestique est de 0,11 €/kWh.

Figure 2 : Répartition de la production mondiale (en watt-crête) de modules photovoltaïques suivant les différentes filières, en 2006.

c-Si : silicium monocristallin.
 mc-Si : silicium multicristallin.
 μc-Si : silicium microcristallin.
 a-Si : silicium amorphe.
 CIS : diséléniure de cuivre et d'indium.
 Ces chiffres, basés sur les informations données par de nombreux fournisseurs et experts, diffèrent quelque peu suivant les agences qui collectent les données.



La décroissance des coûts du Wc se poursuit régulièrement depuis 30 ans, selon une loi d'apprentissage où le coût décroît de près de 20 % chaque fois que la production cumulée double. À ce rythme, on peut attendre que le PV devienne compétitif en Europe entre 2020 et 2040, selon les conditions économiques qui régneront à cette époque.

De nombreuses filières ont été expérimentées dans les 30 dernières années dans l'espoir de découvrir le matériau qui permettrait la meilleure performance économique. Aujourd'hui encore, la compétition est forte entre la filière historique du silicium cristallin, largement dominante avec plus de 90% du marché (voir fig. 2), et un nombre restreint d'autres filières, parmi lesquelles plusieurs matériaux en couches minces portent l'espoir d'un progrès substantiel en termes d'abaissement des coûts.

L'augmentation des rendements focalise particulièrement l'intérêt des chercheurs. Le graphique de la figure 3 montre que toutes les filières continuent de progresser de façon remarquablement continue depuis trente ans. Il n'y a pas eu de grandes ruptures dans cette progression et les nouvelles filières suivent sensiblement la même pente que les anciennes. On a pu montrer que la limite théorique du

rendement de conversion énergétique se situe au-delà de 80 % et n'est pas, *a priori*, hors d'atteinte. Les records en laboratoire le rappellent régulièrement, tel celui de 40,7 % récemment obtenu aux USA grâce à des cellules hélas trop complexes pour une utilisation commune. Mais, le *challenge* est là et constitue une motivation essentielle de la recherche.

Comme nous le rappelions plus haut, la France a pris une position très favorable à l'électricité photovoltaïque avec la loi de juillet 2005 fixant les orientations de la politique énergétique (loi POPE). Les décrets d'application prévoient en effet le rachat des kWh produits dans de très bonnes conditions (0,30 €/kWh, éventuellement porté à 0,55€/kWh dans le cas d'une réelle intégration au bâti des modules), assorties d'un crédit d'impôt pour les particuliers. Ces mesures, qui tranchent avec la grande réserve du passé, ont rapidement suscité un fort élan industriel. Celui-ci s'appuie sur le contexte récent des pôles de compétitivité : ainsi, dans le cadre du pôle CapEnergies en Provence-Côte d'Azur, l'usine SILPRO à Saint-Auban devrait produire 3 à 4000 tonnes de silicium de qualité solaire dès 2009. En Rhône-Alpes, le pôle TENERDIS abritera un grand consortium industriel ALLIANCE-PV, couvrant les étapes du processus de fabrication allant du lingot au module et incluant l'Institut d'Énergie Solaire créé en 2006 près de Chambéry, Photowatt, premier fabricant national de cellules et modules et les autres partenaires régionaux. L'Agence pour l'Innovation Industrielle est fortement impliquée dans ces projets de plusieurs centaines de millions d'euros chacun. Le contexte industriel et scientifique est présent et de haut niveau. Le marché mondial est fortement demandeur et la volonté politique est manifeste. Il aurait été dommage de ne pas saisir ces opportunités. ■

