

L'énergie solaire photovoltaïque

Un peu d'Histoire

La production d'énergie par des centrales photovoltaïques exploite un principe de conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, dit effet photo-électrique, découvert par Becquerel, puis identifié par Einstein comme un phénomène que la physique classique du 19^e siècle ne pouvait pas expliquer. C'est largement ce fait expérimental qui allait induire la physique quantique moderne, seule à même d'expliquer la possibilité d'une interaction entre de l'énergie lumineuse (portée par des photons) et des électrons. Le convertisseur énergie lumineuse/énergie électrique est toujours constitué, à la base, d'une ou plusieurs jonction(s) de matériaux semi-conducteurs, l'un étant de type N et l'autre de type P. D'emblée, à l'exposé des seuls principes de base, le décor est posé : le photovoltaïque est simple à l'usage, puisqu'il ne repose pas sur l'exploitation de cycles thermodynamiques complexes. De plus, son fonctionnement n'impliquant aucune combustion, il ne rejette aucune émission polluante (et notamment pas de CO₂). Enfin, le convertisseur photovoltaïque est un objet moderne par excellence.

par **Pâris MOURATOGLU*** et **Pierre-Guy THEROND****

L'ÉNERGIE SOLAIRE D'ORIGINE
PHOTOVOLTAÏQUE : DE QUOI PARLE-T-ON ?

Les différents types de centrales photovoltaïques

Aujourd'hui, après une maturation industrielle déjà longue, on peut distinguer quatre grands types de centrales photovoltaïques :

- Les centrales au sol (dites « fixes ») ont maintenant des puissances de quelques centaines de kW à plusieurs dizaines de MW. Elles sont constituées essentiellement d'un ensemble de panneaux photovoltaïques orientés vers le Sud, avec une inclinaison dépendant de la latitude du lieu considéré, mais également de l'optimisation des effets d'ombrage entre les différentes structures

* Président d'EDF Energies Nouvelles.

** Directeur Nouvelles Technologies.

	2001	2010	2020	2030	2040
Total Consumption in TWh (IEA)	15578	19973	25818	30855	36346
Biomass	180	390	1010	2180	4290
Large Hydro	2590	3095	3590	3965	4165
Small Hydro	110	220	570	1230	2200
Wind	54,5	512	3093	6307	8000
PV	2,2	20	276	2570	9113
Solar Thermal	1	5	40	195	790
Geothermal	50	134	318	625	1020
Marine	0,5	1	4	37	230
Total RES	2988,2	4377	8901	17109	29808
RES Contribution	19,2%	21,9%	34,5%	55,4%	82,0%

Prospective énergétique des énergies renouvelables à l'horizon 2040.
Source : European Renewable Energy Council, « Renewable Energy Scenario to 2040 ».

Tableau 1.

supportant les panneaux. Les panneaux sont fixés sur une structure et ils sont reliés électriquement entre eux en série. Les panneaux photovoltaïques produisant une tension continue, leur signal électrique de sortie doit être ondulé, c'est-à-dire transformé en courant alternatif, *via* un onduleur. Une centrale photovoltaïque au sol est donc constituée essentiellement d'un ensemble de panneaux montés sur structures, d'un ensemble de câbles reliant les panneaux entre eux, d'un onduleur courant continu/courant alternatif et, enfin, d'un poste de transformation relié au réseau public de distribution électrique.

- A ces dispositifs, les centrales photovoltaïques au sol dites à *trackers* ajoutent un système mécanique de suivi de la course du soleil. Leur puissance unitaire se situe plutôt dans la fourchette haute des centrales au sol.
- Les centrales photovoltaïques installées sur de grandes toitures ont essentiellement les mêmes composants que les centrales au sol, mais avec cette caractéristique particulière que les modules photovoltaïques sont intégrés ou posés en toiture. Pour un panneau photovoltaïque, le fait d'être « intégré » signifie qu'en sus de sa fonction de production d'électricité d'origine solaire, il constitue un élément architectural ou technique du bâtiment, et qu'il en remplit au moins une des fonctions (cela peut être notamment l'étanchéité ou l'isolation thermique). En France, la définition précise de « l'intégré au bâti » revêt une importance toute particulière : en effet, le tarif d'achat de l'électricité d'origine photovoltaïque par EDF est notablement plus élevé dans le cas de l'intégré au bâti que dans celui du non intégré au bâti (même installé sur un bâtiment) ou dans celui des centrales au sol. La gamme de puissance d'une centrale installée en grande toiture peut aller de quelques dizaines de kW à plusieurs MW.
- Enfin, les centrales en toitures résidentielles, d'une superficie bien moins importante, équivalent au cas

précédent, mais avec des puissances installées plus faibles, de l'ordre de quelques kW. En France, il s'agit essentiellement de centrales intégrées au bâti, dont la production électrique est favorablement rémunérée.

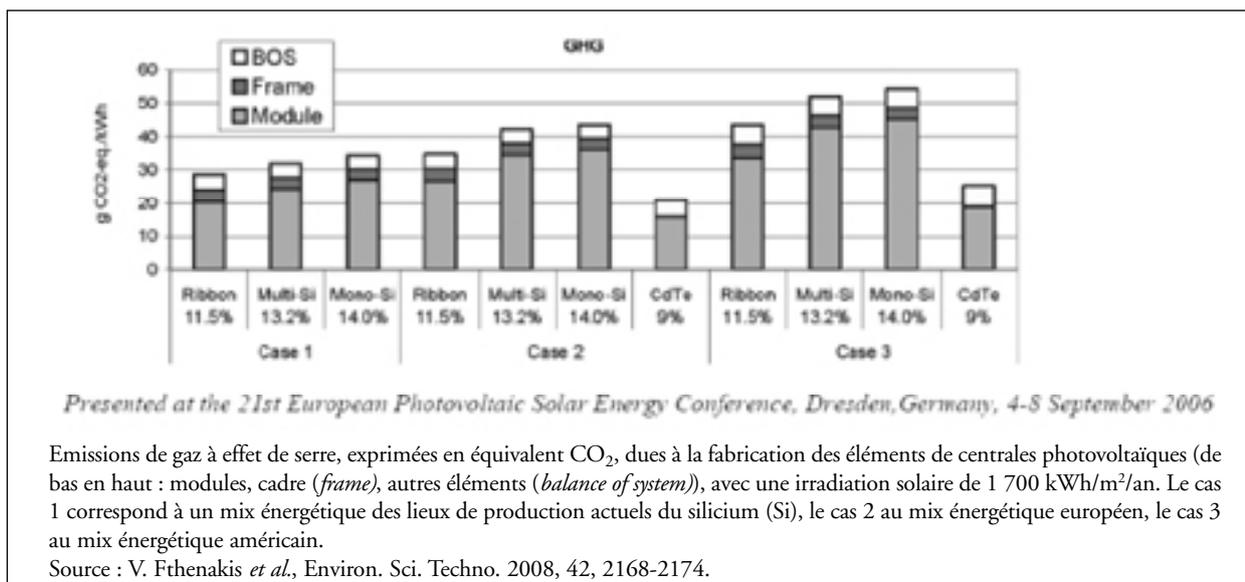
L'ÉLECTRICITÉ SOLAIRE D'ORIGINE PHOTOVOLTAÏQUE : UNE ANALYSE À LA LUMIÈRE DES CRITÈRES DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

L'électricité solaire d'origine photovoltaïque cumule de nombreux atouts sur le plan des critères du développement durable. Cela en explique très vraisemblablement la popularité.

Aspect économique de long terme

Sur le plan économique, d'abord. Bien que chère, aujourd'hui, l'électricité d'origine photovoltaïque présente l'avantage d'être inépuisable à l'échelle temporelle des sociétés humaines, et abondante sur l'ensemble de la surface du globe terrestre. Le tableau ci-dessus montre que, de ce fait, elle pourrait devenir l'énergie renouvelable majeure du 21^e siècle. D'autres ordres de grandeur confirment que ces projections ne sont pas totalement utopiques : environ 80 km² de nouvelles toitures sont installées en France chaque année. Considérer qu'un tiers (1) de cette surface puisse être équipée de panneaux solaires correctement orientés reviendrait à augmenter de 4 TWh par an l'énergie électrique d'origine solaire produite en France, qui pourrait atteindre près de 50 TWh par an, soit environ 10 % de la consommation intérieure française d'électricité, lorsque l'ensemble des toitures (environ 1 000 km²) auront été équipées. De 1 000 à 1 500 km² de centrales photovoltaïques au sol permettraient de produire la même quantité d'électricité solaire, en ayant recours aux technologies actuelles (voir le tableau 1).

(1) Ratio préconisé par l'International Energy Agency dans Report IEA – PVPS T7-4 : 2002, *Potential for Building Integrated Photovoltaics*.



Graphique 1.

L'environnement

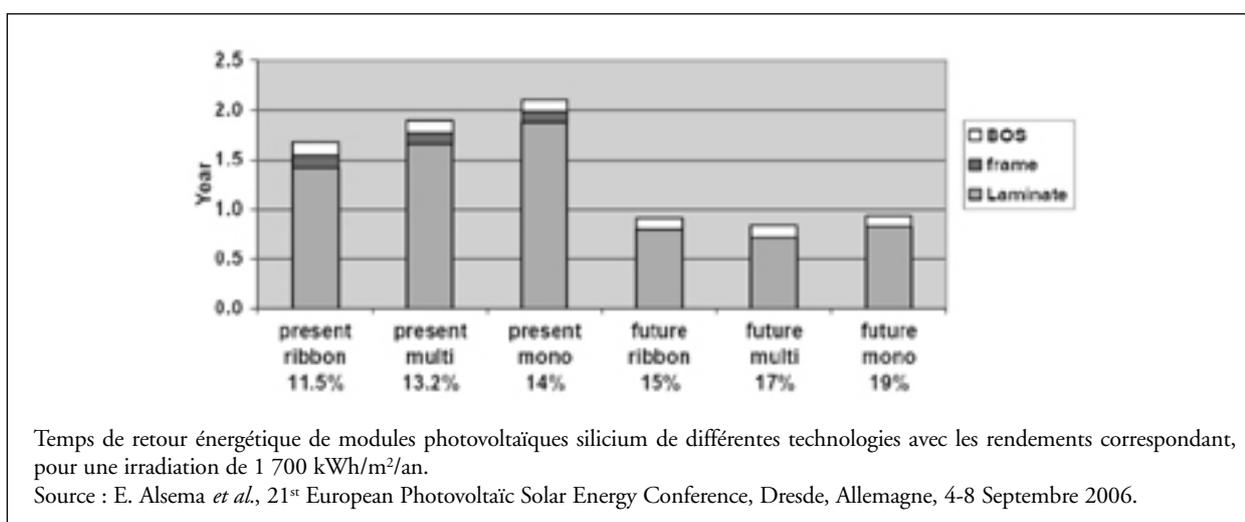
Sur le plan environnemental, ensuite, les centrales solaires photovoltaïques n'émettent aucun polluant lors de leur exploitation, et donc *a fortiori* aucun gaz à effet de serre. L'analyse de leur cycle de vie montre que leur construction est également très sobre en termes d'émissions de gaz à effet de serre ou d'autres polluants. Nous reproduisons ci-dessus (voir le graphique 1) un résultat récent d'analyse de cycle de vie de différentes technologies photovoltaïques, et différents types de mix énergétique. A noter, pour élément de comparaison, que le mix énergétique européen produit de l'ordre de 500 g CO₂/kWh et le mix énergétique français, de l'ordre de 90 g CO₂/kWh. Notons également qu'avec un mix énergétique français déjà très peu carboné, l'analyse de cycle de vie de centrales, dont tous les composants

seraient fabriqués en France, serait encore plus favorable.

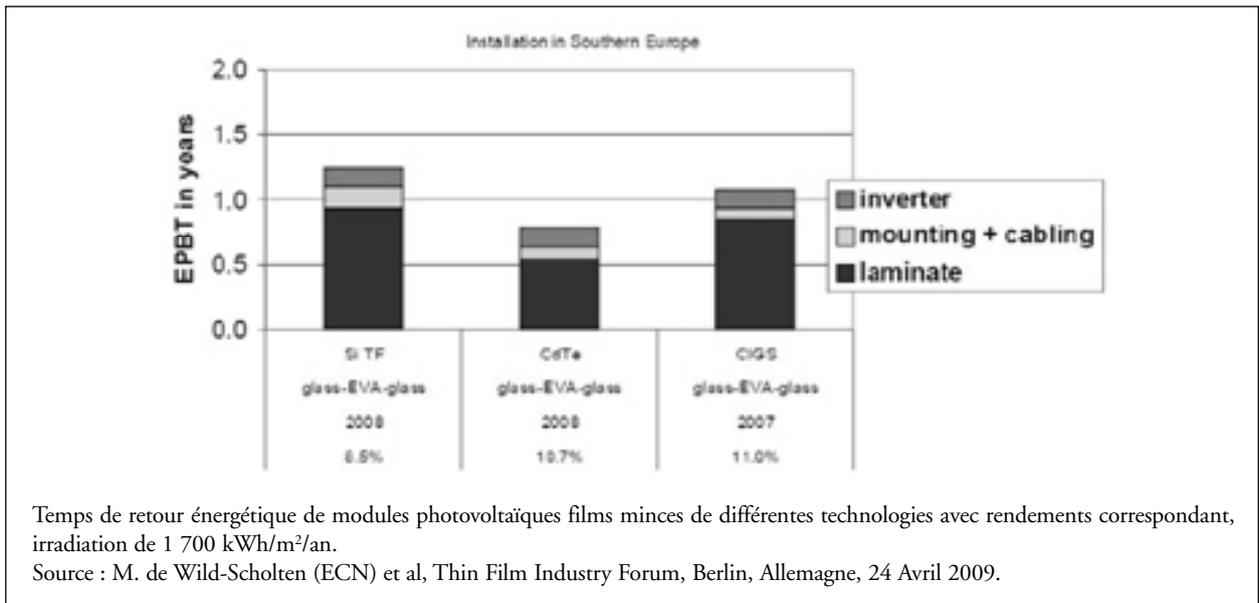
Une légende tenace veut que les modules photovoltaïques consomment plus d'énergie pour leur fabrication qu'ils n'en produisent au cours de leur durée de vie : les graphes ci-après (voir les graphiques 2 et 3), correspondant aux technologies silicium et films (ou couches) minces, montrent qu'il n'en est rien.

La dimension sociétale

Comme l'énergie d'origine solaire est répartie de façon globalement équitable sur tout le globe terrestre, elle est accessible à tous, dans sa dimension géopolitique (aucun pays habité n'est radicalement défavorisé, comme cela peut être le cas pour les énergies fossiles) et



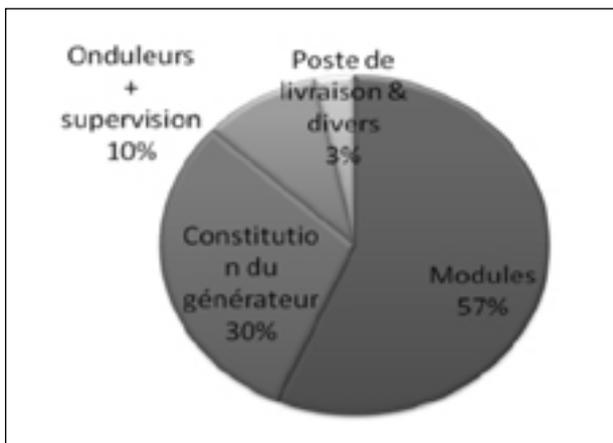
Graphique 2.



Temps de retour énergétique de modules photovoltaïques films minces de différentes technologies avec rendements correspondant, irradiation de 1 700 kWh/m²/an.

Source : M. de Wild-Scholten (ECN) et al, Thin Film Industry Forum, Berlin, Allemagne, 24 Avril 2009.

Graphique 3.



Graphique 4 : Répartition des coûts d'une centrale photovoltaïque au sol « fixe » (sans *trackers*).

dans sa dimension locale (l'électricité d'origine photovoltaïque est la seule énergie primaire électrogène qui soit à la portée du particulier). Du fait de ces caractéristiques, elle présente un grand intérêt sous les aspects éthique et sociétal.

Les freins au déploiement à court terme

Le frein essentiel à un très large déploiement de l'électricité d'origine photovoltaïque tient à son coût. Une centrale photovoltaïque coûte aujourd'hui de l'ordre de 4 €/Wc (2) pour une centrale fixe au sol, de 7 €/Wc pour une centrale en toiture résidentielle. En France (selon les régions), une centrale de ce type produit un équivalent annuel en pleine puissance de 900 à 1 550 heures. Pour atteindre la parité réseau (la *grid parity* des

Anglo-Saxons) en Europe, c'est-à-dire le moment où les coûts de l'électricité achetée par le particulier aux fournisseurs traditionnels rejoignent les coûts de production d'électricité d'une centrale photovoltaïque, l'investissement doit se situer dans une fourchette 1,5 à 2,0 €/Wc. Une centrale au sol à *trackers* (systèmes d'orientation des panneaux photovoltaïques vers le soleil) peut tolérer un investissement de 30 % supérieur, étant donné qu'elle produit environ 30 % d'énergie supplémentaire.

Le graphique 4 illustre une répartition approximative des coûts d'une centrale photovoltaïque au sol, entre ses composants essentiels. On y voit que les modules photovoltaïques représentent encore la plus grande part des coûts, même si cette part a diminué au cours des dernières années. C'est donc au niveau du module, que se situe la source première d'une baisse des coûts. Cette baisse est déjà bien engagée, comme le montrera le paragraphe suivant. Une baisse des coûts du *balance of system* (le BOS), quoique plus modérée, est également attendue.

LES TECHNOLOGIES : MOTEUR ESSENTIEL DE LA BAISSÉ DES COÛTS

Il existe une importante réserve d'évolutions et de révolutions technologiques possibles, dont certaines sont en train de déboucher au niveau industriel. Ces évolutions rendent crédible un coût raisonnablement margé de modules photovoltaïques inférieur à 1 €/Wc, et un prix de *balance of system*, lui aussi, inférieur à 1 €/Wc (réfé-

(2) Le « watt crête » est l'unité communément admise pour la mesure de la quantité de puissance maximale que peut émettre un panneau photovoltaïque, dans des conditions d'ensoleillement données.

	Rendements (3) industriels constatés	Rendement record actuel	Ordre de grandeur de coût actuel hors « effet crise » (i.e. valeurs mi- 2008) (€/W _c)
CdTe	10 %	16,5 %	0,8 (4)
CIS	12 %	19,9 %	1,2
A-Si	7 %	12,1 %	1,2

Tableau 2.

rences : Etude européenne PV Track, prospective EPIA).

On peut distinguer aujourd'hui deux grandes filières industrielles :

a) la filière historique « Silicium », qui implique plusieurs étapes de fabrication :

- une première étape de raffinage de la matière brute (silice), pour obtenir du silicium dit « métallurgique » ;
- une deuxième étape de raffinage du silicium métallurgique, pour obtenir du silicium de qualité dite *solaire* ;
- la fabrication de *wafers*, des tranches minces de silicium ;
- la fabrication de cellules photovoltaïques ;
- enfin, l'assemblage des dites cellules en modules.

b) la filière « films minces », qui présente une chaîne de la valeur beaucoup plus simple : les étapes décrites ci-dessus se résument à une seule, avec, comme entrants, les matériaux de base et, pour produit fini, les modules photovoltaïques.

Globalement, la filière « films minces » a pour elle une plus grande simplicité de fabrication, clairement visible dans la décomposition de la chaîne de la valeur, menant à des coûts de fabrication significativement plus faibles au mètre carré de panneau, que la filière « silicium ». A contrario, la filière « silicium » présente des rendements photovoltaïques plus élevés (le rendement photovoltaïque se définit comme le ratio entre l'énergie lumineuse incidente et l'énergie électrique produite, par unité de surface).

Le silicium domine très largement le marché actuel (à plus de 80 %), mais la montée en puissance des « films minces » devient nette depuis 2007, grâce notamment au tellure de cadmium (CdTe) (6,4 % du marché en 2008). Clairement, l'année 2007 a montré que les « films minces » photovoltaïques arrivent à maturité industrielle, dans des conditions économiques très avantageuses par rapport au silicium.

Pour toutes les technologies, la période actuelle rend l'exercice de détermination d'un ordre de grandeur du ratio coût/prix des différentes technologies particulièrement périlleux. On observe, en effet, particulièrement en matière de silicium cristallin, un mouvement de baisse vertigineux, dont il est difficile de dire s'il est conjoncturel ou s'il constitue un mouvement de fond et de réduction des marges du fait de la concurrence des différentes technologies entre elles. La vérité est probablement entre les deux explications.

Les « films minces »

Trois technologies « films minces » dominent aujourd'hui. Nous en donnons les performances essentielles dans le tableau 2. L'année 2007 a vu arriver sur le marché le tellure de cadmium, à des prix très significativement inférieurs aux technologies Silicium.

- Le tellure de cadmium est arrivé à maturité au travers de la production d'un fournisseur unique, First Solar, basé aux Etats-Unis. La production de ses usines, qui se développent actuellement dans le monde entier (notamment aux Etats-Unis, en Europe et en Asie), est entièrement réservée plusieurs années à l'avance. C'est la technologie « film mince » qui est la plus performante, aujourd'hui, en termes de coût. En 2008, First Solar est numéro Deux mondial pour la production de panneaux photovoltaïques.

- Le cuivre indium sélénium (CIS), auquel on peut rattacher le cuivre indium gallium sélénium (CIGS) est la technologie « films minces » la plus performante, à terme : les rendements records obtenus à ce jour en témoignent. Il est cependant plus complexe à fabriquer que le tellure de cadmium, moins stable chimiquement, très sensible à l'humidité. Il fait l'objet d'un fort intérêt de la part de la communauté des industriels du photovoltaïque, avec des procédés extrêmement diversifiés. Les possibilités d'amélioration des productions actuelles sont multiples : formulation exacte du composé, maîtrise et stabilisation des procédés actuels, nouveaux procédés plus rapides en termes de rendement de production, optimisation de l'encapsulation... Les prix actuels du CIS ne sont pas au niveau de la parité réseau, mais cette technologie pourrait l'atteindre dans deux ou trois ans, avec des prix de l'ordre de ceux du CdTe, voire inférieurs, et des rendements légèrement supérieurs.

- Le silicium amorphe est la technologie « film mince » historique. Encore aujourd'hui, il plafonne à des rendements le confinant à des applications relativement spécialisées. Récemment, cependant, des progrès technologiques (cellules tandem, multi-jonctions) l'ont relancé. L'enjeu actuel consiste à pouvoir stabiliser un processus de fabrication industriel produisant des modules ayant un rendement de 10 %. Cette perspective est proche.

(3) Le rendement photovoltaïque se définit comme le ratio de l'énergie électrique fournie et de l'énergie lumineuse incidente. Il se mesure dans des conditions normales d'éclairage en lumière blanche, à 1 000 W/m² et à 25°C.

(4) Source : communication First Solar.

	Rendements industriels constatés	Rendement record actuel	Ordre de grandeur de coût hors effet crise (i.e. valeurs mi-2008) (€/Wc)
monocristal	14-18 % (5)	24,5 %	2,8
poly-cristal	14 %	18,1 %	2,6
métallurgique	13 %	15 %	2,4

Tableau 3.

La filière « silicium » : un approvisionnement amont garanti

Différentes sous-catégories de la filière « silicium » peuvent être distinguées, en fonction du degré de raffinement de la matière de base. Les monocristaux utilisent la matière la plus raffinée, et le silicium métallurgique permet d'éviter la phase de raffinage par la voie chimique (indispensable à l'obtention des monocristaux) (voir le tableau 3).

Face à l'irruption des « films minces » à des prix significativement plus faibles, présentant encore des marges de progrès importantes (un CIS à 0,5 €/Wc est plausible), on s'est demandé si le silicium avait encore un avenir. La réponse est positive, du fait de la conjonction des facteurs suivants :

- contrairement aux « films minces », le silicium ne présente pas de problème d'approvisionnement amont en matière première : la silice est très abondante sur toute la surface du globe. Cet avantage deviendra de plus en plus déterminant lorsque le marché atteindra les niveaux de la « parité réseau » ;
- le silicium présente des rendements significativement plus élevés que ceux des « films minces », avec encore des marges de progression significatives, comme le montre le tableau 3. Du fait de ces rendements, il devient avantageux pour des applications où la place disponible est une contrainte (comme les toitures résidentielles, qui constituent le marché par excellence de la *grid parity*) :
- il présente également des possibilités de ruptures technologiques (multi-jonctions, nanomatériaux, couches épaisses monocristallines), qui permettraient de franchir encore un cap en termes de rendements (des rendements de l'ordre de 30 % ou plus deviennent possibles) et/ou permettrait de ramener leurs prix de fabrication à hauteur de celui des « films minces », tout en conservant les rendements du silicium. L'apparition des « films minces » a eu, de ce point de vue, un effet salutaire de stimulation, provoquant un peu partout dans le monde des programmes de recherche dans ce domaine ;
- enfin, le silicium bénéficie de son antériorité industrielle.

La crise actuelle agit comme un révélateur des réserves de baisses potentielles des prix des modules silicium. Sans que l'on soit réellement capable de donner, à ce

jour, un prix d'équilibre, les offres des fournisseurs se situent aujourd'hui à un niveau de 25 % en-deçà de celui indiqué dans le tableau 3 (ce prix est encore moindre chez les fournisseurs chinois). Mentionnons toutefois une valeur de *best practice price*, imaginée par les experts du magazine *Photon International* en 2007 et fixée autour de 2 €/Wc pour le silicium poly-cristal.

Le « *Balance of System* » (BOS)

Le *Balance of System* se compose des équipements et services de nature technique à ajouter aux modules, afin de constituer un système photovoltaïque installé. Il s'agit, essentiellement :

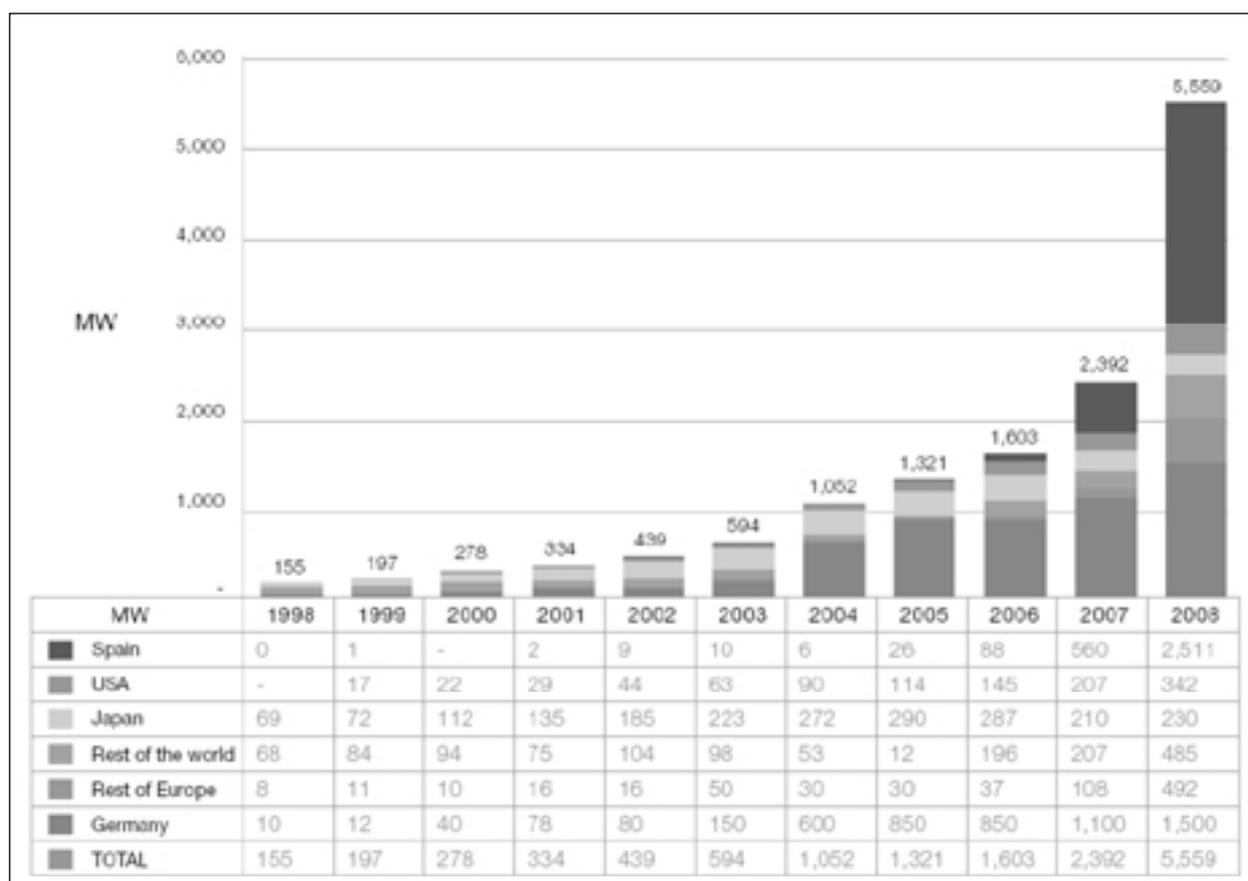
- de l'onduleur de conversion du courant continu produit par les modules en courant alternatif ;
- des supports mécaniques, pour les centrales au sol ou en toiture ;
- des câbles électriques (pour les courants continu et alternatif) ;
- de l'installation ;
- enfin, des divers raccordements, dont le coût varie considérablement d'une opération à l'autre.

A ces éléments techniques, on doit ajouter des éléments non techniques, comme les frais de développement (liés essentiellement aux démarches administratives à effectuer) et les frais de financement.

Comme indiqué ci-dessus, le coût du *Balance of System* deviendra de plus en plus prépondérant dans le prix d'un système photovoltaïque. Les niveaux de prix ont été longtemps élevés, car ces postes ont été négligés jusqu'à présent : il y a un an, ils se montaient couramment à 2 €/Wc pour un système de centrale au sol, et à 5 €/Wc pour l'adaptation d'un module à une installation en toiture. Des progrès rapides sont en cours aujourd'hui, avec des résultats déjà visibles : baisse du coût des onduleurs (du fait de leur fabrication en grande série), rationalisation des méthodes de pose (pour les centrales au sol), développement de produits adaptés, pour les toitures. Les prix (hors modules) sont de l'ordre de 1,5 €/Wc pour une centrale au sol et de 3 €/Wc pour une centrale en toiture. On s'attend cependant à un prix plancher, aux alentours de 0,8 €/Wc.

UN TOUR DU MONDE DU MARCHÉ, DE L'INDUSTRIE ET DE LA RECHERCHE ET

(5) Les technologies HIT et « contacts arrière » ont les meilleurs rendements (respectivement 16 % et 18 %).



Graphique 5 : Puissances photovoltaïques annuelles installées, par pays et grandes régions, entre 1998 et 2008 (source : EPIA).

DÉVELOPPEMENT DU PHOTOVOLTAÏQUE

En termes géographiques, si l'on s'intéresse aux grandes masses, le marché du photovoltaïque est important là où des politiques publiques ont été mises en place pour soutenir son développement. Une clef d'analyse du secteur par pays est donc pertinente. Le graphique 5 donne les puissances installées par pays principaux et par année, depuis 1998.

Le graphique 6 de la page suivante donne le classement des principaux fabricants de modules photovoltaïques en 2007 et en 2008.

Le Japon, coureur de fond

Historiquement, le Japon est resté longtemps le pays leader en termes de mise en place d'une politique cohérente de développement du photovoltaïque. Même si cette place de leader s'effrite (notamment avec la relégation de Sharp, en 2008, à la quatrième place des constructeurs de cellules, après que cette firme ait longtemps occupé la première), elle reste cependant solide, avec, en particulier :

- un marché intérieur actif, notamment sur l'intégré au bâti, mais qui doit trouver un second souffle : une ten-

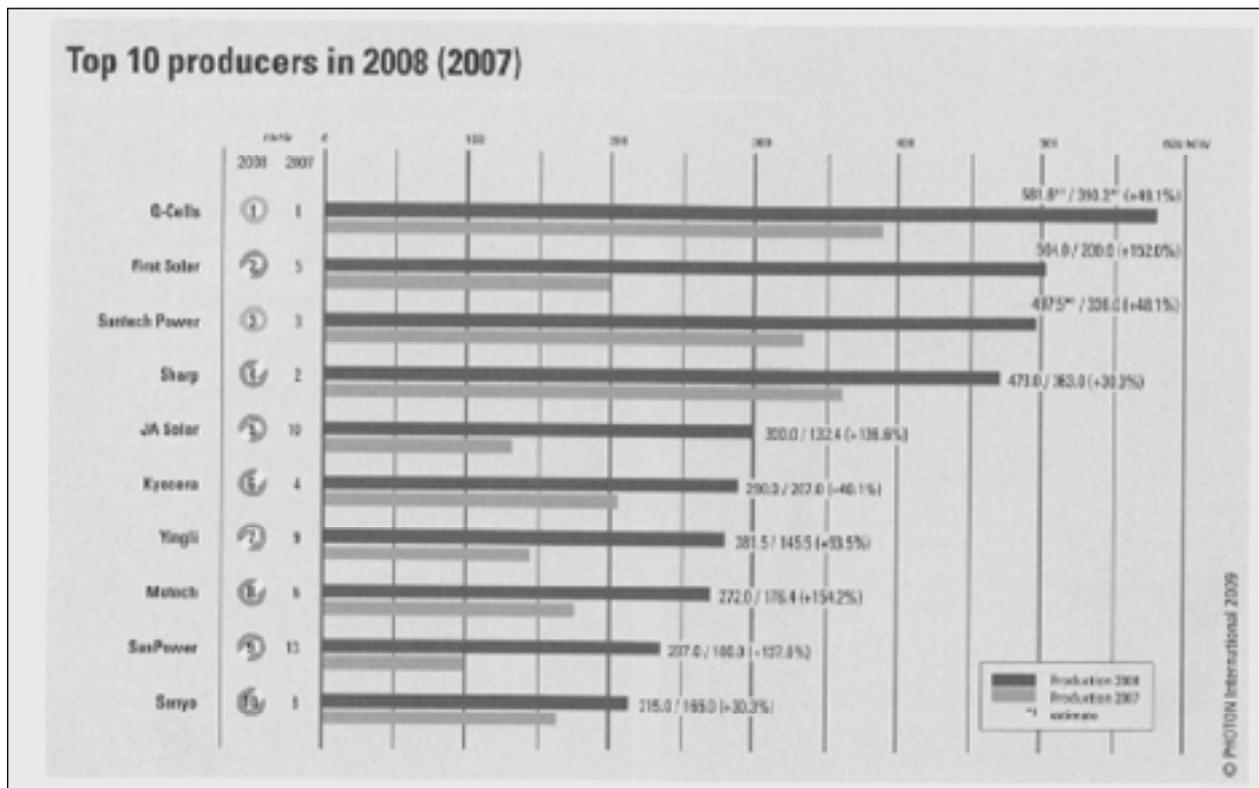
tative d'arrêt des subventions s'est traduite par un fléchissement ;

- une base industrielle solide et diversifiée : Sharp, leader sur le silicium cristallin, même si sa position s'affaiblit, des « seconds » qui tiennent bien leur rang : en 2007, on compte trois Japonais dans le « Top 10 » des constructeurs mondiaux ;

- enfin, une activité de R&D de long terme, qui donne des résultats : Sanyo, avec sa cellule hétérojonction, obtient des rendements records sur les modules cristallins, Kaneka est le leader du silicium micro-morphe, le Japon étant également bien positionné sur le CIGS.

L'autre pays de référence : l'Allemagne

Longtemps premier marché, le leadership de l'Allemagne résulte d'une politique volontariste menée au lendemain de la chute du Mur de Berlin (en 1989). Un cadre économique fondé sur un tarif d'achat attractif, un cadre réglementaire rigoureux et facilitateur, un accès au réseau facilité par une priorité accordée aux énergies renouvelables ont permis le développement rapide de capacités de production, au sol et en toiture. Ce développement du marché s'est accompagné d'une politique industrielle volontariste, aidée par les fonds



Graphique 6 : Le « Top 10 » des fabricants de modules photovoltaïques (source : Photon International, mars 2009).

communautaires au titre de la promotion de l'industrie est-allemande. Il en résulte des leaders industriels, tels que Q-Cell, numéro Un en 2007 et 2008. Bien que concurrencée par d'autres pays (le Japon depuis toujours, l'Espagne, la Chine et les Etats-Unis), l'Allemagne reste une référence en matière de photovoltaïque. La plupart des salons et conférences internationales s'y tiennent. De nombreux Instituts constituent des références en matière de R&D, comme le *Fraunhofer Institut*, réputé, en particulier pour la qualité des mesures de performances de panneaux photovoltaïques qu'il effectue pour le compte de tiers. Le TÜV (association *Technischer Überwachungs-Verein*) est également une référence en termes de qualification des têtes de séries de modules photovoltaïques suivant les normes en vigueur.

L'Espagne : un démarrage en fanfare, suivi d'une pause

Pays le plus ensoleillé d'Europe, l'Espagne a pris la tête du classement (en volume) des installations photovoltaïques en 2008.

Pourtant, ce développement s'est arrêté net en 2009, année dont les résultats devraient être nettement en retrait. En cause, le système de tarification, trop généreux, a entraîné une inflation de demandes de raccordement, provoquant en retour une réaction du régulateur pour, d'une part, stopper cette inflation et,

d'autre part, réduire les rémunérations des producteurs. Cette situation devrait être assainie en 2010, et l'Espagne restera sûrement une terre de développement.

L'Espagne accueille également une industrie photovoltaïque, mais celle-ci a encore du mal à rivaliser en taille avec les leaders allemands, japonais ou nord-américains. A l'inverse, plusieurs instituts de recherche espagnols sont de réputation internationale : l'IES et le CIEMAT en font partie.

Les Etats-Unis : un marché en plein essor, mais encore modeste, avec des capacités technologiques étonnantes

Les Etats-Unis sont indubitablement le lieu du développement technologique :

- plus de 100 *start-up*, majoritairement californiennes, sont positionnées sur le photovoltaïque ;
- la nouvelle star industrielle est d'origine américaine : First Solar, apparue seulement en 2007 dans le « Top 10 » des fabricants de modules, est devenue numéro 2 en 2008, sur la base d'une technologie révolutionnaire, celle du « film mince » qui induit une division par deux du prix des modules ;
- Sunpower est également positionné sur un produit silicium haut de gamme à forte efficacité énergétique (de l'ordre de 18 %), grâce à une technologie dite de

« contact arrière ». Il est entré dans le « Top 10 » en 2008.

Le marché est encore modeste aux Etats-Unis en regard de la taille du pays et de potentialités énergétiques solaires exceptionnelles. Ce marché américain est cependant en plein essor et pourrait rapidement occuper les premières places, sous l'impulsion de la nouvelle Administration du Président Barack Obama.

La Chine, nouvel entrant dans le secteur

Avec le développement exponentiel de Suntech et l'apparition de deux nouveaux entrants dans le « Top 10 » en 2007, la Chine se positionne indubitablement sur le secteur de la fabrication de modules, fortement orienté à l'exportation. En 2009, les fabricants chinois se livrent à une guerre des prix féroce et difficile à soutenir par l'ensemble des acteurs non-chinois. A cela s'ajoute un positionnement sur l'amont de la chaîne de la valeur silicium : extraction dans des mines de quartz, production de silicium de qualité métallurgique, raffinage de silicium. On aurait tort de croire que les Chinois se positionnent uniquement sur des segments à faible contenu technologique :

- la qualité de leur silicium métallurgique est parmi les meilleures en termes de pureté ;
- leur capacité à raffiner le silicium à des degrés de pureté élevés dans des usines chimiques complexes (procédé Siemens par la voie du trichlorosilane) est démontrée, alors que de nombreux projets de même nature sont à la peine ailleurs qu'en Chine ;
- des fabricants, comme Suntech ou Yingli, se positionnent sur des modules à forte efficacité, utilisant les meilleures technologies, parfois sous licences d'Instituts européens.

Une des grandes questions concerne la taille du marché intérieur chinois. C'est elle qui déterminera le degré d'agressivité à l'export de l'industrie chinoise.

Et la France ?

Leader du secteur dans les années 1990, en particulier pour le développement du solaire isolé dans les DOM, la France a été reléguée en queue de classement dans les années 2000 lorsque le Japon et l'Allemagne ont développé le marché des centrales raccordées au réseau. Le secteur redémarre vigoureusement, avec, notamment :

- la constitution d'un cadre économique et réglementaire favorable, provoquant un développement des centrales au sol comme des centrales en toiture ;
- le démarrage d'un Institut de recherche de l'énergie solaire concentrant les moyens sur le modèle du *Fraunhofer* allemand ;

- le lancement d'une initiative industrielle, Alliance PV, destinée à développer des technologies silicium à très haut rendement (initiative soutenue par les pouvoirs publics, qui regroupe le fabricant français de cellules silicium Photowatt, le CEA et EDF Energies Nouvelles) ;

- le démarrage d'une filière « films minces », avec notamment le lancement récent d'un projet d'usine de fabrication de « films minces » par First Solar, le lancement d'une *start-up* positionnée sur le « film mince » CIGS (Nexcis), d'autres projets étant susceptibles de suivre.

Les acteurs des pays étrangers ne s'y trompent pas : la France fait l'objet de toutes les attentions en termes de développement de projets et de positionnement de capacités de fabrication.

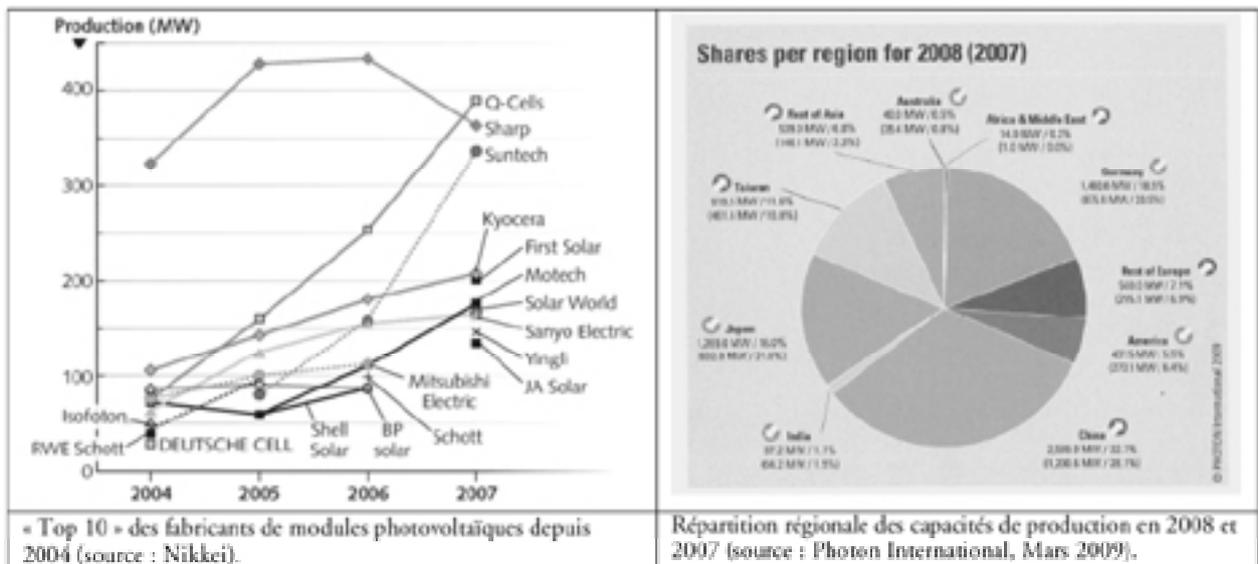
CONCLUSION

Etats-Unis, Japon, Allemagne, Chine : il est frappant de constater que la carte des puissances industrielles et politiques majeures coïncide pratiquement avec la carte des Etats ayant lancé, d'une façon ou d'une autre, la mise en place d'un secteur photovoltaïque puissant. En ce sens, la maîtrise des technologies photovoltaïques revêt une dimension stratégique.

Si on se place au niveau mondial, les défis industriels nous semblent presque derrière nous : il existe désormais un secteur puissant, qui génère des volumes, des investissements de R&D, des baisses de coûts, ces dernières étant amplifiées par la crise actuelle.

A un niveau plus local cependant, le secteur est très vraisemblablement à la veille d'une consolidation industrielle, qui ne serait d'ailleurs pas vraiment nouvelle : le graphique 7, constituant l'historique des « Tops 10 » sur la période 2004–2007, montre des mouvements qui se sont poursuivis en 2008. A cette consolidation industrielle se superpose une rivalité entre pays pour maîtriser, sur leur sol, les technologies photovoltaïques. De ce point de vue, les pouvoirs publics français ont clairement annoncé leur intention (en s'en donnant les moyens) de participer à cette bataille. La question n'est donc plus vraiment l'avènement, ou non, d'un secteur photovoltaïque puissant, mais bien, plutôt, l'identité des acteurs et des pays qui remporteront la mise industrielle.

Derrière ces défis industriels et technologiques en cours, se profilent immédiatement d'autres défis. Devrait être le plus immédiat celui de l'intégration de quantités massives d'électricité photovoltaïque dans les réseaux de distribution publique à des niveaux de tension jusqu'à présent conçus pour n'accueillir que des récepteurs électriques, et non des générateurs. L'intermittence de la production photovoltaïque et son caractère très diffus amplifient le problème. Dans les îles françaises (DOM–TOM et Corse), il devient indispensable d'y remédier à un horizon rapproché si l'on



Graphique 7.

veut atteindre des taux élevés de pénétration des énergies renouvelables dans le mix énergétique insulaire. Les solutions pour y parvenir sont connues au niveau des concepts : il faudra les mettre en œuvre à un rythme accéléré par rapport aux expérimentations relativement ponctuelles que l'on connaît aujourd'hui : meilleure prévision/gestion de l'équilibre offre-demande à un niveau plus fin que le niveau actuel, gestion de la charge chez le consommateur au moyen de signaux de prix en temps réel, renforcement de moyens de stockage. Sur ce dernier point, l'appel d'offre récent pour des centrales photovoltaïques dans les îles, équipées de stockage, constitue un pas dans la bonne direction.

Toutes ces dispositions requièrent des échanges beaucoup plus importants qu'actuellement de volumes d'informations en parallèle des réseaux électriques de distribution publique, relevant du concept de *smart grid* (réseau intelligent). Elles demandent également, chez les consommateurs d'électricité, des équipements de comptage et des actionneurs beaucoup plus sophistiqués que les équipements actuels. La répartition des activités industrielles et commerciales qui en résulte entre les secteurs régulés de distribution publique et les acteurs de service relevant de la concurrence, n'est pas encore claire. De même, le financement et la rémunération des services associés constituent un autre défi.