

## Quelle politique industrielle en matière d'électricité solaire photovoltaïque ?

Par Fabrice DAMBRINE\*

La production d'électricité photovoltaïque a connu une très forte expansion au cours de la dernière décennie, notamment en Europe et, en son sein, plus particulièrement en Allemagne et en Italie, sous la double impulsion de tarifs de rachat avantageux et d'une baisse régulière du prix des modules. Cette croissance est appelée à se poursuivre, en particulier dans les pays à fort ensoleillement et dans les zones mal interconnectées, et là où la production est maximale lors des pics de demande liés à l'utilisation de la climatisation. Mais cette croissance va également se poursuivre dans les pays industrialisés qui souhaitent rééquilibrer leur mix énergétique et s'affranchir d'une trop grande dépendance vis-à-vis des énergies fossiles et nucléaire. En 2011, près de 30 GWc de solaire photovoltaïque ont été installés dans le monde, pour une puissance totale installée (fin 2011) de près de 70 GWc, laquelle pourrait atteindre 300 GWc en 2020. Se pose donc la question du développement des industries aptes à répondre à cette demande.

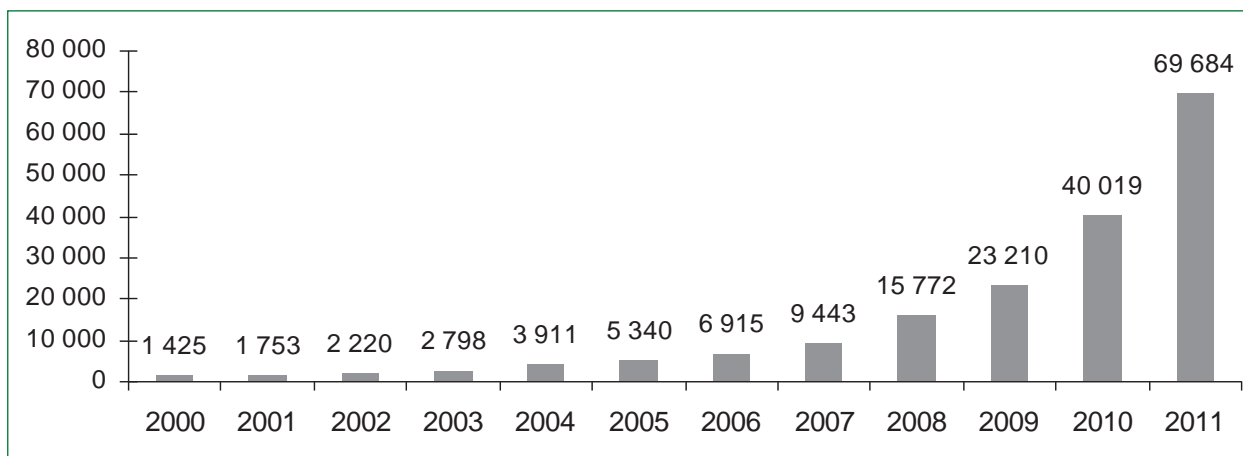


Schéma 1 : Puissance mondiale installée cumulée (MW).

Source : EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016, May 2012.

### Un développement rapide du photovoltaïque en Europe directement lié à un fort soutien de la demande au travers de tarifs de rachat avantageux

En dehors de quelques zones très particulières (zones isolées, ensoleillées et mal interconnectées), le prix de revient du kWh photovoltaïque (indépendamment du surcoût lié à son intermittence et à son imprévisibilité, traité

par ailleurs dans ce numéro des Annales des Mines) n'est pas encore compétitif par rapport au prix du kWh de réseau produit par les moyens traditionnels (centrales thermiques à flamme ou nucléaires, ou hydroélectriques). Son développement rapide a donc été tiré par des tarifs de rachat garantis, d'un montant plusieurs fois supérieur à la valeur réseau actuelle du kWh. Comme ces tarifs de rachat représentent un coût pour la collectivité et le consommateur d'électricité (en France, le surcoût des énergies renouve-

### Puissance photovoltaïque installée et production électrique : de grands écarts suivant les zones géographiques et climatiques

La quantité d'énergie électrique fournie par un panneau photovoltaïque va d'abord dépendre de sa puissance nominale exprimée en Watt-crête (Wc), ou Watt-pic (Wp), correspondant à la puissance fournie lorsque le panneau reçoit un rayonnement solaire perpendiculaire d'environ 1 kW/m<sup>2</sup>. Mais la production réelle de celui-ci va varier en continu en fonction des heures de la journée, et donc du degré d'incidence des rayons solaires et de l'épaisseur de l'atmosphère, de la latitude du lieu, de l'orientation et de l'inclinaison du panneau (imposée par exemple par l'orientation et la pente du toit, lorsqu'il s'agit de capteurs installés sur des toitures) ou encore de l'ensoleillement du lieu.

Pour évaluer la production électrique annuelle d'un panneau photovoltaïque, on utilise la notion d'heures équivalent puissance de crête (h eq. Pc), laquelle va donc dépendre du lieu d'installation du panneau. La production électrique annuelle moyenne sera donc le produit de la puissance de crête par le nombre d'heures équivalent puissance de crête. Typiquement, en France métropolitaine, on retient un coefficient moyen d'environ 1 000 h eq. Pc/an. Ainsi, une toiture équipée de 30 m<sup>2</sup> de panneaux ayant une puissance de crête d'environ 100 W/m<sup>2</sup> pourra, en moyenne, produire 3 000 kWh/an.

	Hambourg	Lille	Paris	Marseille	Madrid
h eq. Pc	850	880	950	1 350	1 410

Source : Union européenne.

Dans les zones très ensoleillées (la Californie, par exemple), on peut atteindre (voire dépasser) les 2 000 h eq. Pc.

En supposant que l'investissement et les coûts de maintenance d'une installation photovoltaïque soient sensiblement les mêmes partout, on constate alors que le coût de production d'un kWh photovoltaïque sera deux fois moindre dans une zone où l'ensoleillement est double.

lables est financé par une taxe additionnelle sur la consommation d'électricité dite Contribution au service public de l'électricité (CSPE), ils varient souvent dans des proportions

importantes, soumettant le développement du photovoltaïque à des à-coups préjudiciables à l'essor de filières industrielles qui soient stables.

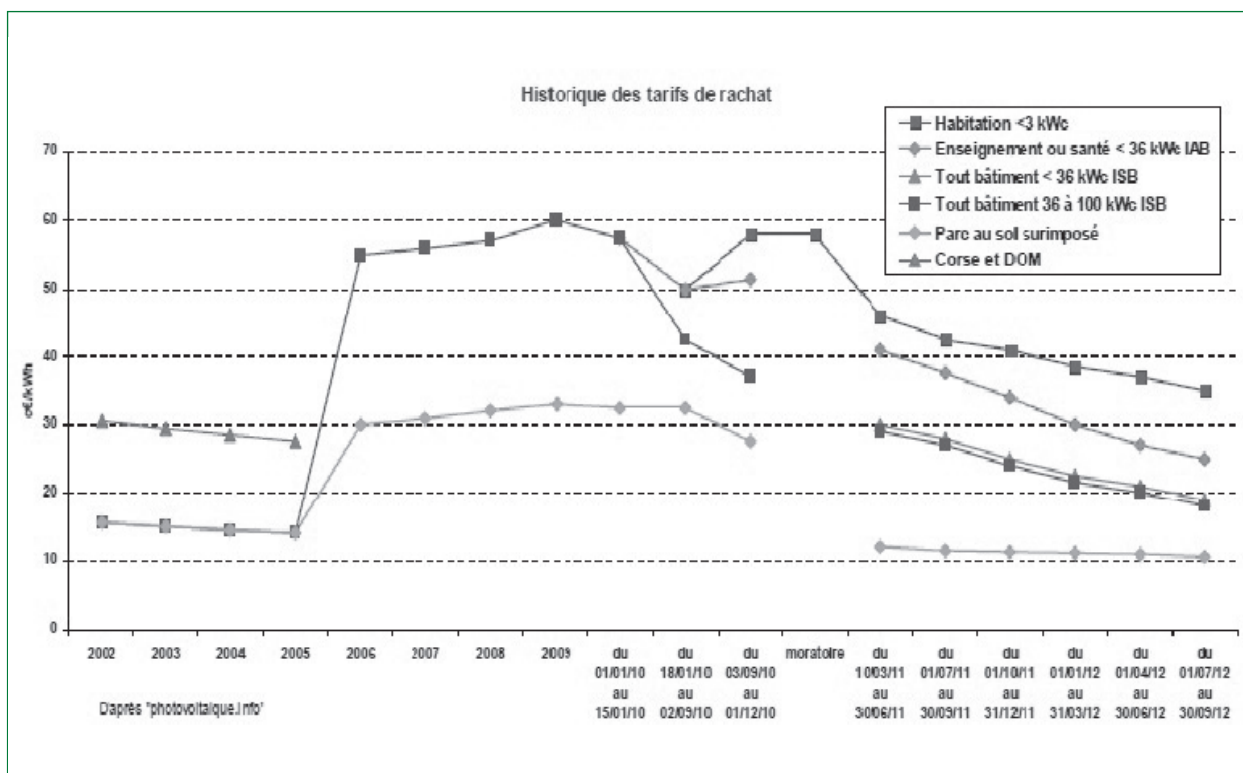


Schéma 2 : Historique des tarifs d'achat.

Le développement de l'électricité photovoltaïque est également tiré par une baisse rapide et régulière du coût des panneaux. Le coût de l'installation d'un panneau de toiture est par exemple passé de 5,3 euros du watt-crête (€/Wc) en 2007 à 1,7 €/Wc aujourd'hui. Le coût de production de l'électricité photovoltaïque est désormais proche, voire inférieur, au prix moyen de l'électricité délivrée à l'uti-

lisateur (la « parité réseau ») au-dessous du 42<sup>e</sup> parallèle, ouvrant ainsi au photovoltaïque de vastes marchés dans les zones considérées.

À l'intérieur de l'Europe, les marchés allemand et italien sont les deux marchés dominants, l'Allemagne et l'Italie représentant à elles seules plus de la moitié de la puissance installée mondiale, quand la France n'en représente que 4 %.

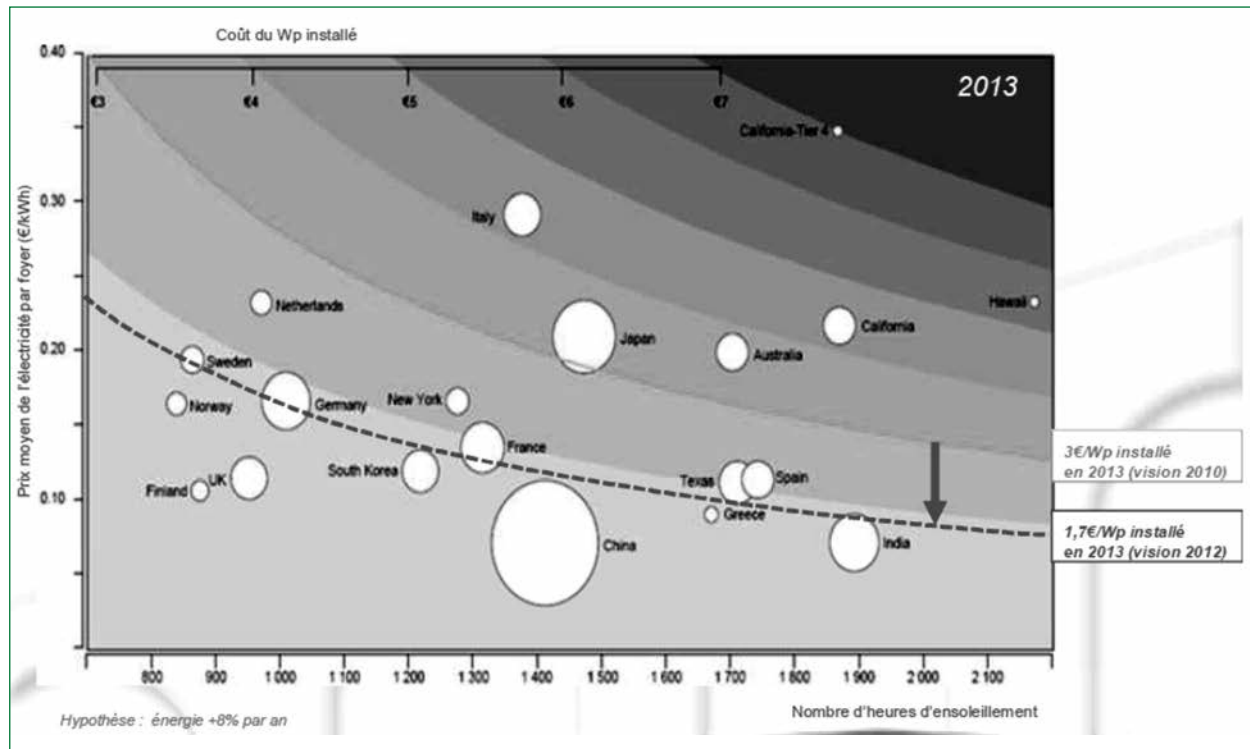


Schéma 3

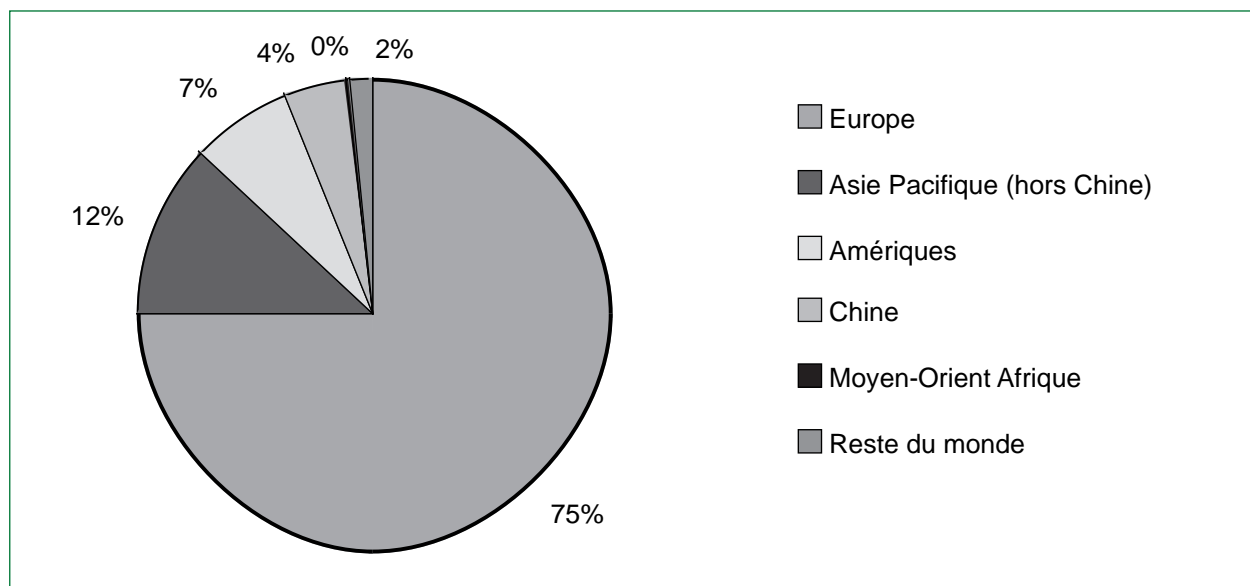


Schéma 4 : Répartition de la puissance photovoltaïque installée fin 2011 (principalement européenne avec 75 %).  
Source : EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016, May 2012.

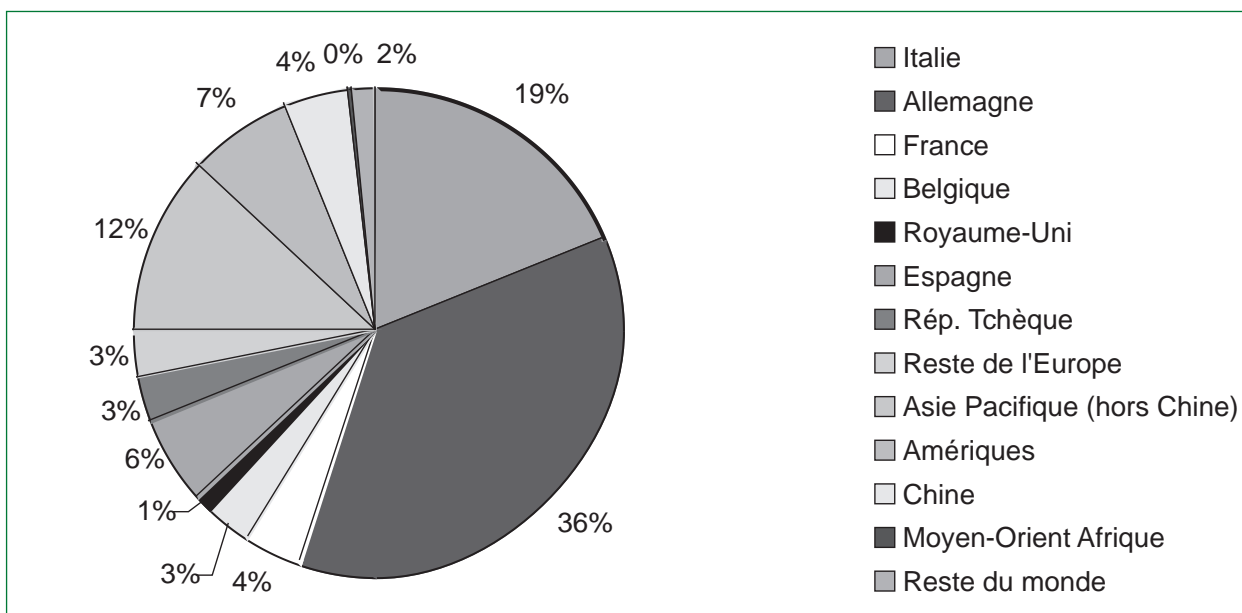


Schéma 5 : Répartition de la puissance photovoltaïque installée fin 2011 (L'Italie et l'Allemagne représentant respectivement 19 % et 36 %). Source : EPIA, Global Market Outlook for Photovoltaics until 2016, May 2012.

### La chaîne de fabrication et d'installation des panneaux photovoltaïques

#### La fabrication des cellules photovoltaïques

Cette phase du processus de production commence par la production d'un silicium de qualité photovoltaïque, c'est-à-dire obtenu par raffinage pour en éliminer les impuretés ; cette production est aujourd'hui quasi exclusivement réalisée en Asie (principalement en Chine), même s'il reste quelques unités de production en Allemagne. La transformation du silicium en cellules (wafers et plaquettes) est un processus très automatisé qui emprunte différents procédés issus des filières de la microélectronique (notamment des écrans plats). On aboutit progressivement à une « commodité » (1) absolue qui a vocation dans la durée à être produite, pour l'essentiel, dans des pays à bas coûts de main-d'œuvre, et où, surtout, un très fort endettement est possible (voir *infra*).

#### La fabrication des modules (ou panneaux) photovoltaïques

Il s'agit d'un assemblage de cellules photovoltaïques reliées électriquement entre elles et encapsulées dans différents types de matériaux (interconnexion électrique sur un support) ; leur dimension unitaire est d'environ 1 m<sup>2</sup> pour les panneaux destinés aux installations domestiques.

#### La conception et la fabrication des équipements électriques de raccordement au réseau électrique

Ces unités périphériques, regroupées sous le terme de BOS (*Balance of System*), comprennent :

- ✓ les onduleurs, qui servent à transformer le courant continu produit par les cellules en courant alternatif compatible avec celui du réseau de distribution,

- ✓ les systèmes de contrôle et de commande permettant un fonctionnement et une gestion des équipements qui sont modulables en fonction des usages, des comportements des usagers et des saisons,
- ✓ les éléments de sécurité (protection des biens et des personnes),
- ✓ des systèmes de pointage qui permettent de suivre la trajectoire du soleil (*trackers*), dans le cas du solaire à concentration,
- ✓ les systèmes de suivi de la production des installations et de détection des pannes,
- ✓ enfin, l'installation des modules (sur des toits ou équipant des fermes photovoltaïques). On notera à cet égard qu'une installation en toiture reste deux fois et demi plus chère en France qu'en Allemagne, en raison de la réglementation et d'une organisation du travail plus efficace en Allemagne, avec notamment des réseaux de grossistes et d'installateurs mieux structurés.

Aujourd'hui, la chaîne de valeur est essentiellement concentrée sur l'amont : environ 50 % pour la production des panneaux et 20 % pour le BOS, l'installation ne représentant, quant à elle, que 30 %. Avec un prix de revient des panneaux installés de 1,7 €/Wc, on peut espérer obtenir en France métropolitaine (avec un ensoleillement moyen de 1 000 heures/an) un MWh électrique (hors coût de l'intermittence) avoisinant les 145 € (2) (à comparer à un prix de gros d'environ 50 €).

### La production des modules photovoltaïques : une domination écrasante de l'Asie et, plus particulièrement, de la Chine

L'activité manufacturière essentielle dans la réalisation d'une installation solaire est la production des modules qui regroupent des cellules photovoltaïques. Ces modules sont ensuite assemblés dans des panneaux par les monteurs et

les installateurs (voir *supra*). La technologie principale de fabrication est celle dite du silicium cristallin, qui concerne aujourd'hui plus de 80 % du marché. C'est notamment celle adoptée par Photowatt, désormais une filiale d'EDF Energies Nouvelles. L'autre technologie significative est celle des couches minces, dans laquelle Saint-Gobain est présente au travers de son usine de Torgau (en Allemagne).

Si la puissance photovoltaïque installée est encore largement européenne, la production de modules se fait désormais essentiellement en Asie, comme l'illustre le schéma 6 ci-dessous.

Presque tous les principaux fabricants du marché sont des entreprises chinoises ou des entreprises assurant en Chine l'essentiel de leur production, comme le montre le tableau 1.

Ces entreprises ont considérablement investi en 2010 et en 2011. En trois ans, les immobilisations corporelles nettes de Suntech, de First Solar et de Yingli Solar ont doublé, voire triplé. En dépit de la croissance du marché de l'installation de centrales solaires, les prix observés des modules ont décliné.

Il est à noter qu'il semble que cette baisse de prix ne résulte pas seulement d'une surcapacité de production (de l'ordre de 30 à 50 %), mais aussi d'une pratique chinoise de *dumping* permettant d'ores et déjà de vendre des panneaux à moins de 1 €/Wc, une pratique contre laquelle une plainte a été déposée en juillet 2012 auprès de la Commission européenne à l'initiative de l'allemand Solarworld.

Des investissements ambitieux et la baisse des prix ont profondément affecté la rentabilité des fabricants du secteur, qui ont vu se dégrader leur ratio d'endettement sur fonds propres, dont l'évolution est retracée ci-dessous (avec l'ajout de deux entreprises allemandes, Solarworld et Q-cells). La destruction des fonds propres enregistrée par Q-cells a d'ailleurs contraint cette entreprise à se placer en redressement judiciaire en 2012. Elle a été acquise en août 2012 par le coréen Hanwha.

Plusieurs dépôts de bilans ou fermetures d'usines sont intervenus depuis la fin de l'année dernière en Allemagne, aux Etats-Unis et en France. En plus de Q-cells, les entreprises allemandes Sovello, Solar Hybrid et Solon Energy ont déposé leur bilan. L'américain First Solar a annoncé la fer-

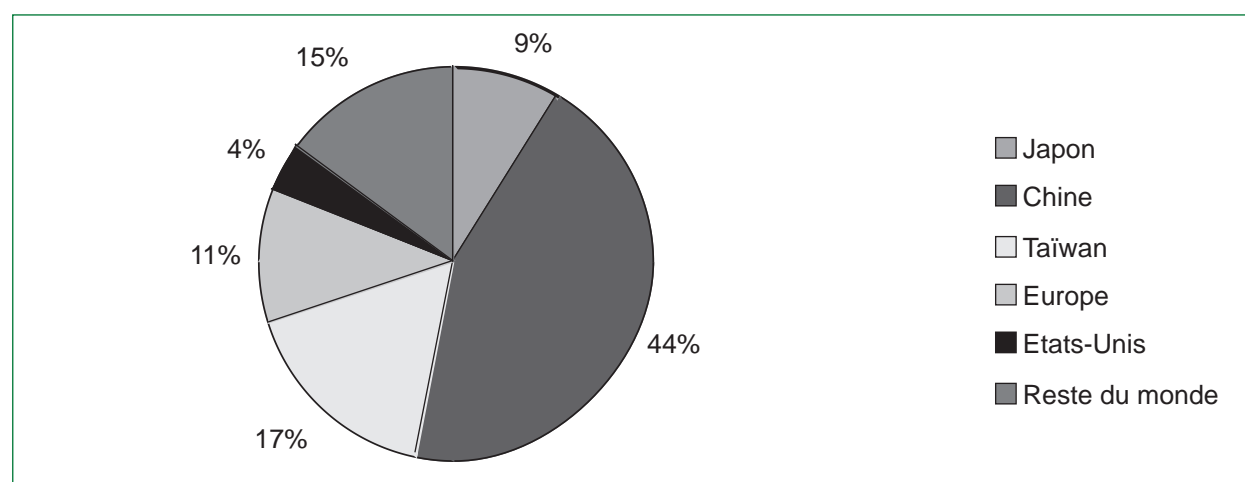


Schéma 6 : Production de modules photovoltaïques en 2011 (La part de la Chine représentant 44 % et celle de l'Europe 11 %).  
Source : European Commission, JRC, PHOTOVOLTAÏQUE Status Report, 2011.

Entreprises	Technologie employée	Principaux pays de production	Production 2011 (en MWc)	Chiffre d'affaires 2011 (en MUS\$)	Part du marché mondial 2011 (exprimée en MWc)
Suntech	Silicium cristallin	Chine	2 220	3 147	7 %
First Solar	Couches minces	USA/Allem./Malaisie	1 981	2 766	7 %
JA Solar	Silicium cristallin	Chine/USA/Allem.	1 690	1 706	6 %
Yingli Solar	Silicium cristallin	Chine	1 604	2 332	5 %
Trina Solar	Silicium cristallin	Chine	1 550	2 048	5 %
Motech Solar	Silicium cristallin	Taïwan/Chine	1 100		4 %
Canadian Solar	Silicium cristallin	Chine	1 010	1 899	3 %
<b>Total du marché</b>			<b>29 665</b>		

Tableau 1

Source : Eolien et photovoltaïque : enjeux énergétiques, industriels et sociétaux - Rapport CGEJET-CGEDD - septembre 2012.

meture de son usine allemande de Francfort sur l'Oder et les américains Solyndra, Evergreen et Spectrawatt se sont déclarés en faillite. Photowatt a été placé à la fin de 2011 en redressement judiciaire, avant d'être repris par EDF-EN.

Des ratios d'endettement voisins de 100 % sont difficilement acceptables pour des prêteurs ou des investisseurs obligataires occidentaux, pour ce type d'entreprise dans les conditions de marché actuelles. Des petits fabricants chinois ferment eux aussi. Le marché est entré dans une phase de restructuration avec des fermetures de capacités qui peuvent favoriser la domination des grandes entreprises chinoises, si ces dernières sont en mesure de maintenir pour un certain temps encore un ratio d'endettement élevé.

C'est en effet leur capacité d'endettement qui apparaît être le principal avantage compétitif dont les fabricants chinois du secteur disposent par rapport à leurs concurrents occidentaux. En effet, la plupart des entreprises chinoises du secteur enregistrent des pertes d'exploitation et leur ratio de chiffre d'affaires/employés est moins bon que celui des principaux acteurs occidentaux, comme le montre le tableau 2 ci-dessous.

Année 2011	Chiffre d'affaires / employés (en US\$)
Suntech	157 350
First Solar	425 538
Yingli Solar	145 750
Trina Solar	142 569
Canadian Solar	211 000
Solar World AG	253 576

Tableau 2.

Ce ne sont pas non plus les taux d'intérêt payés par les entreprises chinoises qui paraissent anormaux (4,48 % pour l'endettement à court terme de Suntech en 2011), mais c'est surtout leur capacité à lever de la dette à court terme auprès d'institutionnels chinois qui leur permettra de continuer à supporter des pertes opérationnelles en attendant une amélioration du marché.

### La situation des entreprises françaises : une chaîne de valeur concentrée sur l'aval (ingénierie, installation, exploitation, maintenance)

Le moratoire de décembre 2010 sur les tarifs de rachat de l'électricité photovoltaïque a pesé sur l'aval de la filière en France, tandis que la pression à la baisse sur les prix des modules pesait sur l'amont. De 24 000 emplois en 2010, la filière est passée à 18 800 emplois (en équivalents temps plein – ETP) en 2011, qui se répartissent en 17 800 ETP pour l'investissement et 1 000 ETP pour l'exploitation-maintenance. Les entreprises françaises du photovoltaïque sont désormais très concentrées sur l'ingénierie et l'installation, en aval de la fabrication des panneaux photovoltaïques. 80 % des 17 800 emplois de la partie investissement de la filière sont présents sur ce segment, alors que celui-ci ne représente que 43 % de la valeur ajoutée de l'investissement (voir le schéma 7 ci-dessous).

Le marché de l'investissement photovoltaïque français a représenté en 2011 plus de 3 milliards d'euros, dont la moitié représentait une valeur ajoutée française, celle-ci étant plus importante chez les particuliers, du fait du plus grand poids de la filière de l'installation dans ce sous-segment (voir le tableau 3 ci-après).

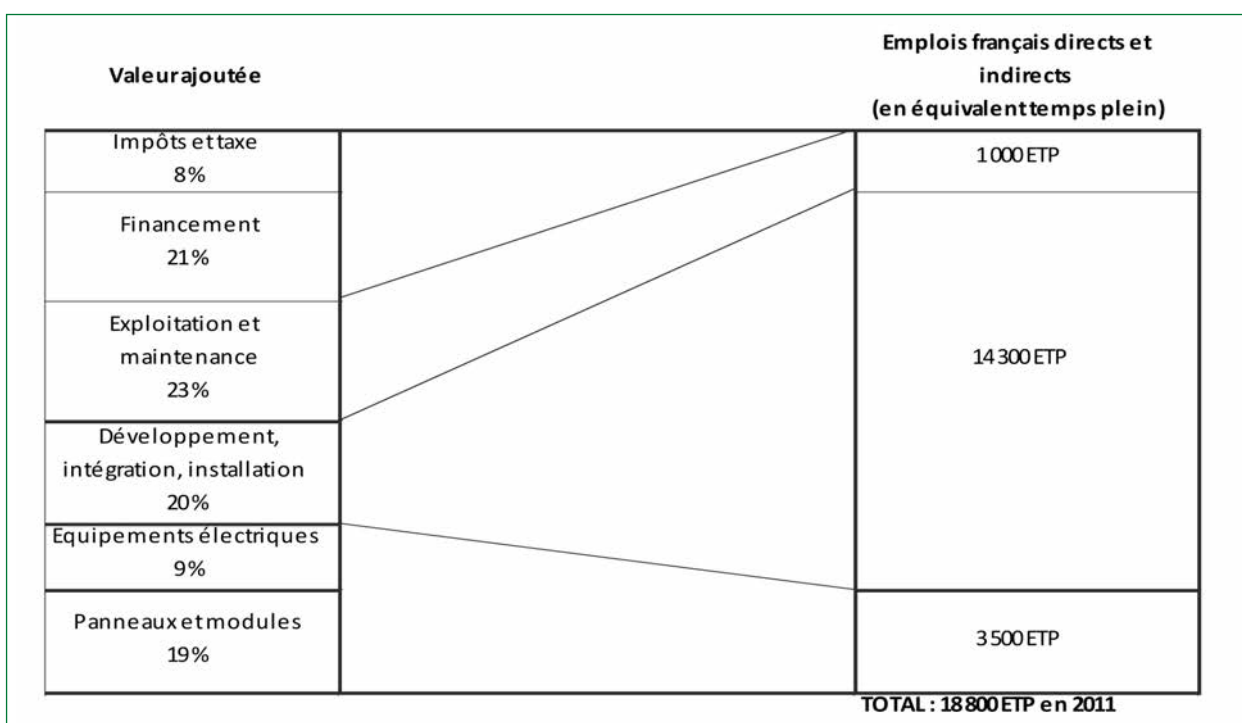


Schéma 7 : Production photovoltaïque en France - Décomposition de la valeur ajoutée et des emplois.

Année 2011	Investissements (M€)	Valeur ajoutée française (M€)	Part de valeur ajoutée française	Emplois (ETP)
Domestique	1 387	827	60 %	9 100
Professionnel	970	421	43 %	3 200
Centrales au sol	756	335	44 %	6 500
<b>TOTAL</b>	<b>3 113</b>	<b>1 583</b>	<b>51 %</b>	<b>18 800</b>

**Tableau 3** : Investissement photovoltaïque en France et emplois.

Sources : BIPE, Contribution du BIPE au Livre Blanc du SER, filières photovoltaïque, éolienne et biomasse, janvier 2012, contribution de Schneider Electric.

### **Des aides publiques particulièrement élevées, au regard du nombre des emplois créés en France**

Le Syndicat des énergies renouvelables (SER) prévoit dans le photovoltaïque français en 2020, des emplois directs et indirects estimés à 56 200 ETP et un total de 74 000 ETP si l'on inclut les emplois induits. Ces estimations en termes d'emplois correspondent à des prévisions tablant sur une puissance installée de 20 000 MW en 2020, soit à un niveau très supérieur aux 7 800 MW prévus par les pouvoirs publics à ce même horizon (et à rapprocher des 2 650 MW installés fin 2011). Il faudrait donc, pour parvenir à ces 20 000 MW, une aide financière très supérieure aux 2,8 Mds d'euros de CSPE (3) prévus par la direction générale de l'Énergie et du Climat (ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie) pour le photovoltaïque, en 2020. Or, même si l'on rapporte les 7 800 MW annoncés par la CSPE aux prévisions d'emplois ambitieuses du SER et même si l'on intègre dans ces emplois les emplois induits, le ratio d'aide publique par emploi ressort à 37 540 € par emploi et par an.

### **Passer d'un soutien de la demande à un soutien de l'offre**

Le principe des tarifs de rachat permet un essor rapide de techniques non encore rentables. Ils ont donc une certaine logique qui, dans le cas du photovoltaïque, est de développer la production d'électricité solaire, ce qui peut être un but en soi.

En revanche, en termes de politique industrielle, les tarifs de rachat ont un effet pervers, celui d'ouvrir un guichet à la « demande », empêchant tout pilotage du développement de

la filière et tout contrôle de la charge financière induite pour la collectivité. En effet, s'il est toujours théoriquement possible de réviser les tarifs en fonction du développement des nouvelles installations, l'ajustement de ces tarifs s'opère généralement « en retard » par rapport à la baisse tendancielle des coûts d'investissements. Cela a été particulièrement vrai avec le photovoltaïque, ce qui a entraîné des effets d'aubaine incontrôlés et la bulle de 2010 débouchant sur un moratoire (lequel a permis de rétablir un certain équilibre). S'il n'y a pas une industrie prête à répondre à cette nouvelle demande, ce sera également la porte ouverte aux importations de matériels, comme on l'a vu avec le développement des installations photovoltaïques, qui, en dehors de la partie installation, a été assuré pour la quasi totalité par des importations, de sorte que la balance commerciale du photovoltaïque français est au final nettement déficitaire (voir le tableau 4 ci-dessous) : en 2011, 1,35 Md d'euros de déficit de commerce extérieur, pour un investissement total d'environ 3,11 Mds d'euros.

Cette situation n'est cependant pas propre à la France. Dans un premier temps, des tarifs de rachat devenus rapidement trop élevés au regard de la baisse des coûts d'investissement ont provoqué un emballement du secteur attirant, non seulement des industriels, mais aussi et surtout des investisseurs financiers dépourvus de vision de long terme. Dans un deuxième temps, les gouvernements ont dû baisser rapidement les tarifs de rachat pour freiner l'emballement du marché et contenir les dépenses publiques (l'Espagne en 2008, la France en 2010 et l'Allemagne en 2012), ce qui a déstabilisé le secteur et ce qui n'est pas compatible avec une politique industrielle qui a besoin d'une visibilité à moyen et long terme.

Pour toutes ces raisons, il est urgent de revenir à un soutien de l'offre pour permettre à nos industriels de réinvestir

Année 2011 en M€	Marché domestique : importations	Marché export : exportations nettes des importations
Domestique	560	81
Professionnel	549	56
Centrales au sol	421	43
<b>TOTAL</b>	<b>1 530</b>	<b>180</b>
<b>Solde négatif 2011</b>	<b>1 350 MEuros</b>	

**Tableau 4** : Balance commerciale du photovoltaïque français en 2011.

Source : Eolien et photovoltaïque : enjeux énergétiques, industriels et sociétaux - Rapport CGEIIET-CGEDD - septembre 2012.

l'amont (la fabrication des cellules et des panneaux), qui concentre l'essentiel de la valeur ajoutée. S'il est sans doute trop tard pour reconquérir la filière silicium compte tenu de l'écrasante avance asiatique, d'autres filières prometteuses, notamment celles des couches minces CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium), méritent être explorées (4). Mis à part la fabrication des cellules et des panneaux, les industriels européens restent bien placés dans les techniques d'intégration et de connexion aux réseaux électriques (Schneider, Siemens, etc.). Des recherches méritent également d'être conduites dans le stockage de l'électricité, seul moyen, pour les énergies intermittentes, de conquérir une part significative du mix électrique.

Pour ce faire, plusieurs voies complémentaires sont possibles : soutien à la R&D, abandon des tarifs de rachat au profit d'appels d'offres permettant de mieux piloter les développements industriels et de mieux contrôler la dépense publique. Il serait également souhaitable de créer des barrières hors coût, comme le fait par exemple le Japon : normalisation et homologation des panneaux (notamment de la performance dans la durée), garantie de performance minimale couverte par une assurance imposée aux fournisseurs de panneaux, tarifs de rachat plus élevés pour l'électricité produite plus élevés grâce à des panneaux fabriqués dans l'Union européenne, etc. Ce sont des voies recommandées par le récent rapport commun CGEJET-CGEDD (Conseil général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies - Conseil général de l'Environnement et du Développement durable) sur les filières éolienne et photovoltaïque.

### Conclusion

La production d'électricité photovoltaïque, dont les coûts qui ont fortement baissé pourraient être bientôt compétitifs avec ceux des autres sources d'électricité (hors coût de l'intermittence), est appelée à croître et à représenter une part importante du mix énergétique mondial d'ici une vingtaine d'années, notamment dans les pays à fort ensoleillement et où les réseaux électriques sont peu développés. Le récent développement incontrôlé des instal-

lations photovoltaïques en Europe sous l'effet de tarifs de rachat excessivement avantageux, qui ont été suivis par contrecoup de baisses brutales pour endiguer la dérive des subventions publiques, a surtout profité aux importations asiatiques (notamment chinoises) et a, de fait, profondément déstabilisé le secteur. Le moment est venu de définir une véritable politique industrielle aux niveaux français et européen pour développer de nouvelles techniques innovantes et prometteuses (comme les couches minces et le stockage de l'électricité) et de renforcer le poids des industriels européens dans certaines technologies clés des systèmes de contrôle des unités photovoltaïques (onduleurs, *smart grids*, etc.). Cela suppose d'abandonner rapidement le principe des tarifs de rachat au profit d'un soutien à la R&D et de procédures d'appels d'offres orientés vers le développement d'une nouvelle filière industrielle structurée. Une décision allant en ce sens et s'accompagnant d'un signal politique fort doit être prise sans tarder. Faute de quoi, les ambitions chinoises condamneront définitivement les espoirs européens.

### Notes

\* Ingénieur général des Mines, Président de la section Innovation, compétitivité et modernisation du Conseil général de l'Économie, de l'Industrie, de l'Énergie et des Technologies (CGEJET), ministère de l'Économie et des Finances et ministère du Redressement productif.

(1) Au sens du terme anglais *commodity*.

(2) Hypothèses : Coût de l'installation : 1,7 €/Wc – Durée de vie de l'installation : 30 ans – Coûts de maintenance : 2 % – Taux d'actualisation : 5 % – Ensoleillement équivalent puissance de crête : 1 000 h/an.

(3) Sans prendre en compte les autres aides au développement du photovoltaïque qui peuvent exister par ailleurs (les aides régionales, par exemple).

(4) D'autres technologies à couches minces se sont révélées décevantes (comme le silicium amorphe, qui peine à devenir compétitif) ou posent des problèmes d'environnement (comme les cellules au tellure de cadmium, qui sont interdites sur les toitures, en Europe, en raison de la toxicité du cadmium).