

# Du *low cost* à la *high-tech* : des marges de progrès techniques possibles pour le photovoltaïque

Le développement du photovoltaïque répond à une triple nécessité : la préservation de l'environnement, la sécurité énergétique et, enfin, la croissance économique.

par Jean-François GUILLEMOLES\*

La prise de conscience des dégâts causés par notre mode actuel de développement, qui n'est plus soutenable depuis les années 1990, comme le montre l'analyse de l'empreinte écologique des activités humaines (1), et la nécessité de poursuivre, néanmoins, le développement (2 milliard d'humains sont encore privés d'accès à l'électricité) : les besoins, qui sont considérables, mettent le modèle actuel sous contrainte. Par ailleurs, les tensions autour de l'accès à l'énergie s'accroissent : la sécurisation de l'approvisionnement énergétique s'impose. Enfin, la crise actuelle représente également une opportunité économique.

Face à ces défis, il convient de se projeter à l'échelle du térawatt (TW) pour fixer un ordre de grandeur des besoins de génération d'énergie. Le solaire, et en particulier le photovoltaïque, peut-il être à la hauteur ? Ce n'est pas, en l'occurrence, une question de disponibilité de la ressource, du moins en ce qui concerne la ressource solaire (en une heure, le soleil envoie, en effet, sur la terre une quantité d'énergie équivalant à l'électricité consommée en une année par toute l'humanité) ; il s'agit, en premier lieu, de déploiement industriel, et ensuite, (à la rigueur, à terme) de la disponibilité de certaines matières premières et de terrains utilisables. Un développement soutenable du photovoltaïque passe

donc par une bonne utilisation des ressources (matières premières, énergie, mais aussi, capital), c'est-à-dire non seulement par une efficacité accrue de la transformation de ressources primaires en générateurs photovoltaïques, mais aussi par l'efficacité accrue des convertisseurs photovoltaïques eux-mêmes, dans la transformation de la lumière en électricité.

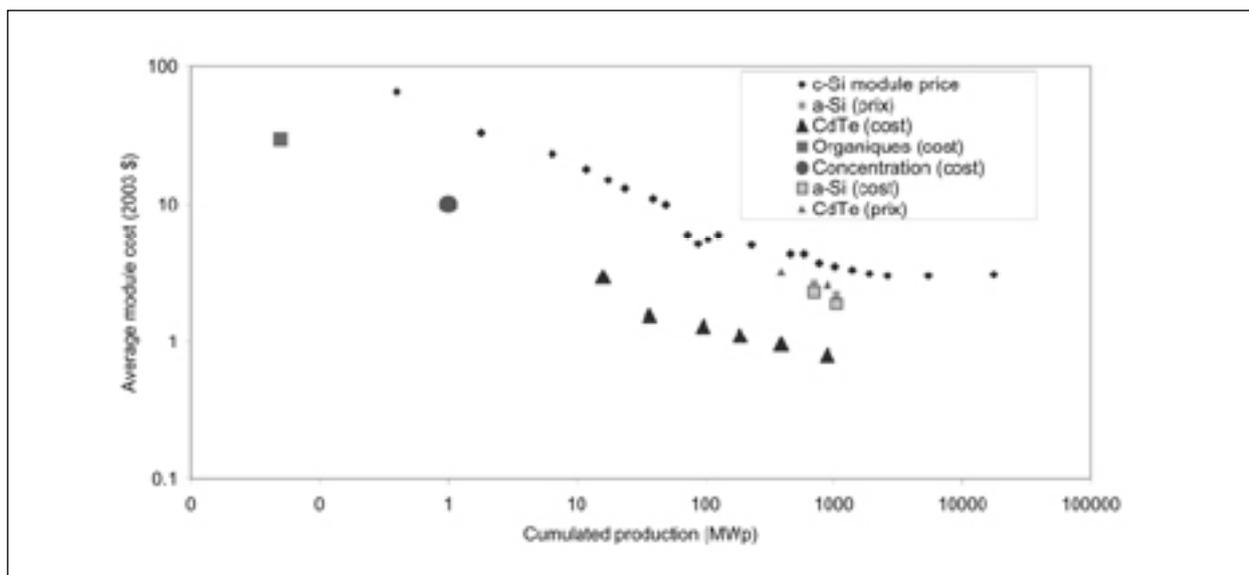
L'autre point important est le fait que le changement d'échelle prévisible de la filière photovoltaïque pose la question de son déploiement industriel à grande échelle, lequel dépend de la disponibilité des technologies et des savoir-faire, des coûts d'investissement et de la disponibilité des capitaux, des matières premières, de la rapidité de mise en œuvre, du rythme de production des cellules...

La disponibilité des équipements et des savoir-faire pour la filière (dominante) du silicium cristallin (voir l'article de M. Pâris Mouratoglou, dans ce numéro), ne pose pas de problème, de nombreux industriels proposant déjà

---

\* Directeur de recherche au CNRS et directeur adjoint à la Recherche de l'Institut de R&D de l'Énergie Photovoltaïque (IRDEP), Unité Mixte de Recherche CNRS-EDF-Paristech.

(1) [http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/world\\_footprint/](http://www.footprintnetwork.org/en/index.php/GFN/page/world_footprint/)



**Figure 1 :** Courbes d'apprentissage des différentes technologies photovoltaïques.

Les losanges représentent les prix moyens constatés sur le marché (en dollars – valeur 2003, source NREL, *Photon International*). Le coût de production est environ de 10 à 20 % inférieur au prix, sauf pour la filière au tellure de cadmium (CdTe), qui réalise, du fait de ses coûts de production très bas, une marge très importante, tout en restant au-dessous du prix du marché. La technologie CdTe a une courbe d'apprentissage, récente, mais basée sur une seule compagnie (données First Solar), celle-ci est exprimée en coût de production (la marge, pour cette technologie, est donc importante – supérieure à 50 % –, car elle se vend un peu en dessous du prix de marché. Enfin, on peut estimer, à partir de différentes sources, la manière dont se positionnent les technologies émergentes : *low cost*, comme les organiques (données Konarka) ou *high tech*, comme le solaire à concentration.

les équipements nécessaires, y compris des usines « clés en main » de tailles allant jusqu'aux 100 MW crête (MWc)/an (2), avec des coûts d'investissement de l'ordre de 250 à 300 millions d'euros. Les technologies ont pu se mettre en place et se fiabiliser grâce, notamment, à de nombreuses synergies avec les équipementiers de la filière microélectronique. Sur tous ces points, la situation est beaucoup plus contrastée dans les filières des couches minces (comme nous le verrons plus loin), mais on note une évolution rapide, avec des avantages portant sur les coûts affichés, les plus bas, mais aussi sur d'autres points, comme le cycle de vie, le déploiement industriel, les domaines d'application ; les filières couches minces offrant, à moyen terme, les meilleures perspectives pour un développement massif du photovoltaïque. Ces dernières années, les technologies des couches minces, relativement récentes, ont connu un développement très rapide, qui se manifeste dans les *courbes d'apprentissage*, qui résument non seulement les effets d'apprentissage, mais aussi les gains d'échelle et d'innovation. Ils constituent des facteurs réguliers (quasi-prévisibles) de réduction des coûts (voir les figures 1 et 2).

L'évolution de la production et des parts de marché des filières couches minces a d'ailleurs traduit une forte croissance, ces dernières années, passant de 5 % au début des années 2000 à environ 10 % en 2007, les estimations pour 2008 s'établissant autour de 13 % (voir le tableau 1).

Cette évolution est particulièrement remarquable, même pour un secteur en forte croissance (40 % par an, en moyenne, depuis une quinzaine d'années).

Bien sûr, le contexte économique a fortement évolué depuis 2007 et les accroissements de capacité des industriels (surtout dans une période de baisse de la demande) vont conduire à une restructuration du marché et à une consolidation des acteurs industriels conférant ainsi un pouvoir de négociation plus favorable aux acheteurs, notamment en raison, d'une part, de l'existence de stocks et, d'autre part, de surcapacités importantes.

(2) La capacité des usines est traditionnellement donnée en termes de capacité de production énergétique des modules photovoltaïques fabriqués plutôt qu'en m<sup>2</sup>, ce qui permet une meilleure comparaison entre les différentes technologies.

Années	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Production c-Si	1,9	2,8	5,2	7,9	12,9	16,8
Production Couches minces	0,2	0,3	0,7	2,2	4,0	6,1
Total (GWc)	2,1	3,1	5,9	10,1	16,9	22,9

**Tableau 1 :** Evolutions comparées des capacités de production des cellules solaires en silicium cristallin (c-Si) et en couches minces. (à partir de 2009, il s'agit d'estimations).

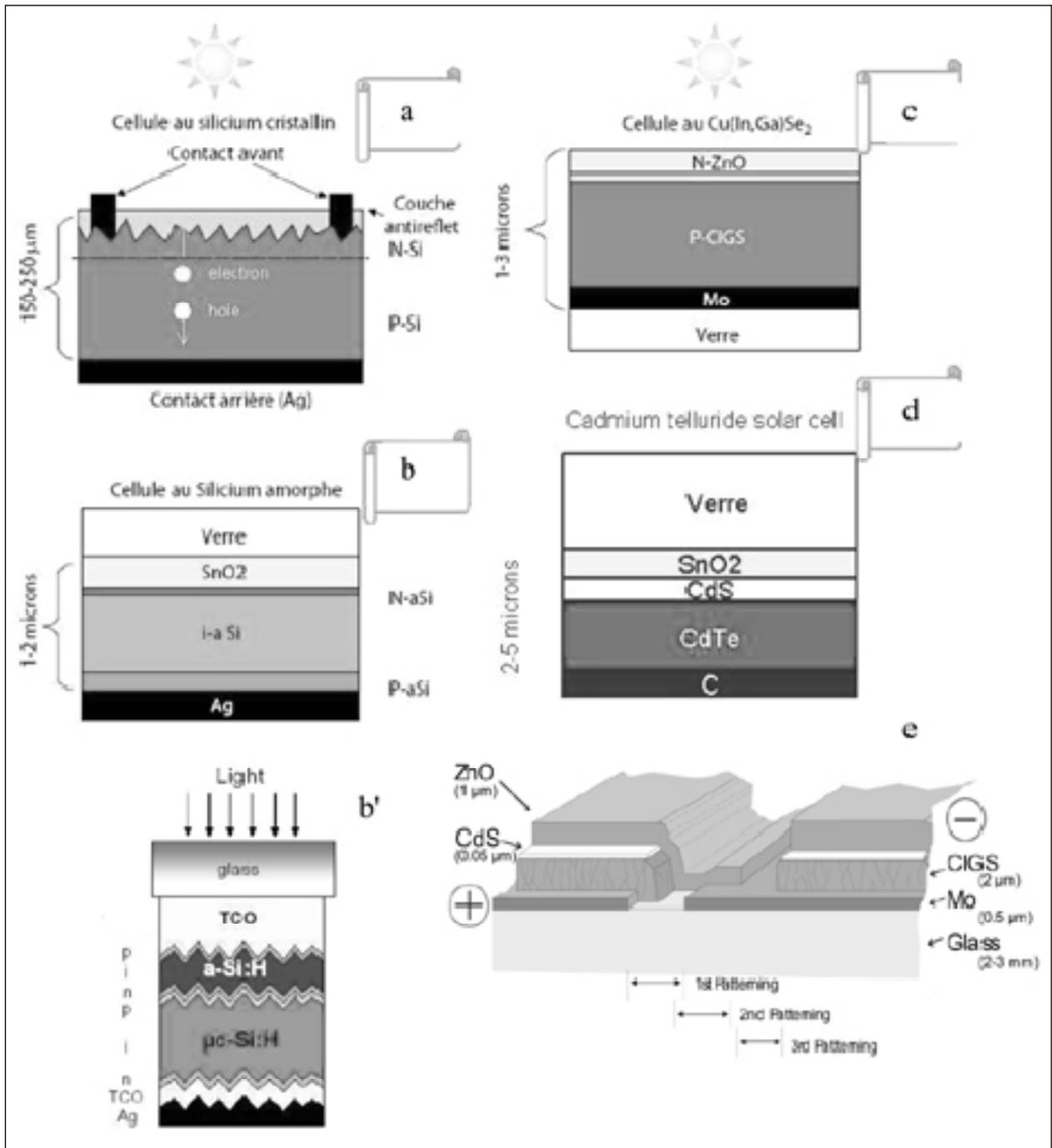


Figure 2 : Schémas des différents types de cellules solaires.

Les épaisseurs des matériaux actifs sont indiquées entre parenthèses :

- a) cellule en Silicium cristallin,
- b) cellule en couche mince en silicium amorphe hydrogéné simple,
- b') double jonction,
- c) cellule à base de chalcopyrites ( $\text{Cu}(\text{In,Ga})(\text{S,Se})_2$ ),
- d) cellule CdTe,

- et e) schéma d'interconnexion des cellules en couches minces, qui peut être réalisée sur les lignes de production en intercalant des étapes de gravure aux étapes de dépôt.

## LE POURQUOI ET LE COMMENT DES COUCHES MINCES

La technologie dominante, qui utilise du silicium cristallin (c-Si), a pour elle un retour d'expérience important tant en matière de production que d'opération,

une fiabilité éprouvée et de bons rendements de conversion photovoltaïque. En revanche, la filière de production des cellules au silicium cristallin, qui nécessite la maîtrise d'une quarantaine d'étapes successives, est pénalisée par les surcoûts et les goulots d'étranglement inhérents à la fabrication et à la manipulation de plaquettes de silicium très minces (les « wafers »). Pour

toutes ces raisons, il devient impératif (et cela, d'autant plus qu'il s'agit de produire des volumes importants et à faible coût) de passer à des technologies de revêtement de couches minces.

Ces technologies permettent :

- la réduction d'un facteur 100 (voire 500, dans le cas du silicium amorphe, noté a-Si) de l'épaisseur des matériaux actifs, et donc la diminution des coûts matière, des coûts de procédés et de l'empreinte écologique associée ;
- le dépôt en couche mince, à des températures modérées permettant l'utilisation de supports peu coûteux comme le verre (~5 €/m<sup>2</sup> en production), voire de certains polymères (dans le cas des cellules a-Si et dans celui des cellules organiques, où ce dépôt s'effectue à basse température) ;
- une automatisation poussée des *process*, avec, par exemple, l'interconnexion des cellules en ligne, les procédés en continu, voire en rouleaux ;
- une mise en service très rapide des usines (de 3 à 6 mois, contre 9 à 12 mois dans le cas du c-Si, (3)) et, ce, grâce à des procédés simples;
- des coûts d'investissement réduits (<1 €/Wc pour CdTe, ~2 à 2,5 €/Wc de capacité de production pour a-Si, contre 3 €/Wc pour c-Si) et la réduction du nombre d'étapes une dizaine, contre une quarantaine, dans le cas du silicium monocristallin (c-Si) ;
- une cadence de production rapide (~40 secondes/m<sup>2</sup>), qui devrait encore progresser fortement ;
- des stocks plus faibles (il faut de 2h à 2h30 pour passer d'un substrat de verre à un module fini, contre plusieurs jours pour passer du Si source au module au silicium monocristallin fini) ;
- de nouvelles applications (flexibles, sur des substrats variés, intégrables au bâti ou à des objets « nomades »).

Les gains en termes de coût unitaire de production sont donc très importants. Cela vaut aussi du point de vue de l'empreinte écologique, l'énergie grise (c'est-à-dire l'énergie ayant servi à la production proprement dite des panneaux solaires) correspondant à 6-12 mois de production d'énergie, pour les cellules en couches minces, contre 2 à 3 ans, pour les cellules au silicium monocristallin. De même, le bilan carbone est bien meilleur pour les couches minces, même fabriquées aux Etats-Unis, et donc grâce à des sources d'énergie primaires basées sur le charbon (30 g CO<sub>2</sub>/kWh) (4).

Tout cela étant dit, pourquoi n'observe-t-on pas une domination des technologies couches minces ? C'est

qu'il reste encore des développements de R&D à réaliser pour parvenir à des performances techniques (en termes de fiabilité et de rendement de conversion), qui rendent les couches minces suffisamment attractives. Bien que les cellules actuellement les plus performantes soient du type couches minces (AsGa – arséniure de gallium), les filières économiquement compétitives ont des rendements de conversion significativement plus faibles que le silicium cristallin, et une maturité industrielle bien moindre (voir le tableau 2).

Il faut cependant noter que l'écart diminue et qu'en conditions réelles d'utilisation, le productible des couches minces est souvent sous-estimé, car les dispositifs sont en fait moins sensibles que le c-Si à des conditions non-standard (luminosité, température) : par kW nominal, les couches minces produisent entre 5 et 10 % de plus de kWh. Notons que les cellules photovoltaïques voient leur rendement diminuer lorsque la température des panneaux solaires augmente (d'environ 0,4 % / °C pour le c-Si, et pour moitié moins, en ce qui concerne les couches minces) ; de même, sous faible éclaircissement, la diminution de leur rendement est plus importante pour le c-Si que pour les couches minces.

Passons à une analyse plus détaillée des différentes filières couches minces industrielles.

## LES FILIÈRES INDUSTRIELLES

Les filières couches minces sont le challenger annoncé de la filière, traditionnelle, celle du silicium monocristallin. Mais pour réussir, les performances techniques et les avantages industriels ne suffisent pas ; il faut aussi pouvoir rassurer les investisseurs sur plusieurs points, et en particulier sur les risques associés à toute technologie pour laquelle le retour d'expérience est relativement court. De nombreuses questions se posent : qu'en est-il de la fiabilité des procédés ? De la disponibilité des outils industriels ? De la stabilité, à long terme, des produits ? Mais aussi, des modèles de création de valeur ? Sur beaucoup de ces points, une R&D performante est essentielle. Elle constitue le fer de lance des pays à la pointe de cette technologie que sont l'Allemagne, le Japon et les Etats-Unis.

(3) *Le Monde* du 24 juillet 2009.

(4) V.M. Fthenakis, *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2006 ; 14:275–280 DOI: 10.1002/pip.706 ; V.M. Fthenakis *Energy Policy* 35 (2007) 2549–2557.

	a-Si	CdTe	CIGS	c-Si
Cellules	13	16	20	25
Modules	6-8	10	13	20

**Tableau 2** : Meilleures valeurs observées des rendements de conversion (en laboratoire et en production) des différents types de cellules couches minces.

Les valeurs pour le silicium cristallin (c-Si) sont données, à titre de comparaison. On distingue les valeurs records, en laboratoire, de celles obtenues en production (modules), les premières sont une bonne indication des valeurs probables en production, après un délai de développement, qui, historiquement, a varié entre 15 et 20 ans.

Pour les filières existantes, les rendements de 30 à 50 % inférieurs à ceux du c-Si, même avec des coûts de production plus bas, imposent un modèle de valorisation spécifique en raison du poids plus important, notamment, de la disponibilité des surfaces d'installation disponibles et de leur coût. Pour une puissance de système donnée, le coût hors module (câbles, supports, etc.), est également plus élevé et se traduit par un surcoût d'environ 10 centimes d'euro par point de rendement de conversion en moins. Il existe cependant des disparités entre les trois filières couches minces déjà passées au stade industriel.

#### Le silicium amorphe hydrogéné (a-Si:H)

C'est la filière la plus mature du point de vue industriel, avec un retour d'expérience important. Il existe de nombreux fabricants d'usines « clés en main » grâce à la présence d'opérateurs historiques et à des synergies avec la fabrication des écrans plats. Une plus grande maîtrise technologique a permis de tester des concepts innovants (notamment en ce qui concerne les interconnexions et le piégeage optique), qui pourront servir aux autres filières « couches minces ». Il faut mentionner, comme autre point fort, la possibilité de fabriquer, à l'échelle industrielle, des panneaux solaires flexibles, de surfaces importantes (par exemple, la « moquette solaire » produite par la société Unisolar, qui peut être facilement installée en toiture). Les panneaux sur substrats verriers ont atteint, eux aussi, des superficies importantes (environ 6 m<sup>2</sup>).

L'on constate un problème de dégradation initiale des cellules, qui limite le rendement stabilisé à des valeurs inférieures à 10 % (pour les modules industriels). Les coûts d'investissement rapportés à la capacité de production restent élevés, à cause de rendements de conversion photovoltaïque bas et de vitesses de dépôt (du silicium sur le support) relativement basses : il y a là des marges possibles de progrès. Les évolutions en cours (matériau Si polymorphe et microcristallin) pourraient permettre de pallier ces inconvénients, tout du moins en partie.

#### La filière au tellurure de cadmium (CdTe)

C'est la filière permettant d'obtenir le kWh photovoltaïque le moins cher, toutes filières confondues, avec, par référence aux derniers chiffres rendus publics, un coût de production de 0,83 \$/Wc. Cela est dû au matériau utilisé, dont le rendement de conversion est supérieur à 10 % (soit un niveau suffisamment élevé pour permettre un amortissement raisonnable des systèmes installés), mais aussi, et surtout, à des procédés de production à débit rapide, qui tirent vraiment parti de l'avantage inhérent aux couches minces. On

a observé une progression extrêmement rapide des capacités de production, les verrous techniques ayant été levés et les certifications obtenues (notamment en matière de stabilité à long terme). La croissance de cette filière est (pour l'instant) potentiellement limitée par la disponibilité des matières premières (le tellure, qui entre dans la composition du matériau actif, est peu abondant et peu produit). Cette filière est dominée par un seul acteur (First Solar, qui est en passe de devenir le premier producteur mondial de panneaux photovoltaïques, alors qu'il était encore marginal il y a seulement quelques années), même si quelques concurrents se mettent sur les rangs. La capacité globale de production est actuellement de 1 GWc/an.

Une des difficultés auxquelles cette technologie est confrontée est la gestion des questions environnementales, cruciale pour une énergie « propre » : le cadmium (Cd), qui entre dans la composition du matériau actif, est un métal très toxique, qui fait l'objet de législations particulières, notamment en Europe et au Japon. Ces panneaux sont recyclables, mais, afin d'en contrôler au mieux tout le cycle de vie, l'application en est limitée, pour l'instant, aux fermes solaires. La question du risque environnemental posé par cette filière (comportement en cas d'incendie, de fracture...) a été étudiée et aucun problème important dans l'utilisation des panneaux n'est apparu jusqu'ici (5). Cette question est certes particulièrement sensible dans le cas du tellurure de cadmium (CdTe), mais elle se pose pour tous les procédés industriels, et le photovoltaïque n'y fait naturellement pas exception.

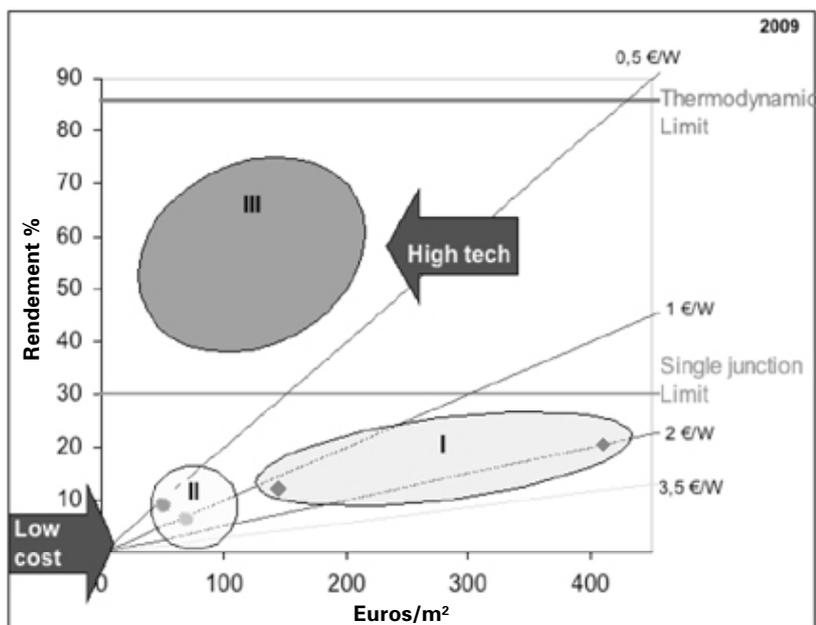
#### La filière chalcopirite (diséléniure de cuivre et d'indium (-gallium) CuIn(InGa)Se<sub>2</sub>, noté CIGS)

C'est probablement la filière dotée du plus fort potentiel : elle a obtenu les rendements de conversion les plus élevés, tant en laboratoire (où ils sont voisins de ceux obtenus avec le c-Si) qu'en production industrielle (voir le tableau 2 de la page précédente).

En raison de similitudes entre les matériaux et les procédés, les coûts de production unitaires prévisibles sont voisins de ceux de la filière CdTe, et le coût du kWh pourrait donc lui être inférieur de 20 %, du fait de rendements de conversion photovoltaïque plus élevés. Les compagnies de petite taille recourant à cette filière sont nombreuses, elles sont souvent adossées à de grands groupes (tel que Würth, Shell, St-Gobain, Honda et Q-cells), qui se sont lancés dans le test de petites unités de production.

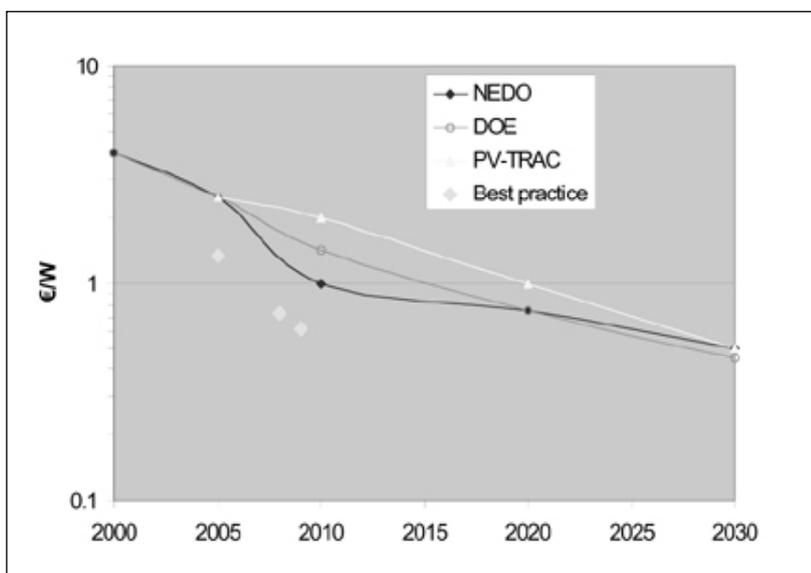
Sur le long terme, et de façon analogue aux autres filières, la disponibilité de l'Indium (In) pourrait poser

(5) Voir, par exemple, le magazine *Photon International* de mars 2009. Il est cependant important de signaler qu'un nombre restreint d'études a été réalisé.



**Figure 3 :** Positionnement des différentes filières photovoltaïques, en termes de coût et de rendement de conversion.

Le ratio donne la contribution du panneau solaire correspondant au coût de production du watt solaire de crête. La génération I, qui s'appuie sur la technologie c-Si, présente des coûts de production unitaires relativement élevés, mais aussi des rendements élevés (les deux points correspondent à deux types de procédés c-Si). La génération II, les cellules en couches minces, présente des coûts unitaires de production et des rendements plus faibles (le point du haut correspond à CdTe, le point du bas à aSi).



**Figure 4 :** Scénarios de l'évolution du coût de production des modules projetés par des experts mandatés par différents organismes (NEDO, au Japon, DOE aux USA et PV-TRAC mandaté par la Commission européenne).

Les points correspondent aux meilleures valeurs (annonces First Solar 2005, 2008 et 2009, taux de change 1 € = 1,35 \$).

problème. Il faut tout de même relativiser cette problématique, par rapport aux autres filières : les technologies a-Si et c-Si utilisent, en effet, de l'argent, pour les contacts, or l'argent est également rare (et pose également une question environnementale comme nous venons de l'évoquer pour la filière du tellure de cadmium).

### LES PERSPECTIVES TECHNIQUES

Quelles sont les perspectives de ces filières naissantes et quels défis doivent-elles relever ?

Sur le court terme, il y a beaucoup à gagner en matière de *packaging*, en allant vers l'intégration des modules aux systèmes, et vers la conception et la fabrication en usine de systèmes complets, au plus près de leur utilisation finale.

A moyen terme, on peut parier sur l'émergence de nouveaux procédés à très bas coûts (impression, galvanoplastie...), qui pourraient venir fortement réduire les coûts de production.

Sur le long terme, il faudra certainement aller vers une évolution des matériaux permettant d'augmenter de manière significative les rendements (de façon à se rapprocher des rendements de conversion thermodynamique, qui sont supérieurs à 60 %), à coût de production unitaire bas.

A chacune de ces étapes du développement de la filière photovoltaïque, les facteurs d'échelle et d'apprentissage devraient venir contribuer à cette évolution du coût à la baisse (voir la figure 3).

En termes de prospective, différents scénarios de réduction des coûts, d'évolutions de parts de marché et d'accroissement de capacités de production ont été proposés (voir la figure 4). Notons qu'ils se sont tous avérés trop pessimistes...

## EN RÉSUMÉ

Dans un premier temps, le développement du photovoltaïque a été rendu possible par l'offre de services nouveaux. Dans la phase actuelle, il est surtout conditionné par le coût de production du kWh. Dans la prochaine phase, il risque fort d'être limité par des questions liées au développement soutenable de la technologie (*posées, par exemple, par l'utilisation de l'espace et des matières premières*). Sur ces deux derniers points, en particulier, l'avènement des technologies couches minces offrent les meilleures perspectives d'avenir parmi toutes les technologies existantes.

En l'état actuel des choses, un tiers, seulement, de la production est réalisé en Europe, alors qu'elle représente plus de la moitié du marché. Compte tenu de ses besoins en main-d'œuvre et de sa disponibilité clé en main, la technologie c-Si a tout pour se développer, en premier lieu, dans les pays émergents. Les filières couches minces ont, par contre, davantage intérêt à s'implanter dans les régions d'utilisation, afin de limiter les frais de logistique.

Et la France ? Pour que celle-ci soit partie prenante dans les développements en cours, on ne peut que souligner l'importance des programmes de démonstration de systèmes photovoltaïques (le retour d'expérience sera crucial, pour les couches minces) et des programmes de R&D.